

# **Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs**

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

Förderkennzeichen: 02E11748A und 02E11748B

## **Schlussbericht** Hauptband

Der vorliegende Schlussbericht entstand unter Mitarbeit von:

### **Projektmitarbeitende TUC**

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

### **Projektmitarbeitende IBeWa**

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

### **Projektmitarbeitende BGE TEC**

Dr. Nina Müller-Hoeppe  
Dr. Ali Hussein  
M. Sc. Tilman Fischer

### **Projektmitarbeitende K-UTEC**

Dipl. Dittmar Lack  
Dipl. Thomas Schicht  
Dr. Markus Brüning

### **Projektmitarbeitende HZDR**

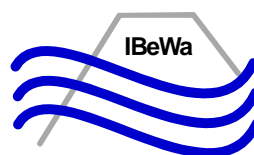
Dr. Johannes Kulenkampff

Beteiligte Institutionen:

Technische Universität Clausthal - Institut  
für Bergbau  
(TUC)



Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Was-  
ser- und Deponietechnik  
(IBeWa)



BGE TECHNOLOGY GmbH  
(BGE TEC)



K-UTEC Salt Technologies  
(K-UTEC)



Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf  
(HZDR)



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



Und betreut vom:



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

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

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Einleitung / Motivation</b> .....	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Vorhabensbeschreibung</b> .....	<b>11</b>
4.1	Grundlagen und Vorgehensweise .....	11
4.2	Testkonzept .....	12
4.3	Bauwerkskonzept.....	13
<b>5</b>	<b>Standortcharakterisierung</b> .....	<b>15</b>
5.1	Geologische Situation .....	15
5.2	Bergtechnische Situation.....	15
5.3	Auffahrung und Vermessung des Standortes .....	15
5.4	Rauheit .....	17
5.4.1	Methodik zur Erfassung und Quantifizierung der Rauheit .....	17
5.4.2	Ergebnisse Rauheit .....	19
5.5	Gebirgscharakterisierung und thermodynamische Standortbedingungen vor Betonage .....	22
5.6	Geomechanische Situation .....	23
5.6.1	Spannungssondierungen vor Betonage .....	23
5.7	Strömungstechnische Situation .....	24
5.7.1	Arbeitsprogramm in situ Untersuchung .....	24
5.7.1.1	Oberflächenpackermessungen .....	25
5.7.1.2	Bohrloch- und Kombipackermessungen .....	26
5.7.2	Ergebnisse in situ-Permeabilitätsuntersuchungen vor Betonage.....	28
5.7.2.1	Oberflächenpackeruntersuchungen.....	28
5.7.2.2	Bohrloch- und Kombipackeruntersuchungen .....	29
5.7.3	Laboruntersuchungen – Untersuchungsprogramm und Ergebnisse Steinsalz 32	
5.7.3.1	Lösungsgehalt .....	33
5.7.3.2	Reindichte .....	33
5.7.3.3	Trockendichte .....	33
5.7.3.4	Porosität aus den Dichten ( $n_t$ ).....	33
5.7.3.5	Sättigung .....	33
5.7.3.6	Effektive Gaspermeabilitäten .....	33
5.7.3.7	Porosität und Porengrößenverteilung aus CT .....	34
5.7.3.8	Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP).....	35
<b>6</b>	<b>Bauwerkserrichtung</b> .....	<b>37</b>

6.1	Installation der Messausrüstung.....	38
6.1.1	Einbau der Schalung und der Montagebühne .....	38
6.1.2	Einbau der kabellosen Sensorik (KLS).....	39
6.1.3	Einbau der Injektionsschläuche .....	42
6.1.4	Einbau der Ringkammern .....	44
6.1.5	Einbau der Anschlussrohre .....	47
6.1.6	Test der Anschlussrohre .....	48
6.1.7	Installation der Temperatursensoren.....	50
6.1.8	Einbau der Armierungsmatten .....	53
6.1.9	Einbau von KG-Rohren.....	54
6.2	Einbau des MgO-Betons .....	55
6.2.1	Rezeptur des eingebauten MgO-Baustoffs .....	55
6.2.2	Mischtechnik.....	55
6.2.3	Pumptechnik.....	56
6.2.4	Betonageverlauf.....	57
6.2.5	Baubegleitende Qualitätssicherung.....	57
6.2.5.1	Ausgangsstoffe.....	57
6.2.5.2	Magnesiumoxid .....	57
6.2.5.3	Salzgrus .....	58
6.2.5.4	Baustoff suspension - Suspensionsdichte, Fließmaß und Suspensionstemperatur .....	60
6.2.5.5	Erhärungsverhalten - Quasiadiabatische Temperaturmessung.....	60
6.2.5.6	Festkörpereigenschaften - Biegezugfestigkeit und einaxiale Druckfestigkeit .....	62
6.2.5.7	Beobachtungen während der Betonage.....	63
6.2.5.8	Weitere Beobachtungen während des Baus .....	65
6.2.6	Beschreibung des hergestellten Betonkörpers .....	67
6.3	Injektionen am Bauwerk.....	70
<b>7</b>	<b>Charakterisierung des Bauwerkes und des Standortes .....</b>	<b>76</b>
7.1	Geophysikalische Untersuchungen .....	76
7.1.1	Zielsetzung .....	76
7.1.2	Durchführung und der Ergebnisse der geophysikalischen Messungen .....	77
7.1.2.1	Mikroseismik.....	77
7.1.2.2	Geoelektrik .....	79
7.1.2.3	Bohrlochradar .....	80
7.2	Monitoringergebnisse.....	81
7.2.1	Entwicklung der mechanischen Einspannung .....	82
7.2.2	Temperaturentwicklung.....	84
7.2.2.1	Messdaten der Temperaturentwicklung .....	84
7.2.2.2	Simulation der Temperaturentwicklung.....	85

7.2.3	Thermodynamische Standortbedingungen - Klimadaten.....	87
7.3	Strömungstechnische Situation am Standort nach Betonage .....	88
7.3.1	Arbeitsprogramm in situ Untersuchung nach Bauwerkerrichtung .....	88
7.3.2	Ergebnisse in situ-Permeabilitätsuntersuchungen nach Betonage .....	92
7.3.2.1	Strömungstechnische Situation im Salinar nach Betonage des Halbdammes .....	92
7.3.2.2	Strömungstechnische Situation im Baukörper und in der Kontaktzone ....	96
7.3.3	Laboruntersuchungen Baustoff .....	98
7.3.3.1	Ergebnisse .....	98
7.3.3.2	Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP) .....	101
7.3.3.3	Effektive Gaspermeabilität der Kontaktzone .....	102
7.3.3.4	CT-Charakterisierung des Kontakts .....	106
<b>8</b>	<b>Testung des Bauwerks mit dem neuen Messsystem .....</b>	<b>108</b>
8.1	Prozessanalyse und Methodik .....	108
8.2	Testprogramm.....	110
8.3	Zeitabhängigkeit der strömungstechnischen Wirkung .....	111
8.4	Methodik der Testauswertung .....	114
8.5	Vorlaufende Testauswertungen.....	116
8.5.1	Einfluss der offenen Oberfläche des Bauwerkes – horizontale Kammern HK01, HK02.....	116
8.5.2	Einfluss der Injektionsleitungen.....	117
8.5.3	Einfluss der Erkundungsbohrungen B14-164 und B15-164.....	118
8.6	Modellgestützte Auswertung Bauwerkstest - Auswertemodell.....	119
8.6.1	Konzept .....	119
8.6.2	Diskretisierung .....	120
8.6.3	Parameterbelegung .....	121
8.7	Testauswertungen - Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes .....	122
8.7.1	Auswertung der Druckbeaufschlagungen der Ringkammern.....	123
8.7.1.1	Ringkammer RK02 mit Erläuterungen zum Auswertemodell.....	123
8.7.1.2	Ringkammer RK01 .....	125
8.7.1.3	Ringkammer RK03 .....	126
8.7.2	Einfluss der Injektionen.....	127
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>130</b>
<b>10</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>133</b>
10.1	Quellen/Literatur .....	133
10.2	Abkürzungen.....	135
10.3	Formelzeichen, Variablen und Indizes.....	136
10.4	Abbildungen.....	137
10.5	Tabellen .....	143

## **Anlagenverzeichnis**

<b>Anlage 1 Standort – Geologie und bergbauliche Situation .....</b>	<b>146</b>
Anlage 1.1 Schichtenfolge des Zechsteins bei Teutschenthal [18] .....	146
Anlage 1.2 Querschnitt des geologischen Profils des Standorts [18] .....	147
Anlage 1.3 Übersicht der Auffahrungen am Standort [19] .....	148
<b>Anlage 2 Methodik zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte .....</b>	<b>149</b>
Anlage 2.1 In situ-Permeabilitätsuntersuchungen - Methodik .....	149
Anlage 2.1.1 Ausgangsbedingungen für strömungstechnische Untersuchungen ...	149
Anlage 2.1.2 Beschreibung der Testmethode - in situ-Permeabilitätsuntersuchungen	150
Anlage 2.1.3 Bohrlochpackertests .....	151
Anlage 2.1.4 Oberflächenpackertests .....	157
Anlage 2.1.5 Kombipacker .....	162
Anlage 2.1.6 Qualitätssicherung der in situ- Permeabilitätsmessungen .....	167
Anlage 2.1.7 Fehlerbetrachtung für die Bestimmung von Permeabilitäten .....	170
Anlage 2.2 Laboruntersuchungen - Methodik .....	170
Anlage 2.2.1 Lösungsgehalt .....	170
Anlage 2.2.2 Dichtebestimmung – Feuchtdichte, Trockendichte und Reindichte ...	172
Anlage 2.2.3 Totale Porosität (aus den Dichten) .....	173
Anlage 2.2.4 Porenraumsättigung .....	173
Anlage 2.2.5 Quecksilberporosimetrie (MIP) .....	173
Anlage 2.2.6 Gaspermeabilität an Kernproben im Labor .....	175
Anlage 2.2.7 Lösungsp permeabilität $k_L$ .....	179
<b>Anlage 3 Pläne - Installation Messsystem und Injektionsleitungen .....</b>	<b>180</b>
<b>Anlage 4 Datenblatt Injektionsschläuche Predimax® 11/19 .....</b>	<b>183</b>
<b>Anlage 5 Datenblatt Außenputzgewebe/Armierungsmatte [40][40] .....</b>	<b>184</b>
<b>Anlage 6 Baustoffkomponenten modifizierte A1-Rezeptur .....</b>	<b>185</b>
Anlage 6.1 Herstellerangaben zum MgO .....	185
Anlage 6.2 Qualitätssicherung Annahme MgO .....	186
Anlage 6.3 Kumulative Korngrößenverteilung des verwendeten Salzgruses .....	193
Anlage 6.4 Datenblatt Anmachlösung - Ses-30 %-Lösung der DEUSA .....	195
Anlage 6.5 Chemische Analyse der eingesetzten Lösung (Analytik - TU-C) .....	196
Anlage 6.6 Datenblatt Anhydritmehl .....	197
<b>Anlage 7 Qualitätssicherung des modifizierten Sorelbetons A1 .....</b>	<b>198</b>
<b>Anlage 8 Injektionsbaustoffe .....</b>	<b>201</b>
Anlage 8.1 Styromag-Suspension .....	201
Anlage 8.2 Injektionsbaustoff MFBBa - Partikelgrößenverteilung der Trockenmischung	202
Anlage 8.3 Technisches Datenblatt des Epojet LV [37] .....	203
<b>Anlage 9 Monitoringergebnisse .....</b>	<b>205</b>
Anlage 9.1 Ergebnisse der kabellosen Sensoren .....	205

Anlage 9.1.1	Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke im Zeitraum 07/2021 – 07/2022 .....	205
Anlage 9.1.2	Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke im Zeitraum der Betonage .....	206
Anlage 9.1.3	Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke während der Tests (verworfenen!) am 23.09.2021 .....	207
Anlage 9.1.4	Kabellos gemessener Kontaktdruck und die angewendeten Prüfdrücke während der Tests am 28.10.2021.....	207
Anlage 9.1.5	Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke während des Tests der HK02 am 29.03.2022.....	208
Anlage 9.2	Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte .....	209
Anlage 9.2.1	Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte - im Projektzeitraum 04/2019 – 02/2022 .....	209
Anlage 9.2.2	Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte während und nach der Betonage im Zeitraum 07/2021 – 10/2021	210
<b>Anlage 10</b>	<b>In situ-Permeabilitäten .....</b>	<b>211</b>
Anlage 10.1	In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den OFP-Untersuchungen 2020 und 2022 im Stoß .....	211
Anlage 10.2	In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen 2020 und 2022 in der Sohle.....	212
Anlage 10.3	In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen 2020 und 2022 im Stoß .....	213
Anlage 10.4	In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B14_164 .....	214
Anlage 10.5	In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B15_164 .....	215
<b>Anlage 11</b>	<b>Laboruntersuchungen - Ergebnisse.....</b>	<b>216</b>
Anlage 11.1	Lösungsgehalt.....	216
Anlage 11.2	Dichte.....	217
Anlage 11.2.1	Reindichte.....	217
Anlage 11.2.2	Trockendichte .....	218
Anlage 11.3	Porosität aus den Dichten .....	219
Anlage 11.4	Porenraumsättigung - Ergebnisse der Untersuchungen für Steinsalz und Baustoff.....	220
Anlage 11.5	Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP)...	221
Anlage 11.5.1	MIP - Ergebnisse für Steinsalz .....	221
Anlage 11.5.2	MIP - Ergebnisse für die im Bauwerk eingesetzte Rezeptur - A1 modifizierte Rezeptur mit Mischsalz+Styromag+Anhydrit .....	224
Anlage 11.6	Effektive Gaspermeabilität Steinsalz, Baustoff und Kontaktbereich - ermittelt an Kernproben im Labor .....	226
<b>Anlage 12</b>	<b>Bauwerkstests .....</b>	<b>227</b>
Anlage 12.1	Alle Tests der Ringkammer 1 .....	227

Anlage 12.1.1	Test RK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2 .....	227
Anlage 12.1.2	Test RK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3 .....	228
Anlage 12.1.3	Test RK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1.....	229
Anlage 12.1.4	Test RK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2.....	230
Anlage 12.2	Alle Tests der Ringkammer 2 .....	231
Anlage 12.2.1	Test RK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1 .....	231
Anlage 12.2.2	Test RK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3 .....	232
Anlage 12.2.3	Test RK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1.....	233
Anlage 12.2.4	Test RK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2.....	234
Anlage 12.3	Alle Tests der Ringkammer 3 .....	235
Anlage 12.3.1	Test RK03 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1 .....	235
Anlage 12.3.2	Test RK03 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2 .....	236
Anlage 12.3.3	Test RK03 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1.....	237
Anlage 12.3.4	Test RK03 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2.....	238
Anlage 12.4	Alle Tests der Horizontalkammer 1 .....	239
Anlage 12.4.1	Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1 .....	239
Anlage 12.4.2	Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2 .....	240
Anlage 12.4.3	Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3 .....	241
Anlage 12.4.4	Test HK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2.....	242
Anlage 12.5	Alle Tests der Horizontalkammer 2 .....	243
Anlage 12.5.1	Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1 .....	243
Anlage 12.5.2	Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2 .....	244
Anlage 12.5.3	Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3 .....	245
Anlage 12.5.4	Test HK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1.....	246
Anlage 12.6	Ausgewählte Tests zum Einfluss der Erkundungsbohrung B14-164.....	247
Anlage 12.6.1	Tests der Ringkammer 1 (RK01).....	247
Anlage 12.6.2	Tests der Ringkammer 2 (RK02).....	248
Anlage 12.6.3	Tests der Ringkammer 3 (RK03).....	249
Anlage 12.6.4	Tests der Horizontalkammer 2 (HK02).....	250
Anlage 12.7	Druckreaktionen in den angrenzenden Injektionsleitungen.....	251
Anlage 12.7.1	Test der Ringkammer 1 (RK01) – Reaktion in IR02 und IR03.....	251
Anlage 12.7.2	Test der Ringkammer 2 (RK02) – Reaktionen in IR04 und IR05 .....	252
Anlage 12.7.3	Test der Ringkammer 3 (RK03) – Reaktionen in IR07 und IR08 .....	253
Anlage 12.8	Ausgewählte Tests zum Einfluss der Injektionen.....	254
Anlage 12.8.1	Ringkammer 1 (RK01) .....	254
Anlage 12.8.2	Ringkammer 3 (RK03) .....	255

## 1 Kurzfassung

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

## 2 Abstract

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

### 3 Einleitung / Motivation

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

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

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

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

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

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

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

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

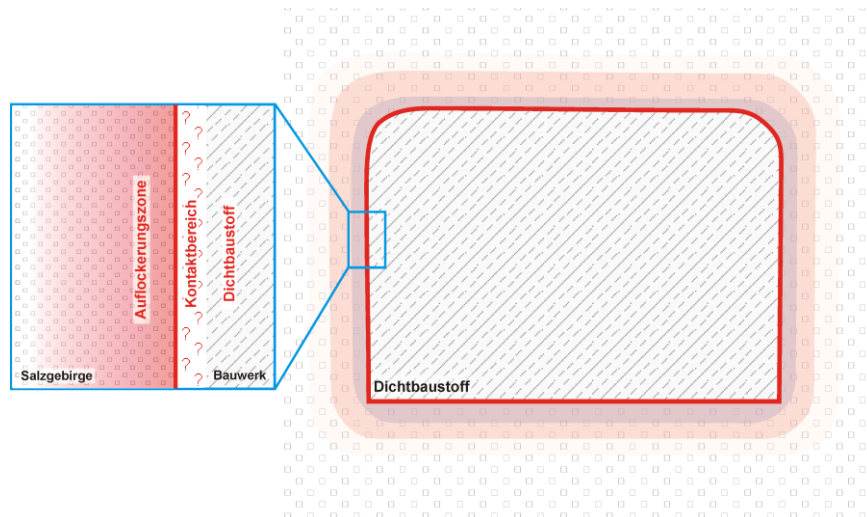


Abbildung 1: Schematische Darstellung Vertikalschnitt durch Dichtsegment mit Details zur Kontaktzone Baustoff/ Gebirge [1]

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

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

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

Im Forschungsvorhaben „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ (FKZ: 02 E11748A, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) wurde ein Konzept für die integrale Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Beurteilung und gegebenenfalls dem Nachweis der strömungstechnisch dichtenden Wirkung entwickelt und dieses in einem Dammbauwerk in der Grube Teutschenthal installiert sowie erfolgreich getestet. Mit diesem Testkonzept wird der genehmigungsrechtlich begründeten Notwendigkeit und Forderung nach einem gegenständlichen Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien [2], [3] und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes entsprochen [3][2].

Darüber hinaus wurden Materialien und Methoden für die ggf. erforderliche Vergütung und Abdichtung des Kontaktes ausgewählt, parametrisiert und in situ getestet.

## 4 Vorhabensbeschreibung

### 4.1 Grundlagen und Vorgehensweise

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

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

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

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

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

Von Seiten der Genehmigungsbehörden wird aktuell für ausgewählte Streckenverschlussbauwerke ein gegenständlicher Nachweis für die strömungstechnische Funktionssicherheit in Abhängigkeit von den Belastungsszenarien und den Anwendungsbedingungen des Streckenverschlussbauwerkes gefordert [3].

Ausgehend von diesem Sachstand, wurde in der 3. Phase des Forschungsvorhabens „Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereichs“ ein Konzept für die integrale strömungstechnische Testung von errichteten Streckenverschlussbauwerken zur gegenständlichen Nachweisführung entwickelt, in einem Dammbauwerk aus MgO-basiertem Baustoff (angelehnt an die A1-Basisrezeptur [1]) in der Grube Teutschenthal installiert und das Testkonzept angewendet. Das Testkonzept konzentriert sich aktuell auf Streckenverschlussbauwerke aus kohäsiven, hydraulisch abbindenden Materialien. Es ermöglicht, wenn erforderlich auch baubegleitend, die mehrfache Testung von Streckenverschlussbauwerken mit Gas und mit Flüssigkeit.

Vorauslaufend und begleitend zu der Entwicklung des Testkonzeptes wurden ergänzende und weiterführende Untersuchungen zu ausgewählten Sachverhalten durchgeführt, z. B. geeignete Injektionsmaterialien für die nachträgliche Vergütung des Kontaktes Baustoff/ Gebirge ausgewählt, parametrisiert und in dem errichteten Streckenverschlussbauwerk exemplarisch angewendet.

Darüber hinaus wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens umfangreiche Kenntnisse zur betontechnologischen Vorgehensweise bei der Betonage des Bauwerkes, zu den geotechnischen und strömungstechnischen Eigenschaften des Baustoffes und des Kontaktes zwischen Baustoffkörper und Gebirge gesammelt.

In der vorliegenden Unterlage erfolgt vorrangig eine Beschreibung des Dammbauwerks, seiner Errichtung und des gegenständlichen Testkonzeptes und der damit verknüpften Ergebnisse. Die Beschreibungen und Ergebnisse der durchgeführten Vorversuche sowie ergänzender Untersuchungen und sind in einem gesonderten Technischen Anhang zusammengefasst.

## **4.2 Testkonzept**

Die Konzeptentwicklung berücksichtigte die Erfahrungen der Projektpartner aus den Testungen der Streckenverschlussbauwerke aus kohäsiven Dichtbaustoffen in verschiedenen Forschungs- und Bauprojekten:

- Strömungsbarrieren Asse seit 2005 [4],
- CARLA Teutschenthal (GV1 und GV2) – 2010 [5],
- Abdichtbauwerk ERAM – 2010 [6], [7],
- Damm Bleicherode – 2013.

Die Erfahrungen aus den genannten Bauwerkstests zeigen, dass die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge zumindest anfangs bestimmend für die Dichtwirkung des Bauwerkes ist, wenn angenommen wird, dass der Baustoffkörper unter Anwendung betontechnologischer Maßnahmen und Qualitätskriterien mit hinreichend geringer Permeabilität hergestellt werden kann. Im Vergleich zur strömungstechnischen Transportwirksamkeit der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge ist die strömungstechnische Transportwirksamkeit des Baustoffkörpers daher als gering einzuordnen.

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

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

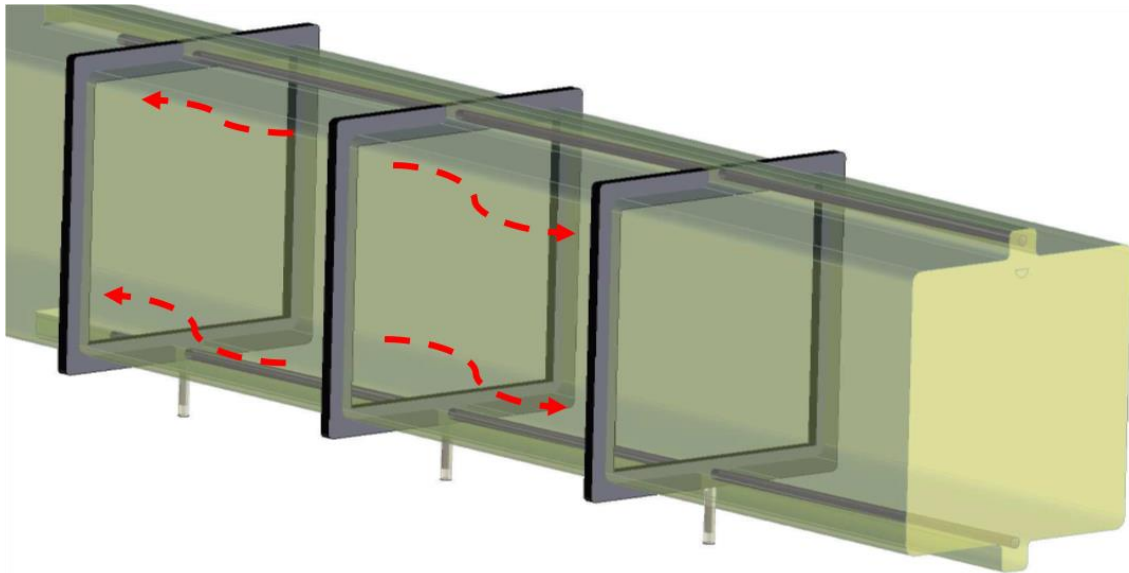


Abbildung 2: Konzeptionelles Ringkammerdesign [1]

Bei der Testung fungieren die Ringkammern als Druckkammern bzw. als Beobachtungs- / Kontrollkammern. Das in der Abbildung 2 dargestellte Konzept zeigt eine Konfiguration, bei welcher die mittlere Ringkammer mit einem Fluiddruck (Gas oder Flüssigkeit) beaufschlagt wird. Der axiale Abstrom wird in den beiden benachbarten Kontrollkammern über den sich einstellenden Druckverlauf beobachtet. Grundsätzlich kann auch jeweils eine der äußeren Kammern beaufschlagt und die Ausbreitung des Testfluids in den beiden anderen Kammern beobachtet werden.

Der Anschluss der Ringkammern sollte gemäß den ersten Konzeptplanungen über eine Befüllbohrung im Sohlbereich und eine Entlüftungsbohrung im Firstbereich erfolgen. Dabei wurden Bohrungen im Baustoff favorisiert. Der Anschluss der Ringkammern innerhalb der Bohrungen sollte mit einem entsprechend langen Mehrfachpackersystem erfolgen.

Das ursprüngliche Konzept der Anwendung eines Mehrfachpackers wurde verworfen und stattdessen ein Anschluss über eine temporäre Verrohrung vorgenommen, die in dieser Unterlage und dem Technischen Anhang detailliert beschrieben ist. Die technische Realisierung der ursprünglich vorgesehenen Bohrungen, welche die drei Ringkammern nach der Betonage anschließen, wurde gegenüber einer temporären Verrohrung als deutlich aufwendiger eingeschätzt.

Das Risiko und die negativen Auswirkungen einer evtl. fehlerhaften Anschlussbohrung ist im Vergleich zu einer temporären Verrohrung höher einzuschätzen, da die Verrohrung vor der Betonage getestet und ggf. einfach nachgebessert werden kann. Die Handlungsoptionen beim nunmehr erforderlichen Rückbau der Verrohrung werden generell als flexibler als bei der Anwendung von Mehrfachpackern angesehen, um auf evtl. unvorhergesehene Schwierigkeiten reagieren zu können.

### 4.3 Bauwerkskonzept

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

In einem neu aufgefahrenen Streckenstummel mit einer Firsthöhe von ca. 4,5 m im Steinsalztafeld der Grube Teutschenthal wurde ein 15 m langer, 2,5 m bis 3,1 m breiter und ca. 2,4 m hoher Halbdamm aus MgO-Baustoff errichtet. Die Form des Halbdammes wurde mit

dem Ziel der Schaffung einer Zugänglichkeit zu der Oberfläche des Dammes und zu den seitlichen Kontaktflächen zwischen Gebirge und Bauwerk gewählt. Die Ausführung des Bauwerkes als Halbdamm war hinreichend für die Anwendung des Testkonzeptes und ermöglicht vielfältige weitere Untersuchungen an dem Bauwerk. Durch eine ca. 6° Neigung der Stöße im Einbaubereich wurden die Voraussetzungen für die gebirgsmechanische Einspannung des Bauwerkes geschaffen. Durch eine Armierung nahe der Oberfläche wurden auch dort die Dehnungen behindert. An der luftseitigen Stirnfläche wurde für die Betonage eine Schalung errichtet. Da auf ein für Dichtbauwerke aus MgO-Baustoff typisches massives Widerlager verzichtet wurde, wurde auch hier eine Armierung eingebaut.

Das ursprüngliche Projekt wurde in den Phasen 1 und 2 für den Baustoff Salzbeton konzipiert, dessen Schwinden eine Injektion des Kontaktes nahelegte, um ein funktionsfähiges Bauwerk zu erhalten [1], [8]. Der wissenschaftliche und ingenieurtechnische Kenntniszuwachs im Zusammenhang mit der Planung von Streckenverschlussbauwerken hat im Projektverlauf zur Priorisierung von MgO-basierten Baustoffen geführt [9], [10], [11]. Die Volumenzunahme dieser Baustoffe im Abbindeverlauf macht theoretisch eine Injektion der Kontaktzone nicht mehr grundsätzlich erforderlich. Da jedoch auch bei Verwendung von MgO-Baustoff die unterschiedlichen Belastungsszenarien „frühe und schnelle Druckbeaufschlagung mit Salzlösung“ und „späte Druckbeaufschlagung mit Salzlösung“ nach einigen hundert bis tausend Jahre zu berücksichtigen sind, wurde trotzdem eine Installation von Injektionsschläuchen für eine Ringinjektion vorgesehen, um während der geplanten Testungen des Bauwerks Handlungsoptionen zu haben, die potenziellen Belastungsszenarien abzudecken. So besteht die Möglichkeit die Kontaktzone gezielt mit Injektionsmitteln zu beeinflussen und die sich einstellenden Auswirkungen anhand von weiteren Testungen zu quantifizieren.

Die detaillierte Beschreibung des Bauwerks ist Gegenstand dieser Unterlage.

## **5 Standortcharakterisierung**

### **5.1 Geologische Situation**

Die Grube Teutschenthal befindet sich in dem Halleschen Kalilagerstättenrevier. Der Versuchsstandort befindet sich in der Nordflanke des herzynisch streichenden Teutschenthaler Sattels mit flachem Einfallen der ruhig abgelagerten Schichten des Staßfurt-Steinsalzes mit 200-300 m Mächtigkeit und des carnallitischen Kaliflözes Staßfurt. Die stratigraphische Abfolge ist in Anlage 1.1 dargestellt.

### **5.2 Bergtechnische Situation**

Der Versuchsstandort des Projektes STROEFUN III befindet sich im schachtnahen Steinsalzaltfeld des Grubenfeldes Teutschenthal, etwa 500 m vom Schacht Teutschenthal entfernt. In diesem Abbaufeld wurde im Zeitraum 1912 bis 1941 Steinsalzgewinnung betrieben. Es wurden insgesamt 15 Abbaukammern mit Pfeilerabständen zwischen 20 m bis 28 m aufgefahren. Die Kammerhöhen betragen dabei zwischen 6 m und 20 m.

Das Steinsalzaltfeld und das angrenzende Lehrrevier werden durch Übergangsschichten und das Staßfurt-Kalilager (K2) im Hangenden überdeckt. Die Überdeckung beträgt etwa 50 m bis 80 m zwischen den Grubenbauen im Steinsalzaltfeld und denen im Kalilager, siehe Anlage 1.2. Im Jahr 1940 kam es durch einen Gebirgsschlag im schachtnahen Kaliabbaufeld zur Ausbildung eines Bruchfeldes. Aus gebirgsmechanischen Messungen ist bekannt, dass das Steinsalzaltfeld durch das überdeckende Kaliabbaufeld eine leichte Entlastung aufweist. Der Versuchsort STROEFUN III liegt im südlichen Randbereich des Steinsalzaltfeldes und geringfügig außerhalb der Überdeckung durch das hangende Kaliabbaufeld.

Der Versuchsort befindet sich am Streckenende einer im April/Mai 2019 mit einer Teilschnittmaschine aufgefahrenen Blindstrecke. Diese liegt gegenüber der Versatzkammer 14 in einer Teufe von ca. 678 m (– 568 mNN). Die Versuchsstrecke wurde mit einer Länge von 25 m, einer Höhe von 4,5 m und einer Breite von 3 m bzw. von 2,5 m aufgefahren. Eine Übersicht über die Position der Versuchsstrecke und ein Querschnitt des geologischen Profils des Bergwerkes befinden sich in Anlage 1.2 und Anlage 1.3.

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

### **5.3 Auffahrung und Vermessung des Standortes**

Nach der Auffahrung der Versuchsstrecke im Jahr 2019 wurde diese besenrein gereinigt. Direkt im Anschluss wurde die Strecke mittels des terrestrischen 3d-Scanners Profiler 5003 der Firma Z+F aufgenommen und ein 3d-Modell erstellt. Es wurden sieben 3d-Scans ohne Verwendung von Festpunkten durchgeführt. Die Auflösung der einzelnen Scans betrug 10.000 Pixel, die Scandauer betrug 3,22 Minuten, der horizontale Sichtbereich beträgt 360° und vertikal 310°. Durch die Bearbeitung der Dateien wurden Dreiecksvermaschungen im OBJ- und DXF-Format erzeugt mit 10 mm und 20 mm Punktabstand.

Anhand dieses 3d-Modells wurden sämtliche Planungen zur Instrumentierung durchgeführt, was sich als sehr vorteilhaft für die späteren Installationsarbeiten zur Instrumentierung, z.B. der Ringkammern erwies. Dazu wurden die 3d-Daten in eine CAD-Software überführt und dort als virtuelles Standortmodell verwendet, siehe Abbildung 3.

Des Weiteren konnten anhand des 3d-Modells die geometrischen Parameter des Halbdamms abgeleitet werden. In der Abbildung 3 links ist die Positionierung des Halbdamms im Standortmodell dargestellt, rechts ist eine Überlagerung eines Fotos und den Scandaten zu sehen. Die geometrischen Parameter des Halbdamms sind Tabelle 1 aufgelistet.

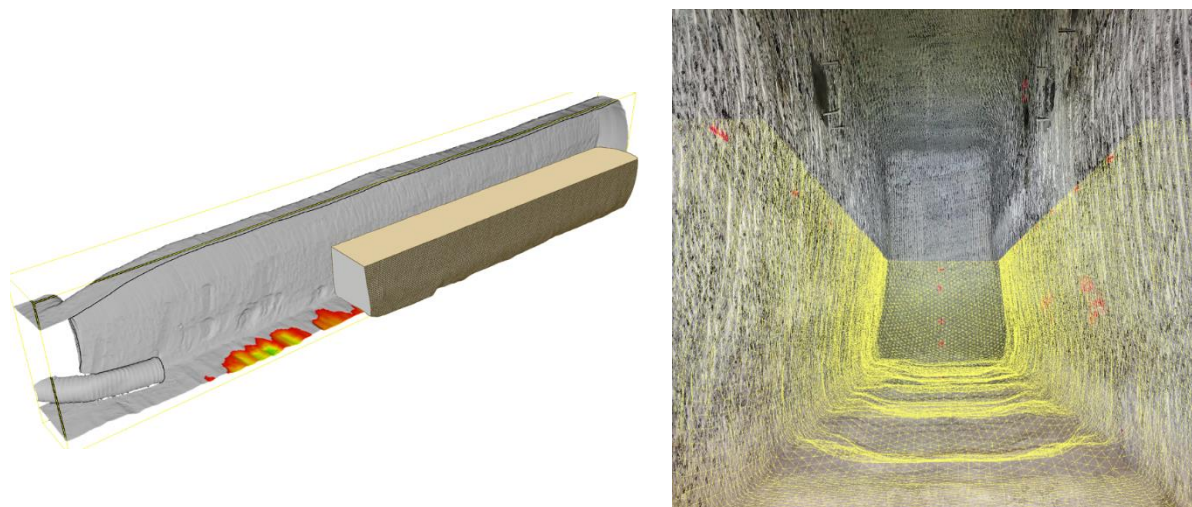


Abbildung 3: Positionierung des Halbdamms in der Versuchsstrecke (links) / Blick in Richtung Ortsbrust überlagert mit Dreiecksvermaschung (rechts)

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

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

Auch nach der fertiggestellten Installation des Messsystems wurde der Standort kurz vor der Betonage mittels einer Leica TRC360 aufgezeichnet. Dadurch konnte der finale Einbauzustand der Instrumentierung mit einer 3d-Punktgenauigkeit von 2,9 mm bei einer Messentfernung von 20 m erfasst werden. Diese Genauigkeitsangabe bezieht sich auf jede einzelne Messung ohne die Verknüpfung mit anderen. Insgesamt wurden von 7 Standpunkten die Messungen durchgeführt. In Abbildung 4 ist der erfasste Endzustand anhand der gescannten Punktwolke dargestellt.

Anhand der Scandaten zur finalen Instrumentierung konnten auch die nachfolgenden Untersuchungen einfacher geplant werden. So konnten z.B. Bohrungen, die nach Bauwerkserstellung geteuft wurden, genau zwischen den Einbauten oder entlang der Kontur positioniert werden.



Abbildung 4: Seitenansicht des Hohlraumes

## 5.4 Rauheit

Da die Rauheit der Streckenkontur als mögliche Einflussgröße für die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften der Kontaktzone angesehen wird, wurde diese exemplarisch erfasst und bereichsweise systematisch nachbearbeitet.

### 5.4.1 Methodik zur Erfassung und Quantifizierung der Rauheit

Das Ausmaß der Unebenheit einer realen Oberfläche quantifiziert die Abweichung von der gewünschten bzw. angestrebten Gestalt der Oberfläche. Dieses muss jedoch auf verschiedenen Größenskalen betrachtet werden.

Gemäß DIN EN ISO 4287 (Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit) und DIN EN ISO 4287 (Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit) werden folgende Gestaltabweichungsklassifizierungen angewendet:

- Gestaltabweichung 1. Ordnung: Formabweichung,
- Gestaltabweichung 2. Ordnung: Welligkeit,
- Gestaltabweichung 3. Ordnung: Rauheit in Form von Rillen,
- Gestaltabweichung 4. Ordnung: Rauheit in Form von Riefen, Schuppen, Kuppen.

Die Rauheit (veraltet „Rauigkeit“) beschreibt also nur einen Teil der möglichen Gestaltabweichungen, wobei jedoch der jeweilige Kontext stark von den Größenskalen der betrachteten Oberfläche abhängt.

Im Bergbau wird der Begriff Rauheit vor allem für Gestaltabweichung in der Größenordnung von Millimetern bis Zentimetern verwendet, da dies die Größenordnung der typischen Bearbeitungsspuren an den Streckenkonturen ist. Am nächsten kommen diese Größenordnungen der typischen Rauheiten im Bauwesen, wo - vor allem im Straßenbau - die Rauheit im Millimeterbereich (ca. 0,5 mm bis ca. 3 mm) für die Griffigkeit eine große Rolle spielt.

Generell ist die Rauheit im Bergbau ein wenig gebräuchlicher Begriff und wird nur gelegentlich bei der qualitativen Beschreibung von Konturen bei der Bearbeitung von Strecken- oder Schachtbereichen verwendet, welche z. B. für den Einbau von Abdichtungen verwendet werden sollen. Vor allem im Zusammenhang mit der Konzipierung von Verschlussbauwerken im Salzbergbau und der Beurteilung des Lasteintrages in die Gebirgskontur wurden Verfahren zur Quantifizierung der Rauheit angewendet. Ein Regelwerk oder gar eine kommerziell etablierte Messtechnik für dieses Anwendungsfeld im Bergbau existieren nicht.

Gegenwärtig wird versucht, laserbasierte Verfahren [12] aus dem Bauwesen für untertägige Anwendungen zu etablieren. Da gegenwärtig z.B. das laserbasierte Verfahren der BAM [12]

noch nicht regulär einsetzbar ist, wurde im Rahmen dieses Projektes testweise, ein im Bergbaubetrieb einfach anzuwendendes Verfahren zur Erfassung und Quantifizierung der Rauheit eingesetzt.

Grundsätzlich kann die Rauheit mit zwei wichtigen Parametern beschrieben werden. Der Mittenrauwert  $R_a$  ist der arithmetische Mittelwert der absoluten Profilabweichungen innerhalb der Messstrecke. Dabei wird der Betrag der Abweichung in Bezug auf eine Mittellinie (Nulllinie) bestimmt, welche derartig in das Profil gelegt wird, dass die Fläche der „Berge“ gleich der Fläche der „Täler“ ist. In der Praxis wird dafür die Summe der Abweichungsquadrate minimiert.

Die maximale Rautiefe  $R_t$  ist die Differenz zwischen dem höchsten „Berg“ und dem tiefsten „Tal“ entlang der Messstrecke.

Im Vorfeld der Beurteilung der strömungstechnischen Situation wurden am 24.02.2021 und 17.03.2021 in der im April/Mai 2019 aufgefahrenen Strecke die Rauheit der Oberfläche der Sohle und der zwei Stöße mittels zweier herkömmlicher Konturenlehren (Abbildung 5) erfasst.



Abbildung 5: Links: Ermittlung der Rauheit am Stoß, rechts: Detailbild

Die beiden Konturenlehren ergeben zusammengesteckt eine Messlänge von 505 mm Länge. Die einzelnen Fühlerlamellen weisen eine Breite von 1 mm auf. Damit wurden die Oberflächentexturen abgenommen und danach auf Papier übertragen.

Die dabei entstandenen Konturlinien wurden maßstabsgetreu digitalisiert und waren somit als x-y-Daten weiter verarbeitbar. Zuerst wurde auf die Profildaten ein Hochpassfilter angewendet, um die niederfrequenten Profiländerungen (Gestaltänderungen 2. Ordnung) aus den Messwerten zu entfernen. Die Grenzfrequenz zur Auftrennung der Daten in den Tiefpass- und den Hochpassanteil wurde mit dem Kehrwert der Messstreckenlänge ( $0,002 \text{ mm}^{-1}$ ) festgelegt. In der Abbildung 6 ist beispielhaft die Filterung des digitalisierten Messprofils Nr. 2 (horizontal, Grafik links) sowie die Hochpass- und Tiefpassanteile nach der Filterung dargestellt.

Danach wurde der Hochpassanteil des gefilterten Profils auf einer Nulllinie ausgerichtet und die beiden Parameter  $R_a$  und  $R_t$  anhand der ausgerichteten Profildaten bestimmt (Abbildung 6 rechts)

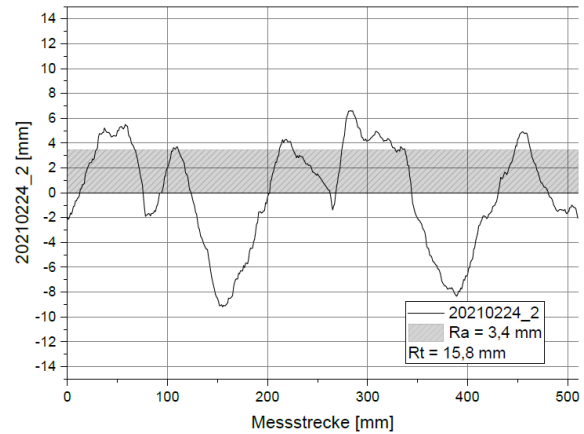
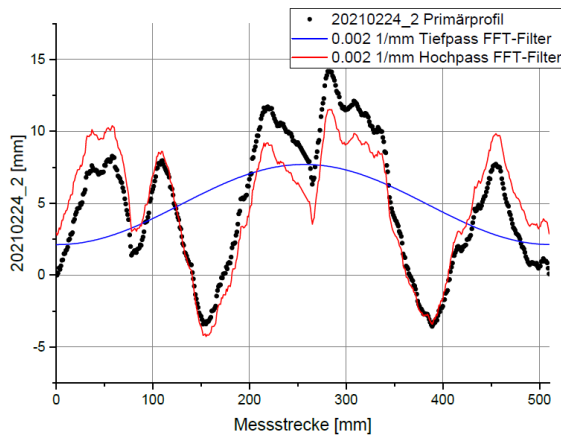


Abbildung 6: Links: Filterung des gemessenen Profils Nr. 2, rechts: Auswertung mit den bestimmten Rauheitsparametern

### 5.4.2 Ergebnisse Rauheit

Insgesamt wurden an den Stößen 8 Profile (4 x horizontal und 4 x vertikal ausgerichtet) gemessen und ausgewertet (Tabelle 2). Die Stöße stellen die originale, unbeeinflusste, nicht zusätzlich nachgeschnittene bzw. nicht bearbeitete Gebirgsoberfläche nach der Auffahrung der Strecke dar. Die unterschiedlichen Ausrichtungen der Messstrecken führten zu keinem maßgeblichen Unterschied in den Rauheitsparametern. Im Mittel ergibt sich der Mittenrauwert  $R_a$  ca. 2,6 mm. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe  $R_t$  beträgt ca. 14,5 mm.

Tabelle 2: Mittlere Rauheitsparameter der Stöße und deren Standardabweichung

Profil Nr.	Ausrichtung	$R_a$	$R_t$	Mittel $R_a$	STABW $R_a$	Mittel $R_t$	STABW $R_t$
		[mm]	[mm]				
1	horizontal	2,4	16,1	2,6	0,5	13,6	2,7
2	horizontal	3,4	15,8				
5	horizontal	2,3	10,6				
7	horizontal	2,4	12,0				
3	vertikal	2,3	14,6	2,6	0,6	15,4	5,2
4	vertikal	3,4	22,9				
6	vertikal	2,1	11,4				
8	vertikal	2,5	12,6				

Der Mittelwert der maximalen Rautiefe von ca. 14,5 mm gibt eine Information auf die minimale erforderliche Schleiftiefe, um im Vorgriff auf Kapitel 5.7.1.1 eine glatte Oberfläche für die Oberflächenpackermessungen zu erzeugen. Daher dient der Wert der mittleren, maximalen Rautiefe als Offset für die Angaben der Teufen für die Untersuchungen der Permeabilität mittels Bohrloch-, Kombi- und Oberflächenpacker.

Zur Ermittlung des Einflusses der Rauheit auf die Eigenschaften im Kontaktbereich Salzgestein/ Baustoff, wurden auf der Oberfläche der Sohle 3 unterschiedliche Bereiche angelegt. Der erste Bereich (**Bereich 1: grob (geringe Bearbeitung)**), siehe Abbildung 7, Abbildung 10) stellt die Oberfläche nach der Auffahrung der Strecke dar. Im zweiten Bereich (**Bereich 2:**

**mittel (mäßige Bearbeitung)**, siehe Abbildung 8, Abbildung 11) wurde die Oberfläche leicht mechanisch geglättet. Diese Glättung wurde mithilfe eines elektrischen Meißelhammers erstellt. Der dritte Bereich (**Bereich 3: fein (starke Bearbeitung)**, siehe Abbildung 9, Abbildung 12) wurde stark mechanisch nachbearbeitet, um eine möglichst glatte Oberfläche zu erzeugen. Diese glatte Oberfläche wurde erzeugt, indem nach dem Einsatz des elektrischen Meißelhammers die Fläche mithilfe eines Winkelschleifers bearbeitet wurde.

Bereich 1 (grob)



Abbildung 7: Draufsicht auf Bereich 1

Bereich 2 (mittel)



Abbildung 8: Draufsicht auf Bereich 2

Bereich 3 (fein)



Abbildung 9: Draufsicht auf Bereich 3

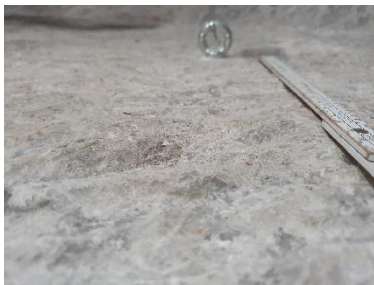


Abbildung 10: Schräge Sicht auf Bereich 1



Abbildung 11: Schräge Sicht auf Bereich 2

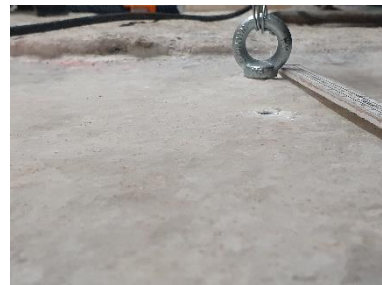


Abbildung 12: Schräge Sicht auf Bereich 3

Es wurden auf jedem bearbeiteten Sohlbereich zwei Messprofile (parallel und senkrecht) zum Streckenverlauf untersucht, wobei die Mittelpunkte der aufgenommenen Messstrecken annähernd aufeinander liegen (Abbildung 13).

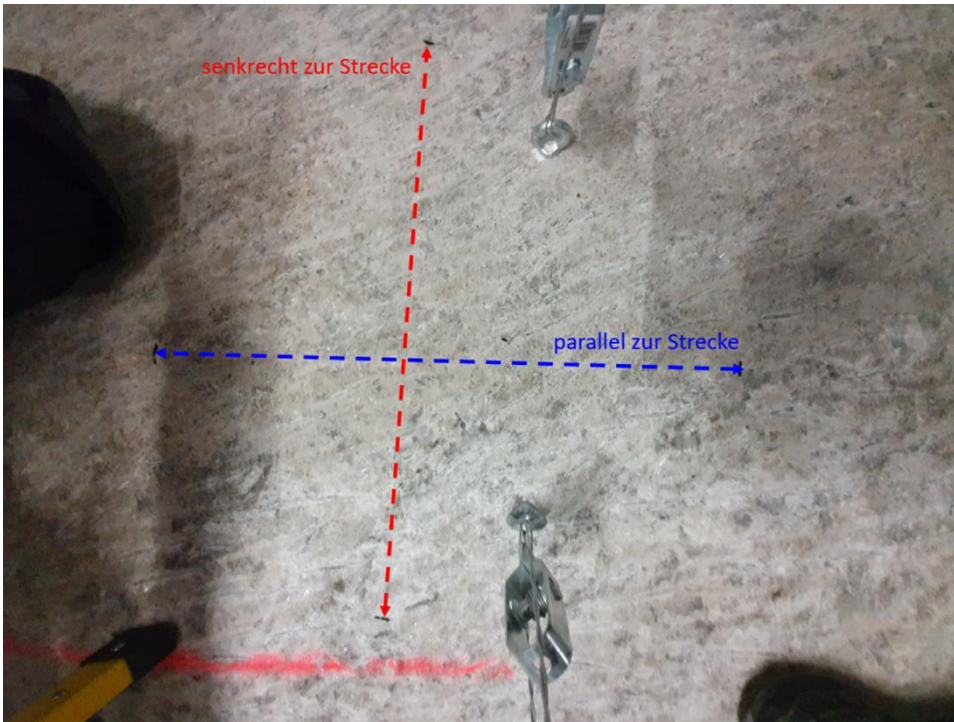


Abbildung 13: Messprofile parallel und senkrecht zur Streckenverlauf

Die Ergebnisse der Messungen auf der Sohle sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Im Unterschied zu den Messungen an den Stößen, wurden nur mittlere Rauheitsparameter angegeben. Auf Grund der Doppelbestimmungen ist eine Angabe der Standardabweichung nicht sinnvoll.

Mit dem angewendeten Messverfahren lassen sich die 3 unterschiedlich bearbeiteten Oberflächenbereiche quantitativ unterscheiden, wobei sich allerdings zeigte, dass die Datenlage für eine Bewertung, insbesondere des fein bearbeiteten Bereiches, nicht ausreicht. So muss für den fein bearbeiteten Bereich 3 davon ausgegangen werden, dass das angewendete (mechanisch abtastende) Verfahren vergleichsweise ungenaue Ergebnisse lieferte, da offensichtlich die untere Grenze des Auflösungsvermögens erreicht wurde.

Als Nachteil des angewendeten mechanischen Abtastverfahrens erwies sich die aufwendige computergestützte Auswertung, die nachträglich erfolgte und daher keine instantane quantitative Bewertung der Oberflächen vor Ort zuließ. Laserbasierte Messverfahren mit einer automatisierten Auswertung haben dafür ein deutlich höheres Potenzial für die Anwendung in der Praxis, wobei auf Grund der typischen Rauheitswerte im Bergbau Messstrecken von 0,5 m bis 1,0 m Länge anzustreben sind.

Ein Vorteil des angewendeten mechanischen Abtastverfahrens ist jedoch die einfache Umsetzung und Handhabung. Im Vergleich zu den laserbasierten Messverfahren, die in jedem Fall zu einer Unterbrechung der bergmännischen Auffahrung führen, kann das Abtastenverfahren jederzeit begleitend zum Vortrieb eingesetzt werden. Es wäre zu prüfen, inwiefern aus einer Kombination der Verfahren in der Zukunft Kriterien für die Beurteilung der Oberflächenrauheit von Konturflächen ermittelt werden können, sofern sich dies als ein wichtiger Baustein für die Qualitätsüberwachung der Standortvorbereitung und der abschließenden Funktionsbeurteilung darstellt.

Tabelle 3: Mittlere Rauheitsparameter der bearbeiteten Sohlbereiche (1,5 m von der späteren Stirnfläche des Halbdamms entfernt)

Profil	Bearbeitung / Lage <sup>1</sup>	Ausrichtung	Ra	Rt	Mittel Ra	Mittel Rt
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	grob unterhalb KG-Rohr 7	parallel	1,1	7,0	1,4	7,2
2		senkrecht	1,6	7,3		
3	mittel unterhalb KG-Rohr 8	parallel	1,3	6,6	1,1	5,5
4		senkrecht	0,8	4,4		
5	fein unterhalb KG-Rohr 9	parallel	0,1	0,7	0,1	0,6
6		senkrecht	0,1	0,5		

## 5.5 Gebirgscharakterisierung und thermodynamische Standortbedingungen vor Betonage

Zur Gebirgscharakterisierung sowie zur späteren Bauwerksbeurteilung wurden von der TS-Bau GmbH Bohrungen verschiedener Länge und Durchmesser geteuft. Die Bohrungen unterhalb des Dammbauwerkes in der Sohle wurden aus einer Bohrsenke erstellt. Weiterhin wurden Messstellen für Oberflächenpackermessungen festgelegt. Eine Übersicht über die meisten Bohrungen unter Angabe ihres Zweckes und die Messstellen für die Oberflächenpackermessungen gibt Abbildung 14. Die Bohrung B06-100-GE (Objekt Nr. 9) verläuft parallel zur Bohrung B06-100-GR und ist in Abbildung 14 nicht sichtbar.

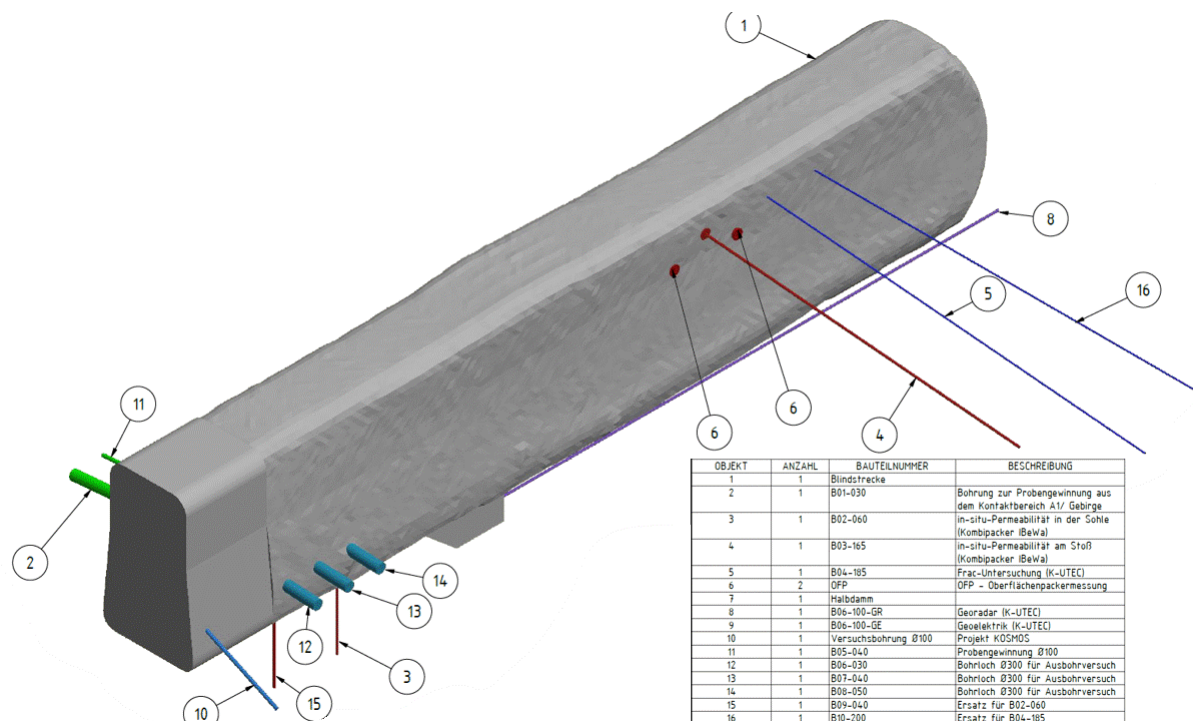


Abbildung 14: Position der Bohrungen (Nr. 9 verdeckt) und der OFP-Messstellen (siehe Nr. 6 und 4 (nur stoßnah)) am NW-Stoß im 3D-Modell des Hohlräume mit Legende

<sup>1</sup> Vgl. Kapitel 6.1.9

Weiterhin wurde am Standort zur Erfassung der thermodynamischen Standortbedingungen ein batteriegestützter Klimadatenlogger (Typ DL-220 THP, Fa. Voltcraft) installiert. Der Sensor wurde ca. 0,5 m oberhalb der geplanten Betonoberfläche des Halbdamms am NW-Stoß installiert. Die Sensorik des Loggers erfasst die Temperatur, den Luftdruck und die relative Luftfeuchte.

## 5.6 Geomechanische Situation

### 5.6.1 Spannungssondierungen vor Betonage

Zur Charakterisierung des Spannungszustandes am Versuchsort wurde eine Spannungssondierung mittels hydraulic fracturing durchgeführt. Hierbei sollte auch der Grundspannungszustand im Salzgebirge ermittelt werden. Es erfolgten sechs Spannungsmessungen in 1-m-Abstand im Bohrloch B10-200 (Objekt Nr. 16, Abbildung 14), da die Bohrung B04-185 verworfen werden musste. Aus den Messungen wurden der Ruhedruck, der Aufreißdruck, der Refracdruck und die Aufreißfestigkeit vor Ort ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Drei der Messungen wurden vorzeitig bereits nach 30 Minuten beendet. Daher sind die drei Messwerte für den Ruhedruck nach 1 Stunde nicht angegeben. Der einzige belastbare Messwert für den Ruhedruck für den stoßfernen Bereich wurde mit 11,9 MPa in 6 m Bohrlochteufe ermittelt. Dieser niedrige Ruhedruck kann durch das im Hangenden liegende Abbaufeld erklärt werden.

Tabelle 4: In situ-Spannungsmessungen in Bohrloch B10-200

Teufe [m]	Aufreißdruck $p_a$ [MPa]	Ruhedruck $p_r$ ( $\frac{1}{2}$ h) [MPa]	Ruhedruck $p_r$ (1h) [MPa]	Refracdruck $p_a^*$ [MPa]	Aufreißfestigkeit $\sigma_{az}$ [MPa]
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	12,92	5,06	4,77	4,78	8,14
2,0	19,75	7,06	6,74	11,40	8,35
3,0	22,05	11,10*	-	14,84	7,21
4,0	23,15	13,02*	-	16,78	6,37
5,0	21,43	13,30*	-	17,15	4,28
6,0	23,03	12,74	11,89	16,36	6,67

\* : Abbruch der Messung aus Zeitgründen

Obwohl drei Messungen nicht zu Ende geführt wurden, lässt sich aus den Werten für den Aufreißdruck und den Ruhedruck nach einer halben Stunde ableiten, dass im Konturbereich eine geomechanische Beeinflussungszone bis etwa 2 m Bohrlochteufe vorhanden ist, da ab 3,0 m sowohl der Aufreißdruck als auch der Ruhedruck nach einer halben Stunde in der Größenordnung liegen, wie der Wert bei 6,0 m. Diese geomechanische Beeinflussungszone ergibt sich aus der mechanischen Beanspruchung/Schädigung durch die Auffahrung des Streckenquerschnittes (auffahrungsbedingte Schädigung) und durch die Änderung des gebirgsmechanischen Spannungszustandes infolge der Auffahrung der Strecke (entspannungsbedingte Schädigung). Beide Prozesse führen zu einer Erhöhung der Porosität und Permeabilität des

streckennahen Gebirges - einer Auflockerungszone. Die Mächtigkeit und die Permeabilität dieser Auflockerungszone sind von den geologischen und bergtechnischen Standortgegebenheiten sowie den mechanischen Eigenschaften der installierten Verschlussbauwerke abhängig.

Der durch die Auffahrung aufgelockerte Bereich ist ein Teil des durch die gebirgsmechanische Entspannung beeinflussten Bereiches und beginnt direkt an der Streckenkontur. Die Mächtigkeit der strömungstechnisch veränderten Auflockerungszone wird durch die Untersuchungen zur Permeabilität der Gebirgskontur in Abhängigkeit vom Konturabstand ermittelt.

## 5.7 Strömungstechnische Situation

### 5.7.1 Arbeitsprogramm in situ Untersuchung

Zur Beurteilung der strömungstechnischen Situation wurden 2020 in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Streckenverlauf der Versuchsstrecke durchgeführt. Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurden als Bohrloch-, Kombi- und Oberflächenpackertests entsprechend den Erläuterungen zur Messmethodik in Anlage 2.1 durchgeführt.

Für die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurden durch TS-Bau GmbH im luftgespülten Kernbohrverfahren Bohrungen mit einem Durchmesser von 70 mm in das Salinar gestoßen. Für die Erstellung wurde getrocknete Druckluft (Kältetrockner) als Spülfluid verwendet. Die Lage der Bohrungen und Messpunkte der Oberflächenpackeruntersuchungen (OFP) sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt.

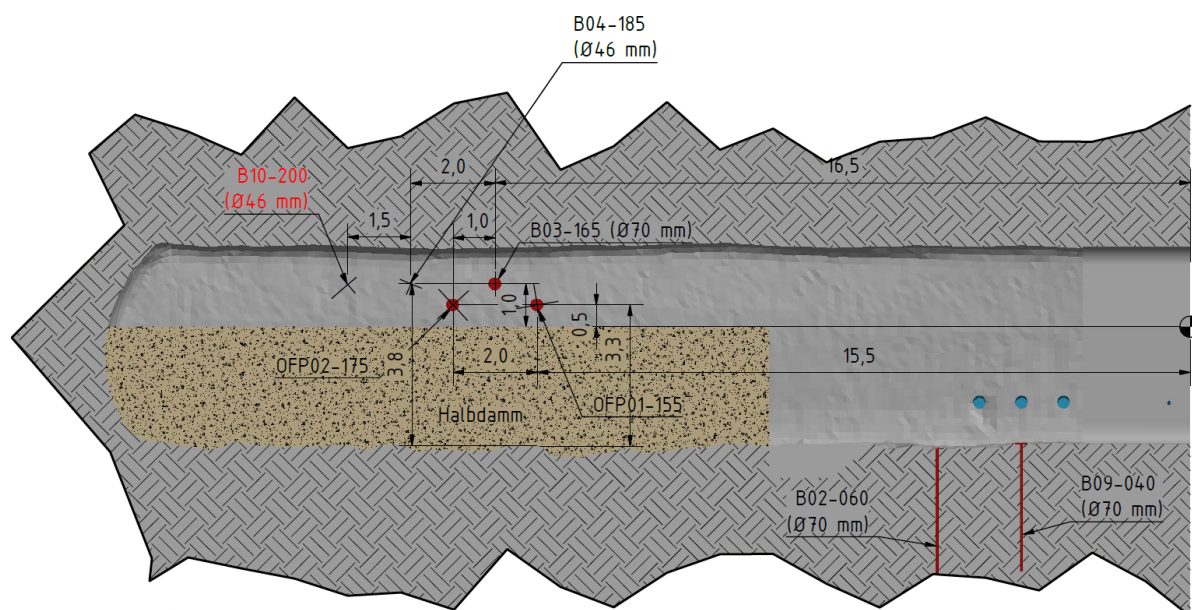


Abbildung 15: Position der OFP-Messungen am NW-Stoß (siehe OFP01-155, OFP02-175, B03-165)

Vor dem Beginn der Untersuchungen wurden die Vor-Ort-Dichtheitstests der komplettierten Messanlagen durchgeführt (Anlage 2.1.6.2). Bei den Dichtheits- und den Bohrloch-, Kombi- und OFP-Tests kam bei den Gaspermeabilitätsuntersuchungen trockene Druckluft zum Einsatz.

### 5.7.1.1 Oberflächenpackermessungen

An der Gebirgskontur am SE- und NW-Stoß wurden vor der Errichtung des Halbdammes OFP-Messungen durchgeführt. Die Messpunkte wurden ab ca. 3,30 m oberhalb der Sohle positioniert. Das Untersuchungsprogramm ist in Tabelle 5 dargestellt. Die Abbildung 15 zeigt die räumliche Position der OFP-Untersuchungen.

Tabelle 5: Arbeitsprogramm zu den Oberflächenpackermessungen 2020 mittels Druckkolben-Oberflächenpacker mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packerbeschreibung	Teufe (Oberkante)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
OFP, d=200 mm	OFP01_175_000_G1	OFP_01_175	0,00	Offset beträgt 14,5 mm
	OFP02_175_000_G1	OFP_02_175	0,00	
	OFP02_175_003_G1		0,03	
	OFP02_175_004_G2		0,04	
	OFP02_175_007_G1		0,07	

Mittels eines Schleifrahmes wurde die zu testende Oberfläche angeschliffen. Der Mittelwert der maximalen Rautiefe von 14,5 mm wird als initiale Konturoberfläche angenommen und ist die untere Grenze für die minimale Schleiftiefe. Er wird als Offset in der Ergebnisdarstellung angegeben (vgl. Kapitel 5.4.2). Für die Bezeichnung der geschliffenen Oberfläche wird der erste Messpunkt nach Anschleifen als 0,00 m Teufe definiert (Abbildung 16, Abbildung 17).

Am NW-Stoß (OFP02) wurden Untersuchungen der Gebirgskontur in einer Teufe von 0,00 m, 0,03 m und 0,04 m sowie 0,07 m durchgeführt (Abbildung 18). Die Untersuchungen erfolgten am OFP02 in einer Teufe von 0,00 m. Dann wurde die Gebirgskontur sukzessive auf 0,03 m und 0,04 m Teufe geschliffen und jeweils erneut Untersuchungen durchgeführt. Abschließend wurde die Gebirgskontur auf eine Teufe von 0,07 m geschliffen und getestet. Weitere Untersuchungen erfolgten am OFP01 (linker Stoß). Dort wurde die Oberfläche des Stoßes auf 0,00 m Teufe geschliffen getestet.

Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Kapitel 5.7.2 erläutert. Detaillierte Angaben finden sich in Anlage 10.1.



Abbildung 16: Mittels Schleifrahmen geschliffene Oberfläche



Abbildung 17: Positionierung des OFP auf der geschliffenen Oberfläche am Stoß

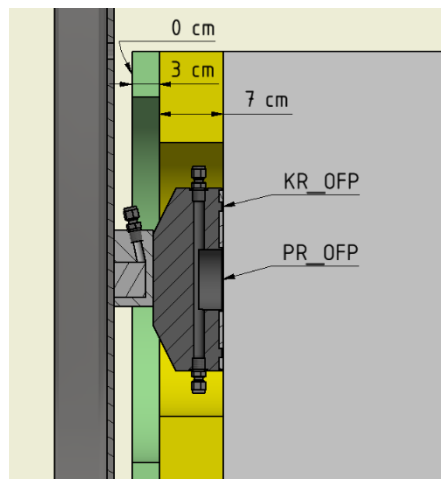


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Oberflächenpackermessungen in unterschiedlichen Schleiftiefen (das Offset von 14,5 mm ist in der Darstellung nicht berücksichtigt).

### 5.7.1.2 Bohrloch- und Kombipackermessungen

Zur Ermittlung der Permeabilität des Gebirges mit zunehmendem Konturabstand wurden vor der Errichtung des Halbdammes die zwei Bohrungen B02-060 und B09-040 in die Sohle sowie die Bohrung B03-165 in den NW-Stoß gestoßen. Eine Übersicht über die räumliche Position der Bohrungen B02-060 (Objekt 3), B09-040 (Objekt 15) und B03-165 (Objekt 4) geben die Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16. In den Bohrungen wurden in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen mit einem Kombipacker (Abbildung 19) und Bohrlochpackern durchgeführt.

Der Durchmesser der Untersuchungsbohrungen beträgt 70 mm. Die Teufen der senkrecht stehenden Sohlbohrungen B02-060 und B09-040 betragen 3,00 m. Die mit 5° einfallende Stoßbohrung B03-165 hat eine Teufe von 10,00 m.

Die Untersuchungen des Salinars in der Sohlbohrung B02-060 mittels Kombipacker wurden mit dem oben beschriebenen OFP und einem 4fach-Doppeldruckkolbenpacker mit einer Prüfraumlänge von 0,095 m durchgeführt. Aufgrund einer Havarie mit Hydrauliköl im Untersuchungsablauf konnte in der Bohrung nur ein Messpunkt getestet werden. Nach der Havarie der Bohrung B02-060 mit Hydrauliköl wurde die zusätzliche Bohrung B09-040 mit einer Teufe von ca. 3,00 m erstellt und die Prüfraumlänge des Packers auf 0,18 m geändert.

Das Untersuchungsprogramm für die Stoßbohrung B03-165 wurde mittels dem oben beschriebenen Kombipacker und einem 4fach-Doppeldruckkolbenpacker mit einer Prüfraumlänge von 0,18 m geplant.

Die Untersuchungen mittels Kombipacker erfolgten in der Sohle und im Stoß in Teufenbereichen von 0,00 m bis 0,01 m, 0,00 m bis 0,03 m und 0,00 m bis 0,05 m sowie 0,00 m bis 0,18 m. Für die Ermittlung der in situ-Permeabilität in den Teufenbereichen von 0,18 m bis 0,36 m und 0,36 m bis 0,54 m kam der 4fach-Doppeldruckkolbenpacker zum Einsatz. Die Untersuchungen von 0,54 m Teufe bis zum Bohrlochtieftsten erfolgten mit einem 2fach-Druckkolbenpacker.

Die Arbeitsprogramme für die Bohrung B02-060 und für die neu erstellte Bohrung B09-040 sind in Tabelle 6 und für die Bohrung B03-165 in Tabelle 7 dargestellt.

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen werden im Kapitel 5.7.2 erläutert. Detaillierte Angaben finden sich in Anlage 10.2.

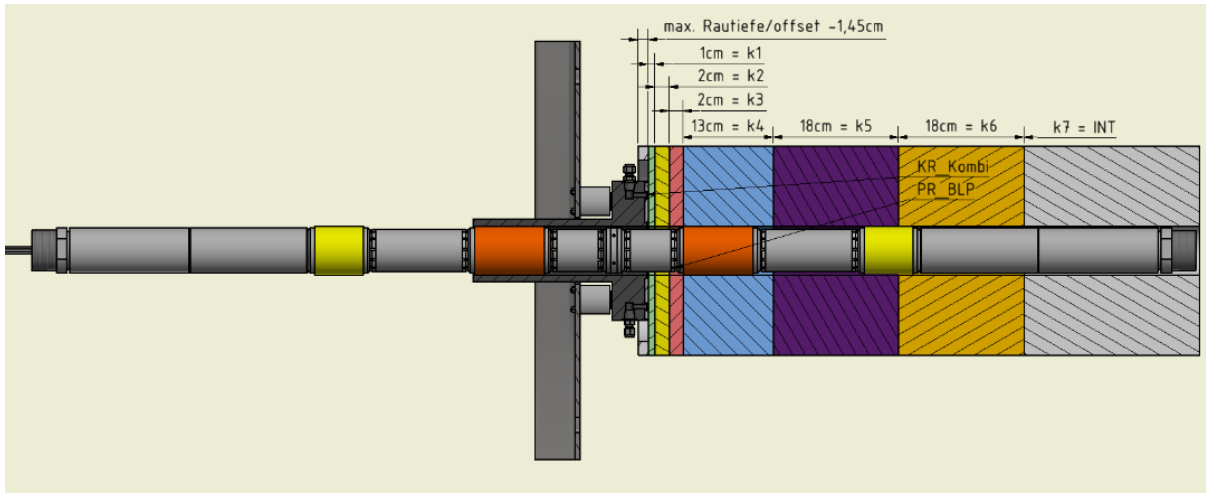


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Kombi-Packers in unterschiedlichen Schleiftiefen

Tabelle 6: Arbeitsprogramm der Kombi- und Bohrlochpackertests in den Bohrungen B02\_060 und B09\_040 in der Sohle mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
B02_060, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B02_060_0000_G1	ES-KP + kurzer Prüf-raum	DK-OFP + DDK-VFP	0,048	nicht gemessen, da Havarie mit Hydrauliköl
	B02_060_0095_G1			0,143	
	B02_060_0190_G1			0,238	
	B02_060_0285_G1			0,333	
B09_040, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B09_040_-0170_G1	ES-KP + kurzer Prüf-raum	DK-OFP + DDK-VFP	0,01	Ersatzbohrung für B02-060
	B09_040_-0150_G1			0,02	
	B09_040_-0130_G1			0,03	
	B09_040_0000_G1			0,10	
	B09_040_0180_G1	kurzer Prüf-raum	DDK-VFP	0,27	
	B09_040_0360_G1	kurzer Prüf-raum	DDK-VFP	0,45	
	B09_040_0540_INT_G1	Abschluss-packer	DK-ZFP	1,77	

Tabelle 7: Arbeitsprogramm zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B03\_165 im Stoß mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
B03_165, (L = 10,00 m; a = -5,0°; d = 70 mm)	B03_165_-0170_1G1	ES-KP + kurzer Prüfraum	DK-OFP + DDK-VFP	0,005	
	B03_165_-0150_1G1			0,015	
	B03_165_-0130_1G1			0,025	
	B03_165_-0065_1G1			0,058	
	B03_165_-0035_1G1			0,073	
	B03_165_0000_1G1			0,090	
	B03_165_0180_1G1	kurzer Prüfraum	DDK-VFP	0,270	
	B03_165_0360_1G1			0,450	
	B03_165_0540_INT_G2	Ab- schlusspa- cker	DK-ZFP	5,27	

Zusätzlich zu den in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurden aus dem Kernmaterial der Bohrungen B01-030 und B05-040 Proben gewonnen und im Labor untersucht (siehe Kapitel 5.7.2. und Anlage 11).

### 5.7.2 Ergebnisse in situ-Permeabilitätsuntersuchungen vor Betonage

Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Salinar wurden im Zeitraum vom 06.02.2020 bis zum 18.08.2020 entsprechend dem Arbeitsprogramm für die Oberflächenpackermessungen (siehe Tabelle 5), die Bohrungen in die Sohle (Tabelle 6) und die Bohrung in den Stoß (Tabelle 7) durchgeführt.

In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung werden die ermittelten Permeabilitäten aus den Jahren 2020 in Abhängigkeit vom Konturabstand in Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt. Über die horizontalen Balken wird die Länge des getesteten Intervalls gekennzeichnet. Zur Gewährleistung einer guten Vergleichbarkeit werden die Dimensionen der Ordinatenachsen in den Grafiken beibehalten.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Lösungsgehalte des Kernmaterials aus den Bohrungen (siehe Kapitel 5.7.3.1) müssen die ermittelten Gaspermeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten angesehen werden.

#### 5.7.2.1 Oberflächenpackeruntersuchungen

Die Ergebnisse der OFP-Untersuchungen sind in Anlage 10.1 zusammengefasst. Es wurden 5 in situ-Permeabilitätsuntersuchungen an der Oberfläche des NW- und SE-Stoßes oberhalb des geplanten Halbdammes durchgeführt. Die Abbildung 20 zeigt die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit von der Einbauteufe mit Berücksichtigung des Offsets des Mittelwerts der maximalen Rautiefe von 14,5 mm.

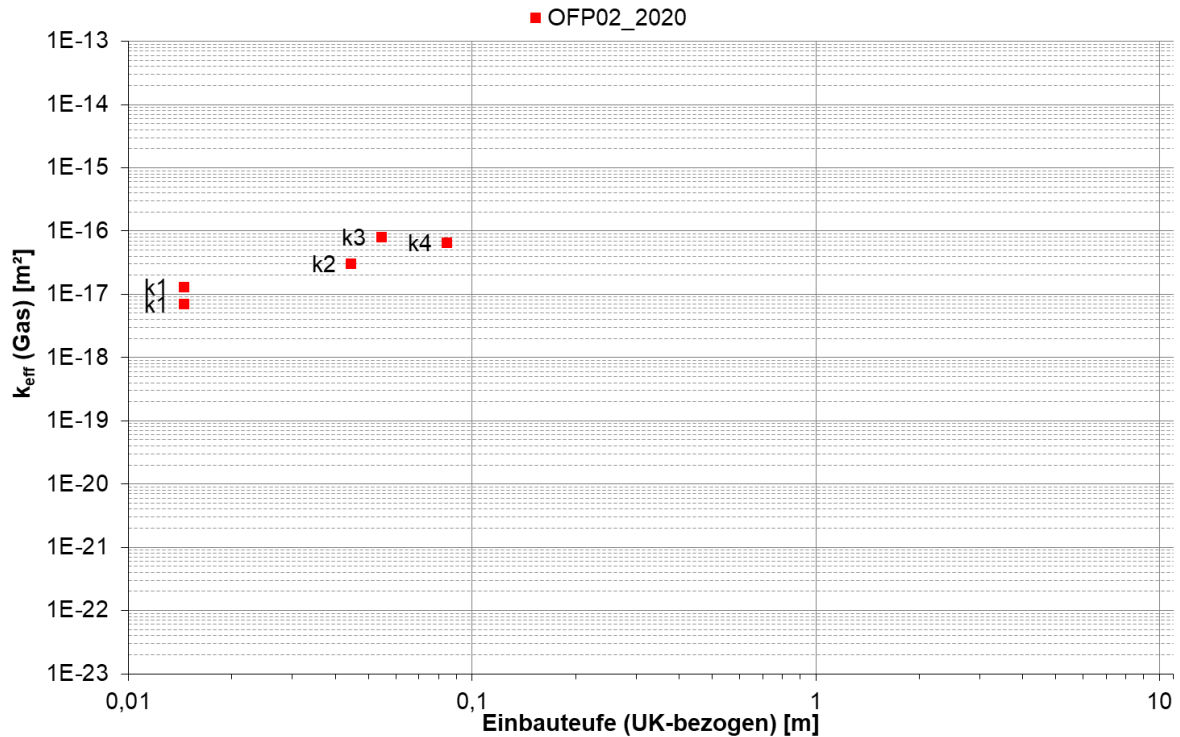


Abbildung 20: Effektive Gaspermeabilität der OFP-Untersuchungen in Abhängigkeit von der Einbauteufe

Die OFP-Untersuchungen zeigen, dass die identifizierten in situ-Permeabilitäten mit zunehmender Teufe von der geschliffenen Oberfläche zunehmen. Für diesen unerwarteten Verlauf für die konturnahe Auflockerungszone werden folgende Ursachen vermutet:

- Positionierung des OFP auf dem kompakten Teil einer sich entwickelnden Abschalung
- Reduzierung der konturnahen Permeabilität durch das Anpressen des Oberflächenpackers über die Testdauer. Der Anpressdruck für die Oberflächenpacker beträgt ca. 3,6 MPa
- Reduzierung der konturnahen Permeabilität aufgrund der Wechselwirkungen der Porenstruktur mit der Grubenatmosphäre im Zeitraum zwischen Auffahrung 2019 und Untersuchung im Zeitraum vom 24.02.2020 bis 03.06.2020

Für das Steinsalz ist für die Temperaturbedingungen in der Grube vor dem Einbau des Halbdammes (26,3 °C (23,2 – 35,0 °C; N=14.111), siehe Anlage 9.2, von einer Gleichgewichtsfeuchte von 75,4 % (20 °C) bis 75,2 % (30 °C) auszugehen [13]. Die Luftfeuchtigkeit am Standort liegt bis zum 03.06.2020 unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte. Es kommt also zur Trocknung des Gebirges. Jedoch kommt es möglicherweise für die Kapillardruckbedingungen im Steinsalz und die Luftfeuchte im Grubengebäude unabhängig von der Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte zu Absorption und Kondensationsprozessen von Wasser im Porenraum (Kapillarkondensation). Ergänzende Untersuchungen und Ergebnisse zu diesem Sachverhalt finden sich im Technischen Anhang.

### 5.7.2.2 Bohrloch- und Kombipackeruntersuchungen

Der Beurteilung der Ergebnisse der Kombipackeruntersuchungen ist folgende Erläuterung zur Vorgehensweise bei der Auswertung voranzustellen:

Für die Auswertung der Kombipackeruntersuchungen wurde in der ersten Untersuchung der Prüfraumbereich Teilbereich von 0,00 m bis 0,01 m numerisch in einem Modell ausgewertet

und eine Permeabilität von  $2,8E-17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0170\_G1) ermittelt. Die ermittelte Permeabilität von  $2,8E-17 \text{ m}^2$  im Prüfraumbereich ersten Teilbereich von 0,00 m bis 0,01 m wurde in jeder weiteren modellgestützten Auswertung der nachfolgenden Tests mit größeren Konturabstand unverändert beibehalten.

Das bedeutet, dass für die Auswertung des Prüfraumbereiches von 0,00 m bis 0,03 m, der untersuchte Bereich in zwei Teilbereich (1. Teilbereich und 2. Teilbereich) gegliedert ist.

Die Auswertung für den Prüfraumbereich von 0,00 m bis 0,03 m wird der Bereich in zwei Permeabilitätsbereiche unterteilt. Für den ersten Prüfraumbereich Teilbereich von 0,00 m bis 0,01 m wird die für den ersten Test ermittelte Permeabilität ( $k=2,8E-17 \text{ m}^2$ ) beibehalten. Das Permeabilitätsergebnis für den zweiten Prüfraumbereich Teilbereich von 0,01 m bis 0,03 m beträgt unter Berücksichtigung des ersten Prüfraumbereiches Teilbereiches  $1,1E-17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0150\_G1). Für jedes weitere Modell, welches die Prüfraumbereich Teilbereiche von 0,00 m bis 0,01 m (1. Teilbereich) bzw. 0,01 m bis 0,03 m (2. Teilbereich) untersucht, sind die ermittelte Permeabilität von  $2,8E-17 \text{ m}^2$  bzw.  $1,1E-17 \text{ m}^2$  konstant.

Für den Konturabstand von 0,00 m bis 0,18 m ergeben sich für den letzten mittels Kombipacker untersuchten Messpunkt (B09\_040\_0000\_G1) folgende Permeabilitäten aus insgesamt 4 untersuchten Teilbereichen:

- 1. Teilbereich: 0,00 m – 0,01 m:  $2,8E-17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0170\_G1)
- 2. Teilbereich: 0,01 m – 0,03 m:  $1,1E-17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0150\_G1)
- 3. Teilbereich: 0,03 m – 0,05 m:  $1,1E-17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0130\_G1)
- 4. Teilbereich: 0,05 m – 0,18 m:  $3,7E-19 \text{ m}^2$  (B09\_040\_0000\_G1)

An den Messpunkt B09\_040\_0000\_G1 schließt sich der Bohrlochpackertest am Messpunkt B09\_040\_0180\_G1 im Prüfraumbereich von 0,18 m bis 0,36 m an. Bei der numerischen Auswertung wird der Bereich von 0,00 m bis 0,18 m mit den ermittelten Permeabilitätswerten der Kombipackermessungen belegt. Für den Prüfraumbereich von 0,18 m bis 0,36 m wurde eine Permeabilität von  $3,7E-19 \text{ m}^2$  bestimmt. Auch diese ermittelte Permeabilität ist für jedes weitere Modell konstant. Die Auswertung der Prüfraumbereiche von 0,36 m bis 0,54 m und 0,54 m bis zum Bohrlochtieftsten erfolgt analog zur dargestellten Vorgehensweise.

Die Ergebnisse der Kombi- und Bohrlochpackeruntersuchungen sind für die Sohle in Abbildung 21 und für den Stoß in Abbildung 22 zusammengefasst. Die Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit vom Konturabstand mit Berücksichtigung des Offsets des Mittelwerts der maximalen Rautiefe von 14,5 mm.

Die für die Sohle ermittelte Permeabilität nimmt von  $2,8E 17 \text{ m}^2$  (B09\_040\_-0170\_G1) für das Testintervall k1 (Oberkante 0,0145 m hinter der Gebirgskontur) auf  $1,0E 22 \text{ m}^2$  (B09\_040\_0540\_INT\_G1) für das Testintervall k7 (Oberkante 0,5545 m hinter der Gebirgskontur) ab.

Die 2020 für den Stoß ermittelte Permeabilität nimmt von  $9,5E 18 \text{ m}^2$  (B03\_165\_-0170\_1G1) für das Testintervall k1 (Oberkante 0,0145 m hinter der Gebirgskontur) auf  $1,0E 22 \text{ m}^2$  (B03\_165\_0540\_INT\_1G2) für das Testintervall k7 (Oberkante 0,5545 m hinter der Gebirgskontur) ab.

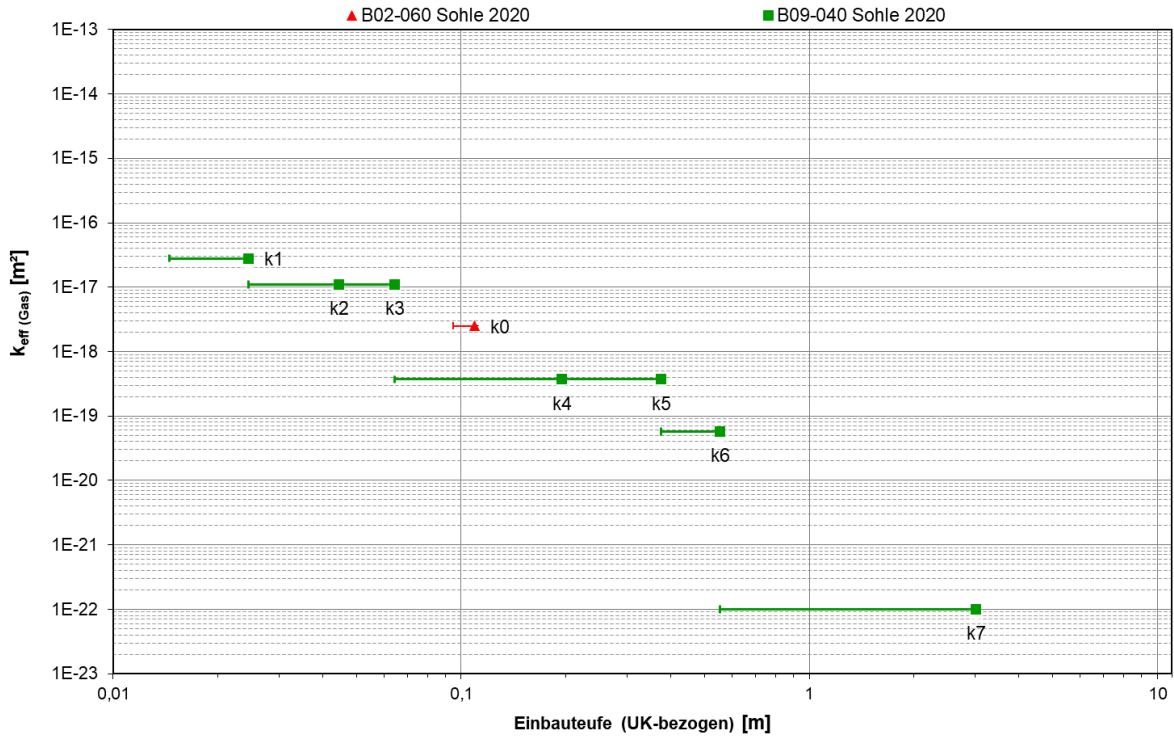


Abbildung 21: Effektive Gaspermeabilität in den Bohrungen B02-060 und B09-40 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt)

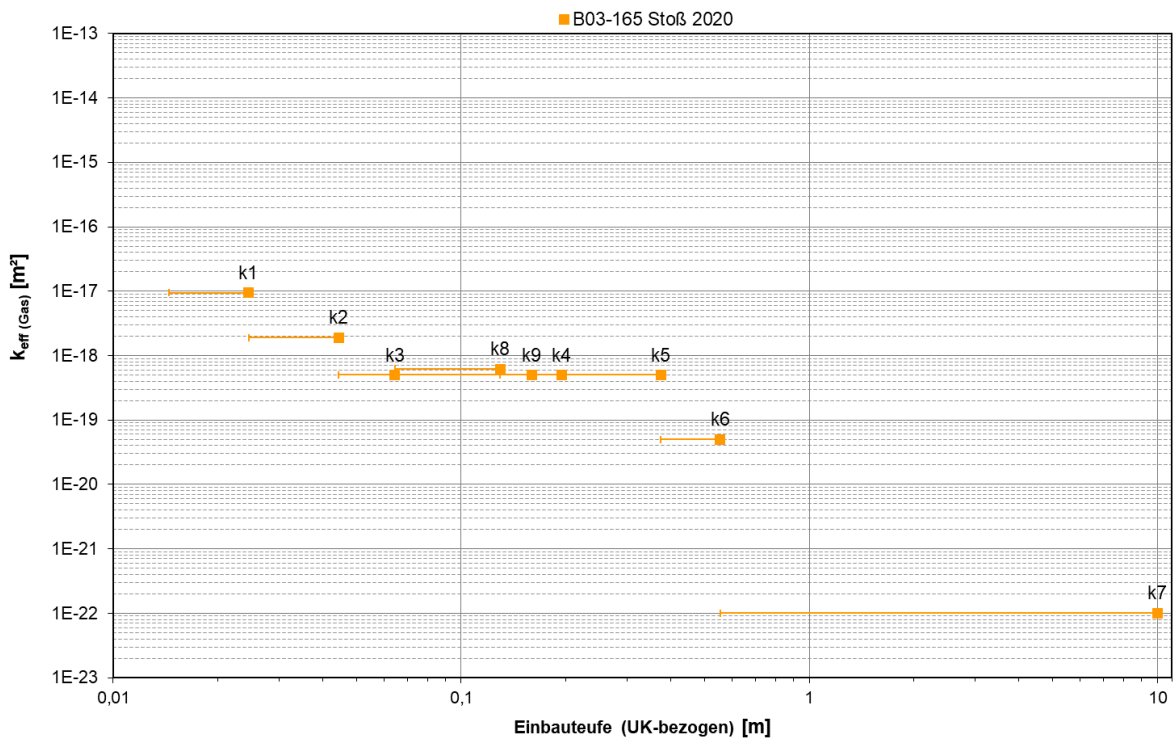


Abbildung 22: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B03-165 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt)

Die Beurteilung der ermittelten Gaspermeabilitäten erfordert die Kenntnis der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit und den Vergleich mit den Erfahrungswerten zum Primärlösungsgehalt am Standort. Im Rahmen der Qualitätssicherung der Permeabilitätsuntersuchungen erfolgte für die Probenbereiche der Bohrung B01-030 (Abbildung 14) die Ermittlung des Lösungsge-

haltes für den Standort. Auf Grundlage der Laborergebnisse der Untersuchungen an den Kernproben aus der Bohrung B01-030 kann von einer Flüssigkeitssättigung des Porenraums für das anstehende Steinsalz von  $0,027 \pm 0,026$  ( $0,006-0,084$ ;  $N=11$ ) ausgegangen werden (siehe Anlage 11.4). Unter Berücksichtigung der Kenntnisse zur Porengrößenverteilung und der Porosität wird der Einfluss der Porenraumsättigung auf die Permeabilitätsergebnisse als gering angesehen. Trotzdem sind die ermittelten Permeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten anzusehen, wobei die Abweichung von der absoluten Permeabilität als gering eingeschätzt wird.

### **5.7.3 Laboruntersuchungen – Untersuchungsprogramm und Ergebnisse Steinsalz**

An dem Kernmaterial der Bohrungen für die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurden im Labor der IBeWa strömungstechnische Parameter ermittelt.

Die Untersuchungen unterteilen sich in:

- die Ermittlung der Porenraumsättigung (Lösungsgehalt sowie Reindichte und Trockendichte zur Berechnung der Porosität) des untersuchten Gebirges im Rahmen der Qualitätssicherung der in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen,
- die Ermittlung der Gaspermeabilität,
- die Porengrößenverteilungen und Porosität im Ergebnis der Computertomographie sowie
- die Porengrößenverteilung und Porosität im Ergebnis der Quecksilberporosimetrie.

Die Versuchsmethodik der durchgeführten Laboruntersuchungen ist in Anlage 2.2 ausgeführt. Zur Auswertung ist vorab anzumerken, dass die Anzahl der Einzelwerte für die verschiedenen Bestimmungen nicht immer übereinstimmt. Das liegt u. a. daran, dass beispielsweise für Lösungsgehalte in Einzelfällen und unter bestimmten Voraussetzungen ein Mittelwert Verwendung findet, wenn z.B. für eine Probe eine Dichte vorliegt, aber kein Lösungsgehalt ermittelt wurde. Berechnet wurden insgesamt für 13 Proben die Sättigung, 2 Ergebnisse liegen rechnerisch im negativen Bereich und wurden nicht mit aufgeführt.

Die Untersuchungen und Ergebnisse zur Porosität und Porengrößenverteilung durch Computertomographie sind detailliert im Technischen Anhang beschrieben.

Üblicherweise wird die Porengrößenverteilung durch Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Jedoch werden damit große Poren nicht erfasst, womit Information über möglicherweise transportwirksamen Porenraum verloren geht. Weiterhin werden geschlossene Poren durch Quecksilberdruckporosimetrie ebenfalls nicht erfasst. Deshalb wurde über die Quecksilberporosimetrie hinaus ergänzend CT eingesetzt, um den Porenraum des Gebirges zu charakterisieren. Weiterhin wurde versucht, durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse beider Verfahren (MIP/CT) am selben Prüfkörper, die Interpretation der Ergebnisse der beiden Verfahren gegebenenfalls zu optimieren, vgl. Anlage 11.4. Für diese ersten vergleichenden Untersuchungen wurden Steinsalzwürfel mit einer Kantenlänge von ca. 20 mm präpariert und in einem ersten Schritt durch das HZDR mit Hinblick auf Porosität und Porenradienverteilung mittels CT untersucht.

Im Anschluss an die CT – Untersuchungen wurden die Probenkörper zusätzlich durch Quecksilberporosimetrie hinsichtlich Porengrößenverteilung charakterisiert. Diese Untersuchungsreihenfolge ist deshalb notwendig, um auszuschließen, dass die Quecksilberporosimetrie den Porenraum beeinflusst hat. Detaillierte Ausführungen zu diesen ergänzenden Untersuchungen finden sich im Technischen Anhang.

### 5.7.3.1 Lösungsgehalt

Die Methodik zur Ermittlung des Lösungsgehaltes ist in Anlage 2.2.1 erläutert. Im Ergebnis der Trocknung der Proben aus dem Gebirge wurde ein Lösungsgehalt unter der Annahme berechnet, dass es sich bei der Porenlösung um eine NaCl-gesättigte Porenlösung mit einer Dichte von  $1,20 \text{ g/cm}^3$  und der Gesamtmineralisation von  $0,32 \text{ g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ) handelt. An 5 Proben wurde im Ergebnis der  $60^\circ\text{C}$  Ofentrocknung ein Lösungsgehalt von  $<0,001$  ermittelt. Bei einer Trocknung von  $105^\circ\text{C}$  beträgt der Lösungsgehalt berechnet an 9 Proben  $<0,001$  ( $N=9$ ), siehe Anlage 11.1.

### 5.7.3.2 Reindichte

Die Methodik zur Ermittlung der Reindichte ist in Anlage 2.2.2 ausgeführt. Die Proben für die Reindichteermittlung wurden bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet.

Die Reindichte der  $60^\circ\text{C}$  getrockneten Proben liegt bei  $2,193 \pm 0,044 \text{ g/cm}^3$  ( $2,165$ - $2,308 \text{ g/cm}^3$ ;  $N=9$ ). An 5 Proben aus der  $105^\circ\text{C}$  Trocknung wurde im Mittel eine Reindichte von  $2,176 \pm 0,009 \text{ g/cm}^3$  ( $2,166$ - $2,187 \text{ g/cm}^3$ ;  $N=5$ ) bestimmt, siehe Anlage 11.2.1.

### 5.7.3.3 Trockendichte

Die Methodik zur Berechnung der Trockendichte ist in Anlage 2.2.2 ausgeführt.

Die Ergebnisse der Trockendichteberechnung für die Proben aus dem Gebirge (Steinsalz) sind in Anlage 11.2.2 aufgeführt und grafisch dargestellt. Die Trockendichte für das untersuchte Steinsalz im Ergebnis der Trocknung von  $60^\circ\text{C}$  beträgt im Mittel  $2,159 \pm 0,032 \text{ g/cm}^3$  ( $2,099$ - $2,215 \text{ g/cm}^3$ ;  $N=13$ ).

### 5.7.3.4 Porosität aus den Dichten ( $n_t$ )

Die Abhängigkeit der Dichten von der Trocknungstemperatur bestimmt auch die auf der Basis der Dichten berechnete totale Porosität.

Die ermittelten Werte für die totale Porosität sind in 0 aufgeführt und grafisch dargestellt. Die am Steinsalz ermittelten totalen Porositäten für eine Trocknung bei  $60^\circ\text{C}$  liegen im Mittel bei  $0,022 \pm 0,018$  ( $0,002$ - $0,064$ ;  $N=11$ ).

### 5.7.3.5 Sättigung

Auf der Basis der aus der Dichte ermittelten Porosität und des Lösungsgehaltes wurde die Porenraumsättigung ermittelt. Die ermittelte Sättigung ist in Anlage 11.4 aufgeführt und grafisch dargestellt. Die berechnete Sättigung für Proben aus der Trocknung bei  $60^\circ\text{C}$  beträgt  $0,027 \pm 0,026$  ( $0,006$ - $0,084$ ;  $N=11$ ). Die ermittelte Sättigung findet auch im Technischen Anhang für die Aussagen zum Kapillardruck Berücksichtigung.

### 5.7.3.6 Effektive Gaspermeabilitäten

In Vorbereitung der Herstellung von Probekörpern für weiterführende Untersuchungen an Kompositproben (siehe Technischer Anhang, Dissertation Bauermeister) wurden aus dem Gebirge 8 Kernproben gewonnen und im Labor die effektive Permeabilität für Gas ermittelt. In Abbildung 23 ist die an den Kernproben im Labor ermittelte effektive Permeabilität dargestellt.

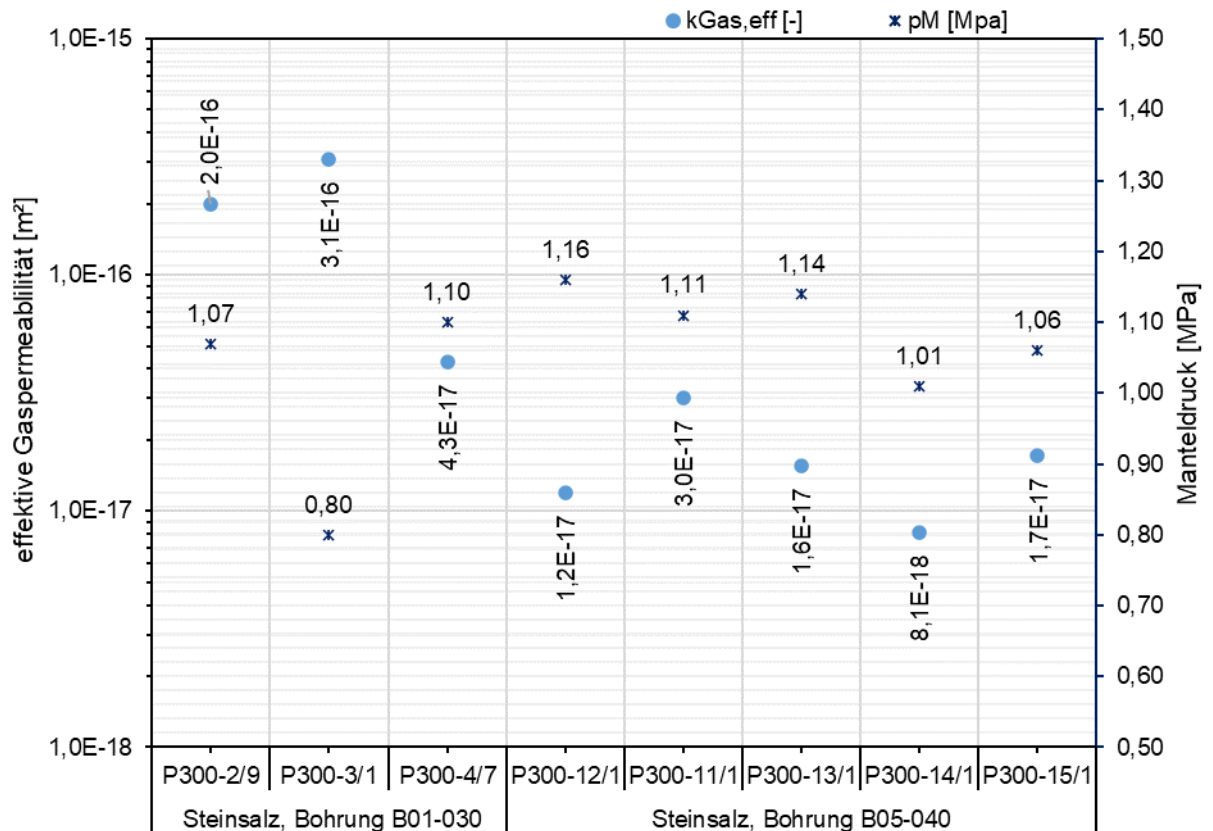


Abbildung 23: Effektive Permeabilität für Gas, ermittelt an Kernproben aus den Bohrungen in das Steinsalz mit Angabe der Einspannung während der Versuchsdauer

Die Ergebnisse der laborativen Permeabilitätsuntersuchungen an den Kernproben liegen in der Bandbreite von entspanntem bzw. geschädigtem Steinsalz der Auflockerungszone und sind daher plausibel. Sie sind jedoch nicht zwingend auf die in situ bestehende Permeabilitätsgegebenheiten übertragbar.

Deshalb erfolgt die Beurteilung der in situ bestehenden Permeabilitätsverteilung in Abhängigkeit vom Konturabstand ausschließlich anhand der in situ-Untersuchungen.

### 5.7.3.7 Porosität und Porengrößenverteilung aus CT

Für die Untersuchungen zur Porosität und zur Porengrößenverteilung mittels CT wurden die bereits erwähnten würfelförmigen Proben aus dem Kernmaterial der Erkundungsbohrungen (präpariert auf eine Kantenlänge von ca. 20 mm) genutzt. Die Bestimmung der Porenstrukturen mittels CT erfolgte anhand des Grauwertes, siehe Technischer Anhang.

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

Die detaillierten Beschreibungen der Vorgehensweise und der Ergebnisse werden im Technischen Anhang gegeben.

### 5.7.3.8 Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP)

Für die Untersuchungen zur Porengrößenverteilung über Quecksilberporosimetrie (Mercury intrusion porosimetry – MIP) wurden die bereits erwähnten würfelförmige Proben aus dem Kernmaterial der Erkundungsbohrungen mit einer Kantenlänge von ca. 20 mm nach den CT-Untersuchungen genutzt. Die für das Steinsalz angewendete Versuchsmethodik der MIP ermöglicht die Ermittlung von Porendurchmessern bis ca. 900  $\mu\text{m}$ . In Anlage 2.2.5 ist das Verfahren der Quecksilberporosimetrie beschrieben.

Die an 4 Steinsalzproben ermittelte mit Quecksilber injizierbare Porosität liegt im Bereich von 0,005 bis 0,010 (N=4), siehe Abbildung 24. Die den jeweiligen Porenklassen zugeordnete Porosität ist Anlage 11.5.1 dargestellt. Diese Ergebnisse wurden in die Ergebnisse der CT-Untersuchungen eingeordnet.

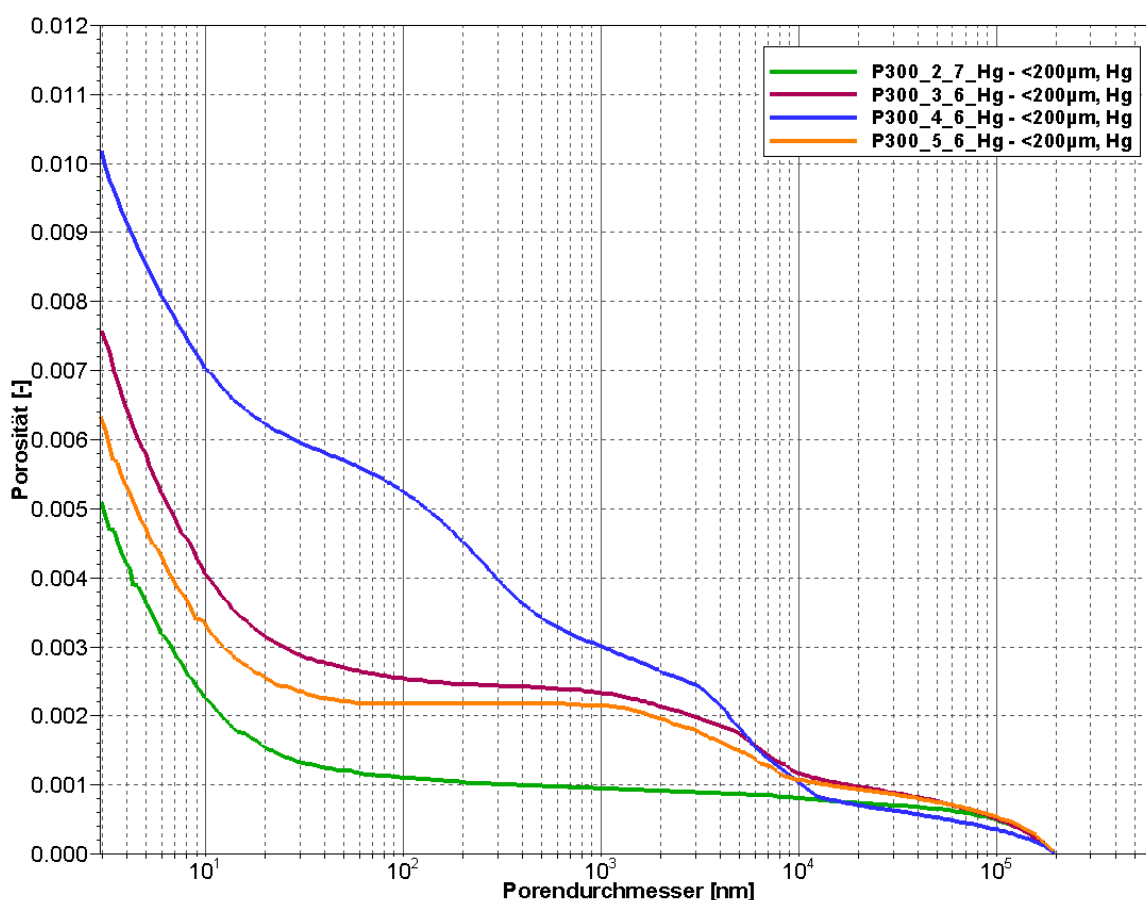


Abbildung 24: An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200  $\mu\text{m}$

Die Auswertung der CT-Aufnahmen der Steinsalzproben hat gezeigt, dass eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit der Prüfkörper für die Ermittlung der Porengrößenverteilung notwendig ist. Im Ergebnis der Berücksichtigung der Rauheit kann gezeigt werden, dass, abweichend von den Ergebnissen der MIP, keine Poren mit einem Durchmesser >200  $\mu\text{m}$  vorhanden sind.

Unter Berücksichtigung dieses Ergebnisses wurden auch die aus der MIP ermittelten Porengrößenverteilungen nochmals geprüft. Die Darstellung der ursprünglichen Porengrößenverteilungen in Anlage 11.5.1, Abbildung 135 (gestrichelte Kurven) zeigt für den Bereich der Porengrößen  $>200\ \mu\text{m}$  einen zum Teil sehr steilen Anstieg des Porenvolumenanteils. Dieser ungewöhnliche Verlauf und die Interpretationen der CT-Aufnahmen führen zu der Vermutung, dass auch für die Interpretation der MIP-Ergebnisse eine Berücksichtigung der Oberflächenrauheit der Probenkörper erforderlich ist. Entsprechend den Ergebnissen der CT-Auswertung wurde der Volumenanteil der Poren  $>200\ \mu\text{m}$  auch aus dem Ergebnis der Quecksilberporosimetrie herausgerechnet. Die entsprechend korrigierten Porenvolumenanteile sind in ebenfalls in Abbildung 135 (durchgezogene Kurven) dargestellt. Es zeigt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung der Porengrößenverteilungen für die 4 Prüfkörper. Im Technischen Anhang wird detaillierter auf diese Themenstellung eingegangen.

## 6 Bauwerkserrichtung

Im Vorfeld der Bauwerkserrichtung wurde eine Vielzahl von Vorversuchen und begleitenden Untersuchungen durchgeführt. Diese betrafen:

- die Entwicklung und Optimierung des Messsystems für die gegenständliche Funktionsprüfung,
- das Überbohren der temporären Verrohrung des Messsystems,
- die Wahl der Injektionsschläuche und der Injektionsmittel,
- die Vorversuche zu den Eigenschaften der Injektionsmittel,
- die Auswahl der Baustoffkomponenten gemäß Verfügbarkeit und Qualität<sup>2</sup>,
- das Anpassen der A1-Basisrezeptur im Ergebnis von Vorversuchen im Labor,
- das Anpassen der A1-Basisrezeptur an die verfügbare Misch- und Fördertechnik in situ im Technikumsmaßstab einschließlich Test der Armierungsmatten,
- die Herstellung von Kompositproben im Labor (Laborkomposit) und Gewinnung von Kompositproben aus den Technikumsversuchen (Technikumskomposit) und aus dem Halbdamm sowie Testung der Kompositproben<sup>3</sup>,
- die Untersuchung der Kompositproben,
- die ergänzenden Untersuchungen zur Verbesserung des Kenntnisstandes zur Porosität und Porenradienverteilung der verwendeten Baustoffe mittels MIP und CT und zum Kapillardruck-Sättigungsverhalten.

Weiterhin erfolgten vorlaufend (Prognose) und baubegleitend (Kalibrierung) numerische Simulationen zur erhärtungsbedingten Temperaturentwicklung im Bauwerk und am Standort.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die oben genannten Vorversuche und ergänzenden Untersuchungen in einem Technischen Anhang zu diesem Bericht zusammengefasst, in denen die Untersuchungen beschrieben und die Ergebnisse dargestellt sind. In dieser Unterlage wird auf diese Untersuchungen nur kurz eingegangen, wenn Informationen gewonnen wurden, die zu Modifikationen der ursprünglichen Planungen führten.

Im Vorfeld der weiteren Ausführungen soll angemerkt werden, dass vor Betonage des Bauwerkes trotz der offenen Standzeit von etwa 2 Jahren kein Nachschnitt der Streckenkontur erfolgte. Dieser Verzicht begründet sich aus dem Projektziel auch Injektionsverfahren mit dem gegenständlich zu testen. Im Falle sorgfältig nachgeschnittener Streckenkonturen ist bei einem MgO-Baustoff aus der A1-Familie, wie bei der für den Halbdamm verwendeten modifizierten A1-Rezeptur, davon auszugehen, dass eine Injektion aufgrund hoher Dichtigkeit nicht mehr durchgeführt werden kann.

Im Folgenden ist die Installation der Messausrüstung und der Einbau des MgO-Betons beschrieben sowie die baubegleitenden Qualitätssicherungsmaßnahmen. Auch sind Beobachtungen während Herstellung des Baukörpers aufgeführt. Abschließend ist der hergestellte Betonkörper beschrieben. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf die für den Halbdamm tatsächlich eingesetzte Messausrüstung und deren Installation sowie das weitere Equipment. Auch werden nur die für die Baustoffherstellung verwendeten Baustoffkomponenten angegeben und die für die Betonage modifizierte A1-Rezeptur, die von der ursprünglichen A1-Basisrezeptur leicht abweicht.

---

<sup>2</sup> Aufgrund der durch die Corona-Pandemie bedingten Lieferkettenprobleme stellte die Beschaffung des MgO eine besondere Herausforderung dar. Im Technischen Anhang finden sich detailliertere Informationen zu der MgO-Auswahl.

<sup>3</sup> siehe Dissertation Julius Bauermeister "Untersuchung der Scherfestigkeit an Kompositproben aus Sorelbeton und Steinsalz"

## 6.1 Installation der Messausrüstung

Im Zeitraum vom 16.12.2020 bis 25.02.2021 erfolgte die Installation der Messtechnik. Einen Gesamtüberblick über im Bauwerk installierte, wesentliche Einbauten für das Messsystem zur gegenständlichen Funktionsbewertung der Kontaktzone sowie zur Injektion der Kontaktzone geben die Zeichnungen in Anlage 3. Auch die Bezeichnungen sowie Angaben zu Abmessungen und Abständen finden sich dort.

Die Montage wird im Folgenden erläutert.

### 6.1.1 Einbau der Schalung und der Montagebühne

Der Einbau der Schalung an der Stirnfläche und der nachstehend beschriebenen Montagebühne erfolgte durch die TS-Bau GmbH.

Die Montagebühne diente der Befahrbarkeit des Bereiches oberhalb des Bauwerkes vor der Betonage. Darüber hinaus wurde die Bühne als Installationshilfe für verschiedene Messeinbauten genutzt. Die Bühne erstreckte sich über die gesamte Länge des Bauwerkes. Die Bühne wurde mit Hilfe von Querträgern (Kantholz 12 cm x 12 cm), die im Abstand von 1 m auf Kappschuhen lagern, in den seitlichen Stößen verankert (Abbildung 25).

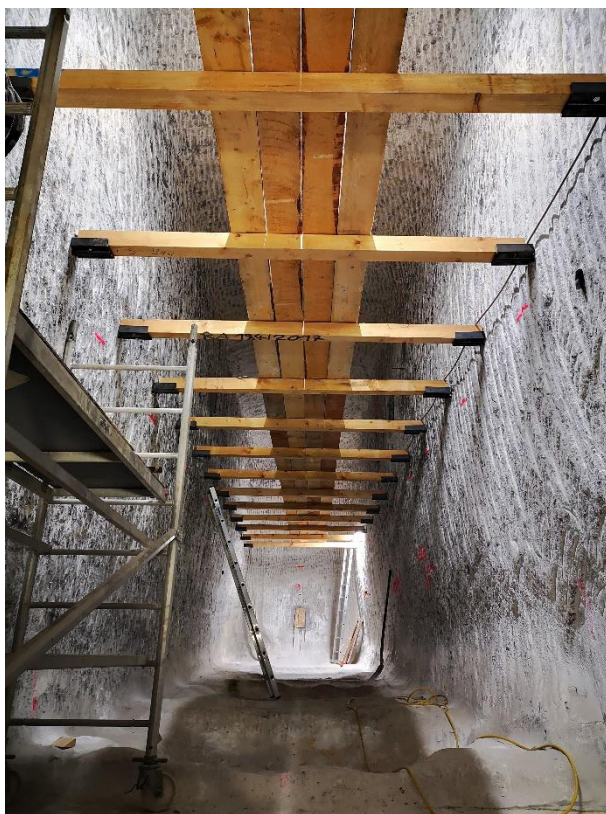


Abbildung 25: Montagebühne

Zum Bau der Schalung wurden vier Schalungsträger aus I-Trägern quer in der Strecke eingebaut. Die I-Träger wurden in die Streckenstöße einbetoniert (Abbildung 26). Anschließend wurde die eigentliche Holzschalung an die Träger montiert. Die Außenkanten der Schaltafeln wurden möglichst genau an die Streckenkantur angepasst. Ein Mannloch für einen sicheren Zugang in die Strecke bei der Installation der Einbauten wurde freigelassen (Abbildung 27). Die Abdichtung der Schalung erfolgte mit handelsüblichem Bauschaum und Silikon. Nach der Fertigstellung aller Einbauten im Bauwerksbereich wurde das Mannloch verschlossen und abgedichtet.



Abbildung 26: Schalungsträger

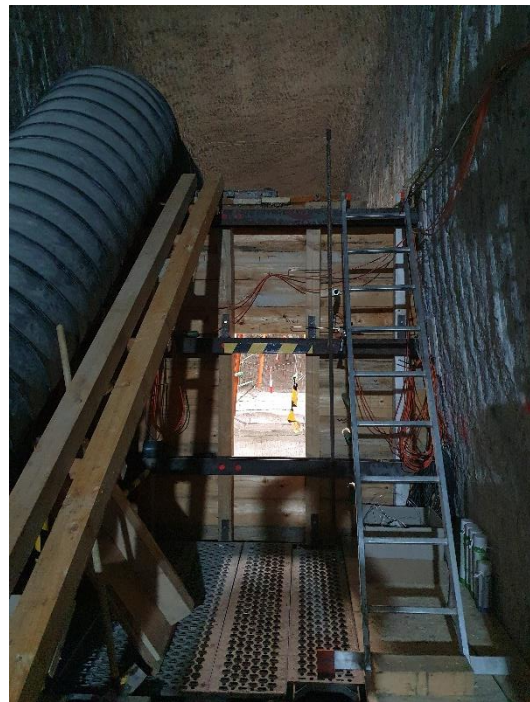


Abbildung 27: Holzschalung mit Mannloch

### 6.1.2 Einbau der kabellosen Sensorik (KLS)

Zur Messung der Kontaktdrücke zwischen dem Steinsalzgebirge und dem MgO-Baustoff wurden im Bereich der Sohle (KLS-01), am SE-Stoß (KLS-02) und am hinteren Stoß (KLS-03) der Versuchsstrecke Plattendruckaufnehmer installiert (Abbildung 28). In den kabellosen Sensoren ist ein digitaler I<sup>2</sup>C-Drucksensor installiert, der auch einen Temperatursensor enthält und ein digitales Temperatursignal zur Verfügung stellt. Auf Grund der Lage des Drucksensors innerhalb der Sensorkörper ist das gewonnene Temperatursignal von der thermischen Leitfähigkeit und thermischen Trägheit des Sendergehäuses abhängig. Im Ergebnis der Positionierung der Sensoren sind die gemessenen Temperaturen repräsentativ für den kontaktnahen Bereich des Steinsalzgebirges.



Abbildung 28: Plattendruckaufnehmer (rechts) mit kabelloser Datenübertragungseinheit (KLS), die Lage des Temperatursensors ist rot markiert

Zum Empfang und zur Speicherung der Messdaten wurden die Empfangsstationen vor dem Bauwerk am NW-Stoß montiert und mit dem Stromnetz sowie einer USV (Abbildung 29) verbunden. Das Auslesen bzw. Abholen der gespeicherten Messdaten aus den Empfangsstationen erfolgt über eine Bluetooth-Verbindung zu einem Notebook.

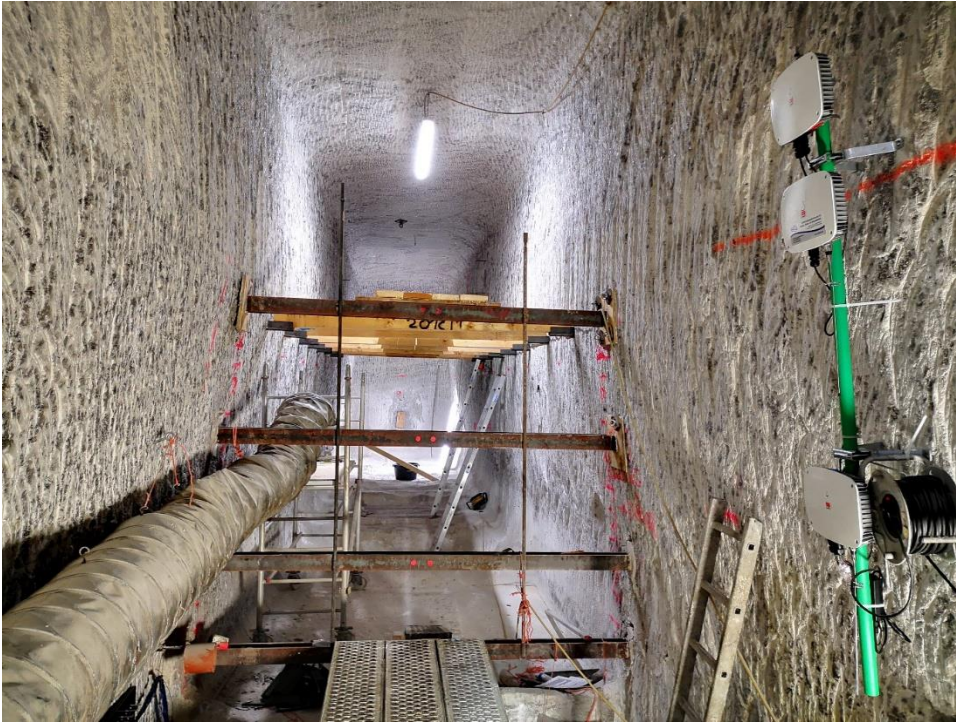


Abbildung 29: Empfangsstationen KLS (rechts am Stoß montiert)

Auch bei nicht aktivierter Empfangsstation können bis zu 7000 Datenpakete im Sender gespeichert werden. Durch eine temporäre Aktivierung der Empfangsstationen können die Sender zu einem der Messzeitpunkte mit den Empfangsstationen in Kontakt kommen, woraufhin die gespeicherten Daten übertragen werden. Durch diese Konfiguration können die Sender für mehrere Jahre autark Daten aufnehmen, wobei die Übertragung der Daten erst bei einer erfolgreichen Kontaktaufnahme mit einer Empfangsstation erfolgt.

Zur Installation der KLS wurden an den vorgesehenen Positionen Bohrungen mit einem Durchmesser von 70 mm gestoßen. In diese Bohrungen wurde die Datenübertragungseinheit der KLS eingesetzt (Abbildung 30). Für die optimale Lagerung der Plattendruckaufnehmer wurde zuvor die Kontur um die Bohrung herum glattgeschliffen. Um die Verbindungsleitung zwischen Plattendruckaufnehmer und Übertragungseinheit geschützt und lagestabil zu verlegen, wurde ein Schlitz in den oberen Bohrlochmund geschnitten (Abbildung 32). Nach der Positionierung des KLS in der Bohrung und des Plattendruckaufnehmers an der Kontur wurde der geschliffene Bereich mit einer Schalung versehen und der gesamte Hohlraum hinter der Schalung mit 2K-Epoxidharz verfüllt. Nach Abbinden des Harzes wurde die Schalung entfernt und der Epoxidharzverguss mit dem Winkelschleifer nachbearbeitet (Abbildung 32). Die Bettung der Plattendruckaufnehmer in Epoxidharz sorgt für eine dämpfungsarme/steife Anbindung des Druckaufnehmers an die Gebirgskontur (Abbildung 33).

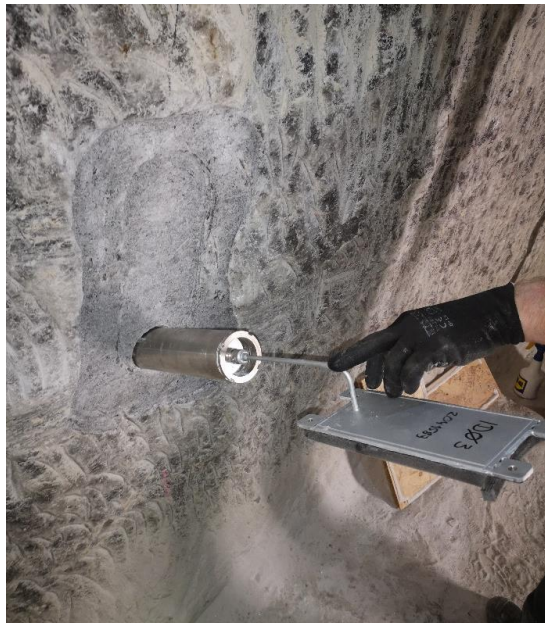


Abbildung 30: KLS-Einbaubereich nach dem Schleifen



Abbildung 31: KLS-Druckaufnehmer vor dem Einbau der Vergusschalung



Abbildung 32: Freigelegter Druckaufnehmer nach Verguss und Bearbeitung

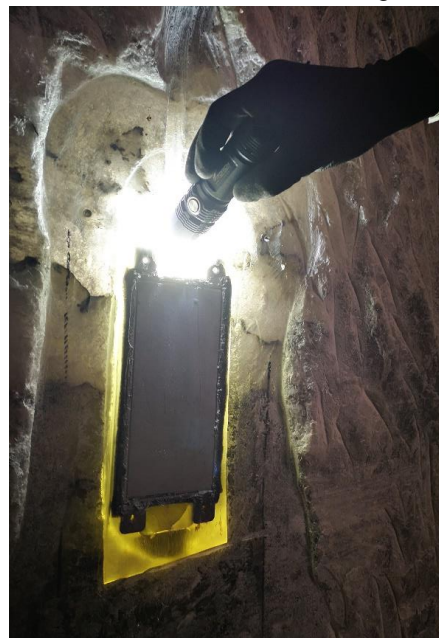


Abbildung 33: Hinterfülltes Druckkissen

Abbildung 34 zeigt beispielhaft die eingebauten Sensoren KLS-01 in der Sohle und KLS-02 im Stoß. Die Druckaufnehmer in den Stößen hatten nach dem Einbau, bedingt durch den Konturverlauf, eine Neigung von  $6^\circ$  bzw.  $19^\circ$  bezogen auf die Vertikale (Abbildung 35 und Abbildung 36).



Abbildung 34: KLS-01 auf der Sohle und KLS-02 am SE-Stoß zwischen den vertikalen Injektionsringen

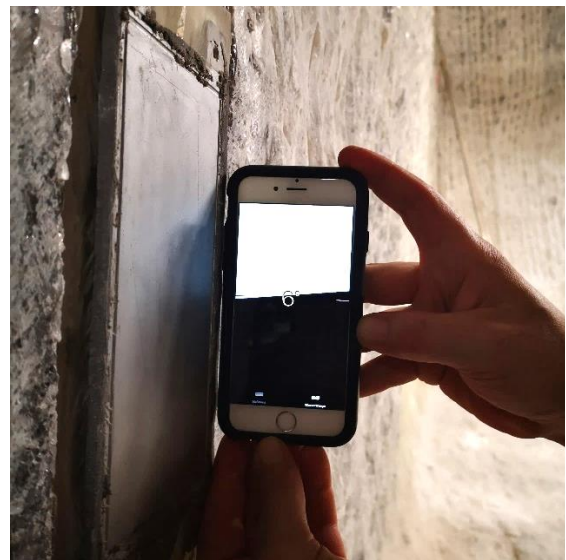


Abbildung 35: 6° Neigung des KLS-02 am SE-Stoß

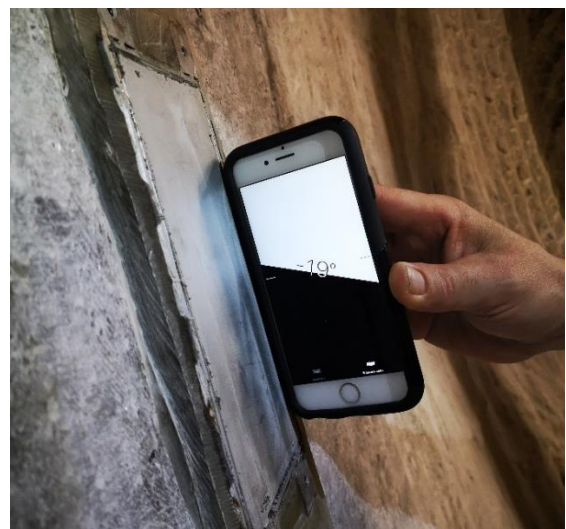


Abbildung 36: 19° Neigung des KLS-03 am hinteren Stoß

### 6.1.3 Einbau der Injektionsschläuche

Zur Installation der ausgewählten Injektionsschläuche Typ „Predimax® 11/19“ der Firma BPA (Anlage 4) wurde zunächst die geplante Bauwerksoberkante im Bauwerksbereich eingemessen und umlaufend an den Stößen markiert. Diese Markierung und die Innenseite der Schalung bildeten im Weiteren die Bezugsebenen für die Positionierung der Injektionsschläuche und der Ringkammern.

Vor dem Anbringen jedes Injektionsringes mussten größere Unebenheiten an der Gebirgskontur durch Abspitzen mit einem Meißel entfernt werden. Die Anordnung der Befestigungsschellen erfolgte, angepasst an die Gegebenheiten der Kontur, in möglichst kurzen Abständen. Durch diese Maßnahmen konnte eine enge Anbindung der Injektionsschläuche an das Gebirge realisiert werden (Abbildung 37).

Die Klemmschellen der Injektionsschläuche wurden mit 5 mm Nageldübeln im Gebirge befestigt.



Abbildung 37: Befestigung der Injektionsleitungen am NW-Stoß

Zu Beginn erfolgte die Montage der beiden horizontalen Injektionsleitungen (Abbildung 38). Die Anbindung dieser Schläuche sollte von der Stirnseite des Bauwerkes erfolgen. Daher wurden diese mit Nagelpackern an der Innenseite der Schalung befestigt (Abbildung 39).

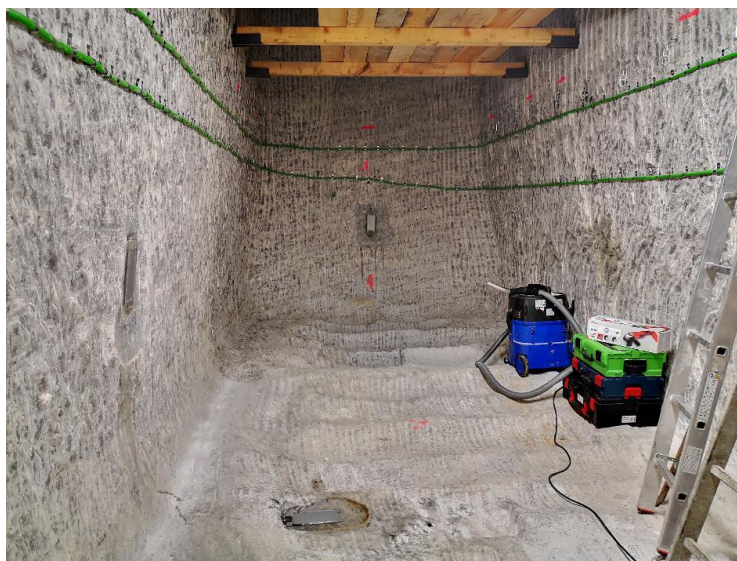


Abbildung 38: Horizontale Injektionsleitungen



Abbildung 39: Anschluss der horizontalen Injektionsleitungen an der Schaltafel

Die neun radial umlaufenden Injektionsleitungen wurden anschließend, von hinten beginnend, eingebaut (Abbildung 40). Die Anbindung dieser vertikalen Injektionsringe sollte von der Bauwerksoberfläche erfolgen. Dazu wurden die Enden der Injektionsringe mit Nagelpackern versehen und mit Hilfe von Blechwinkeln und Holzzuschnitten auf dem Niveau der geplanten Bauwerksoberkante befestigt (Abbildung 41). Um später die Position der Nagelpacker bei einem eventuellen Überstauen der Holzbretter mit Baustoff wiederzufinden, wurden alle Befestigungspunkte mit langen Kabelbindern markiert. Durch diese Einbauvariante war ein leichtes Freilegen der Anschlusspunkte der Injektionsleitungen nach dem Betonieren des Bauwerks möglich.

Die Verbindung von Nagelpacker und Injektionsschlauch erfolgte mit einem Schlauchstück, welches durch Einstecken und anschließendes Fixieren mit einem übergeschobenen Schrumpfschlauch befestigt wurde (Abbildung 41).



Abbildung 40: Vertikale und horizontale Injektionsleitungen



Abbildung 41: Anschluss der vertikalen Injektionsleitungen

#### 6.1.4 Einbau der Ringkammern

Der Einbau der in den Vorversuchen erfolgreich getesteten Ringkammern wurde parallel zum Einbau der Injektionsringe durchgeführt. Dabei wurden die horizontalen Kammern vor dem Einbau der vertikalen Injektionsleitungen installiert (Abbildung 42). Die Gebirgskontur wurde vor dem Einbau der Kammern intensiv mit dem Meißel geglättet, um einen möglichst lückenlosen Kontakt des Gewebeschlauhes mit dem Gebirge zu gewährleisten.

Zum Einbau der horizontalen Kammern wurden die Anschlussstücke zunächst mit einer 6 mm Edelstahlleitung und Kugelventilen versehen und mit Druckluft auf ca. 2 bar vorgespannt. Anschließend wurden die Kammern mit Klemmschellen und 5 mm Nageldübeln am Stoß befestigt. Die Edelstahlleitung mit den Kugelventilen wurde nach oben aus dem Bauwerksbereich herausgeführt und an der Montagebühne fixiert (Abbildung 42).



Abbildung 42: Horizontale Ringkammer HK01 zwischen den horizontalen Injektionsleitungen

Für die Installation der drei vertikalen, radial umlaufenden Ringkammern war es zuerst erforderlich, zwei Befestigungsdrähte je Ringkammer diagonal so in der Strecke zu montieren, dass an diesen die Anschlussstücke in geplantem Winkel und Position befestigt werden konnten. Die Anschlussstücke wurden mit 6 mm Edelstahlleitung und Montagekugelventilen (Ventile dienen nur der Druckhaltung bei der Montage und verbleiben im Beton) versehen und mit Druckluft auf ca. 2 bar vorgespannt. Anschließend wurden diese provisorisch in der geplanten Position am Draht angeschlagen. Nach der umlaufenden Befestigung des Ringkammerschlauches mit Schellen und 5 mm Nageldübeln auf der geglätteten Gebirgskontur (Abbildung 43) wurden die freien Enden des Schlauches und die Anschlussstücke in der endgültigen Lage mit Kabelbindern am vorgespannten Befestigungsdraht fixiert (Abbildung 44). Abbildung 45 zeigt eine fertig montierte Ringkammer.



Abbildung 43: Kontakt der Ringkammer an der geglätteten Kontur

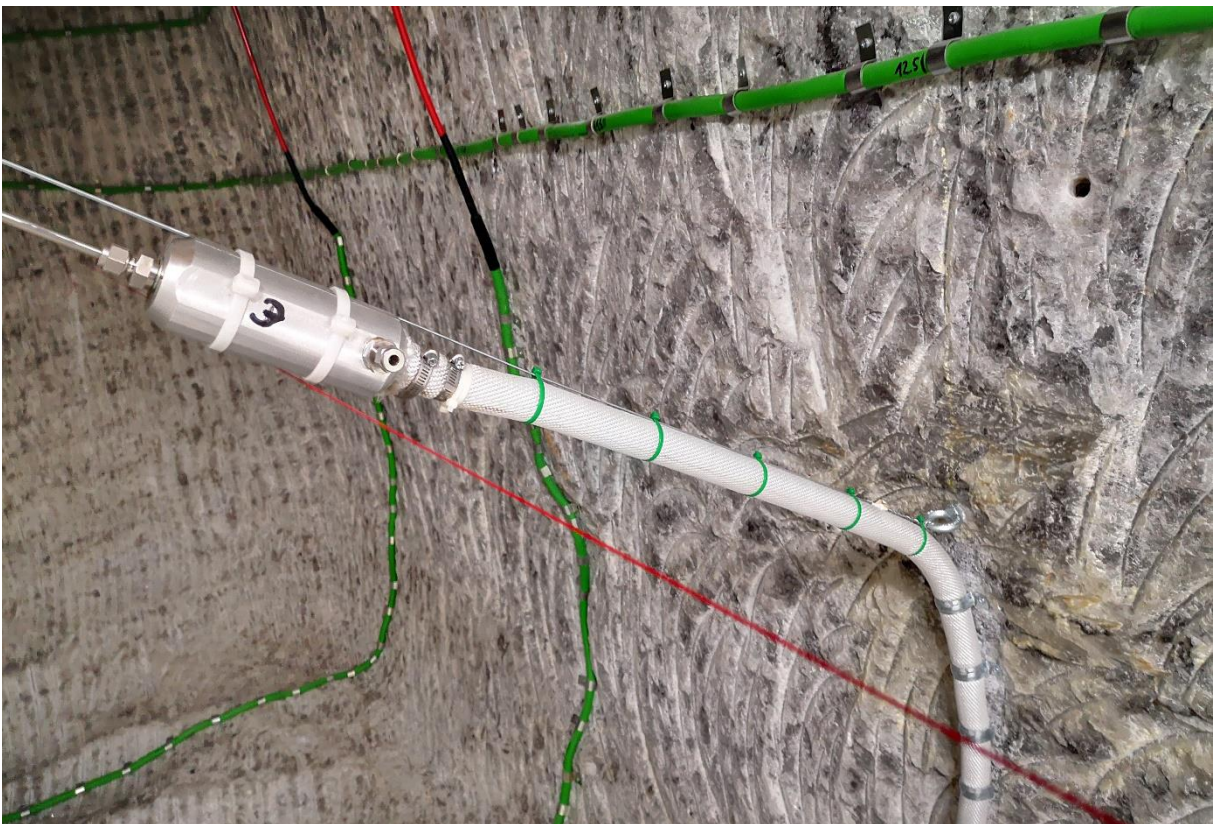


Abbildung 44: Befestigung des Anschlussstückes am gespannten Draht

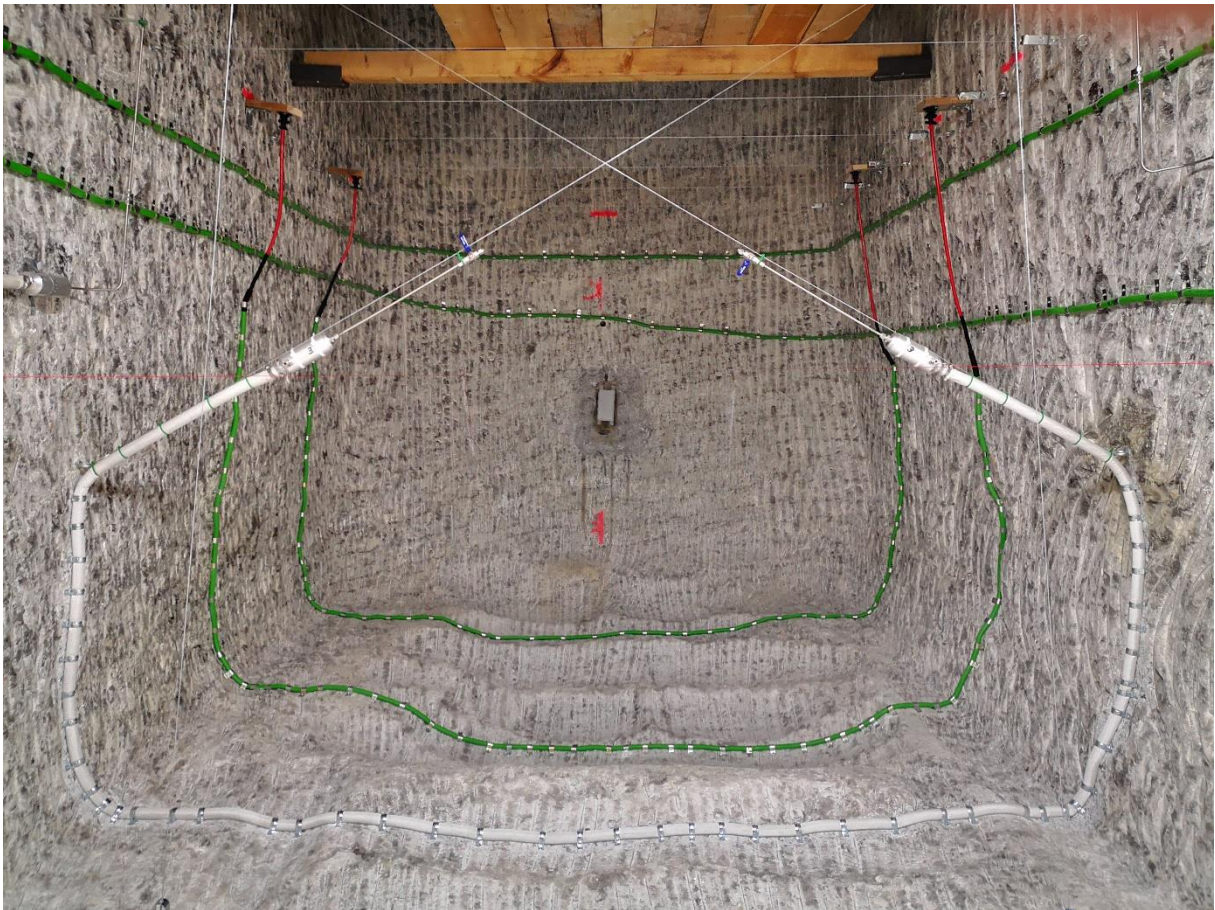


Abbildung 45: Fertig montierte vertikale Ringkammer RK03 (noch ohne Anschlussrohre)

### 6.1.5 Einbau der Anschlussrohre

Zur Kennzeichnung des Rohrverlaufs im Bauwerk wurde zunächst, ausgehend vom Anschlusspunkt an der Ringkammer, eine Schlagschnur gespannt. Danach wurden vertikal Drähte zwischen Sohle und Arbeitsbühne im Rohrverlauf gespannt, um die Rohre freischwebend im Bauwerk zu positionieren (Abbildung 46). Die Fixierung erfolgte anschließend mit Hilfe von Draht und Drahtklemmen an den vertikalen Spanndrähten (Abbildung 48).

Für die Anschlüsse nach außen wurden 6 mm Edelstahlleitungen verwendet. Diese wurden mit Adapterfittings noch innerhalb des Bauwerks an die Kunststoffrohre angeschlossen. Somit war später ein kompletter Einschluss der Kunststoffrohre im Baustoff gewährleistet (Abbildung 47). Für den Anschluss an die Ringkammern wurde in gleicher Weise verfahren (Abbildung 49). Die Montagekugelventile blieben dabei geschlossen, so dass die Vorspannung in den Packerschläuchen erhalten blieb. Die Zuleitungen wurden direkt nach der Montage mit Kugelventilen und Drucksensoren außerhalb der Schalung versehen. Danach wurden die Zuleitungen zu den Packerschläuchen mit ca. 2 bar Druckluft beaufschlagt. Dadurch konnten die Montageventile geöffnet werden und der Druck in den Schläuchen blieb erhalten. Die Handgriffe der Montageventile wurden entfernt, um ein versehentliches Schließen des Ventils während der weiteren Arbeiten bzw. der Betonage zu verhindern. Anschließend erfolgte ein Dichtestest der Anschlussrohre zu den Prüfkammern (siehe Kapitel 6.1.6).

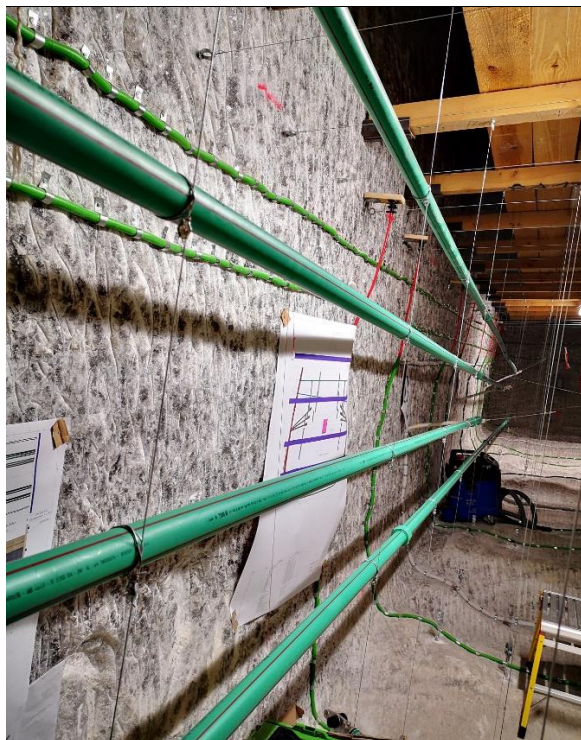


Abbildung 46: Befestigung der Kunststoffrohre im Bauwerksbereich

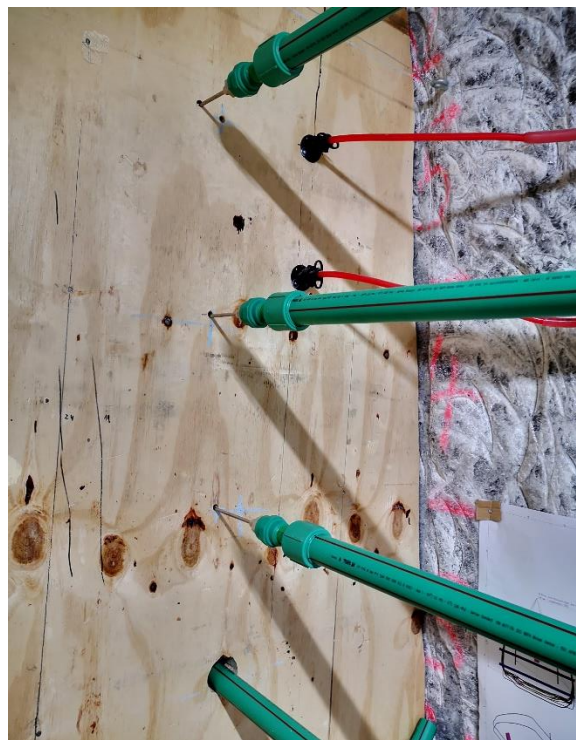


Abbildung 47: Rohranschlüsse an der Schalung



Abbildung 48: Rohrfixierung am Spanndraht (Rohr noch ungeschliffen)



Abbildung 49: Rohranschlüsse an den Ringkammern

Im Ergebnis der im Technischen Anhang beschriebenen Voruntersuchungen wurde die Oberfläche aller eingebauten Kunststoffrohre abschließend mit Sandpapier aufgeraut. Die Schleifbewegungen erfolgten in tangentialer Richtung.

### 6.1.6 Test der Anschlussrohre

Die Anschlussrohre der drei vertikalen Ringkammern wurden jeweils getestet, um die ausreichende Gasdichtheit der Kunststoffrohre nachzuweisen. Die drei Tests der Anschlussrohre der drei Kammern wurden nacheinander durchgeführt. Wie bereits erwähnt wurden die Anschlussrohre der jeweiligen Kammer zunächst mit Drucksensoren und Kugelventilen instrumentiert. Danach wurde der Packerschlauch der Kammer mit ca. 0,2 MPa Druckluft beaufschlagt, damit war der Prüfraum verschlossen und die beiden Anschlussleitungen konnten mit ca. 0,1 MPa Druckluft beaufschlagt werden. Die Druckganglinien wurden über den Verlauf eines Tages aufgezeichnet und anschließend dargestellt. Hierbei ist die Druckganglinie des linken Prüfraumanschlussrohres links in rot und die Druckganglinie des rechten Prüfraumanschlussrohres rechts in grün dargestellt. Die blaue Ganglinie zeigt den Druck im Packerschlauch der Ringkammer – siehe Abbildung 50 bis Abbildung 52.

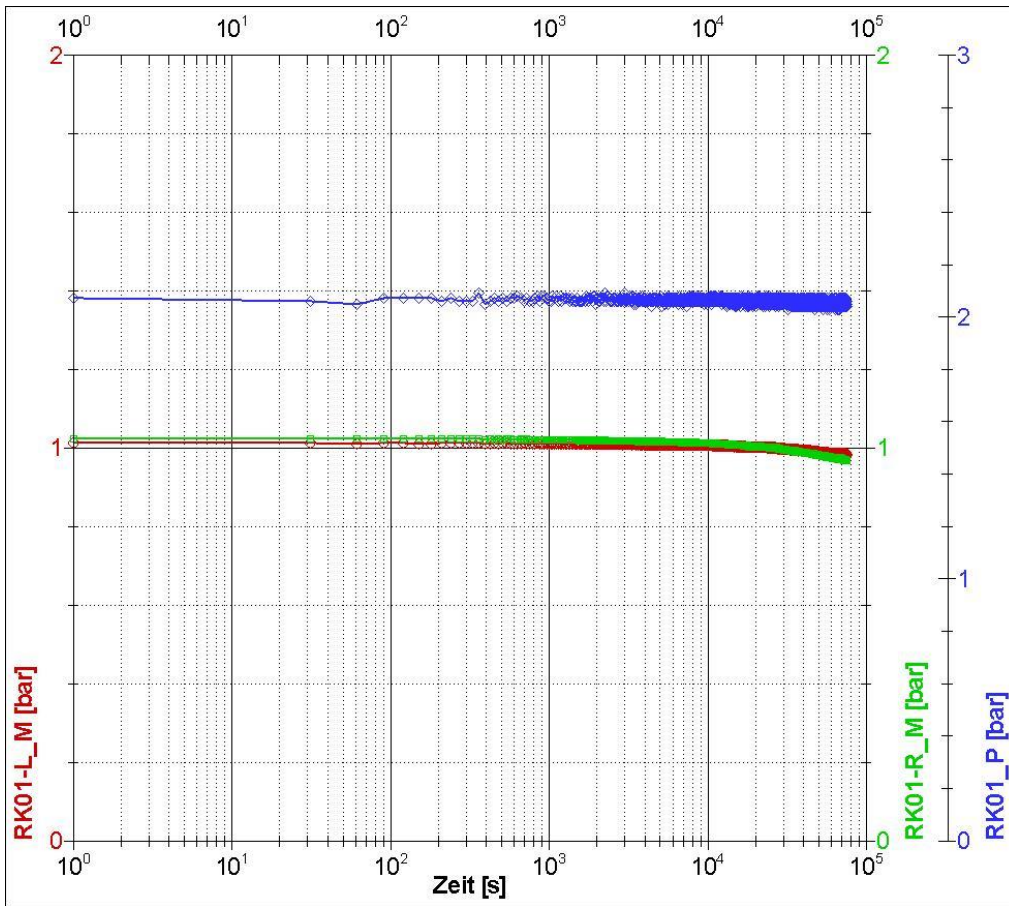


Abbildung 50: Dichtheitstest Anschlussrohre RK01

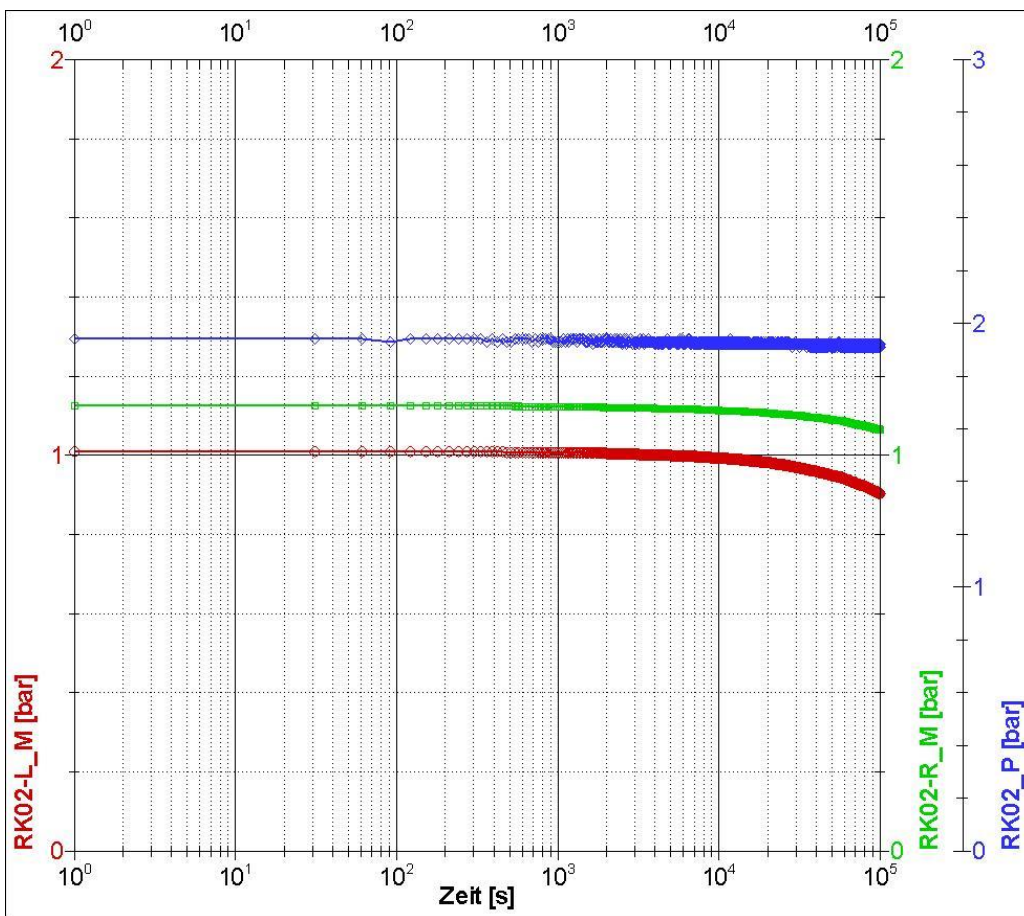


Abbildung 51: Dichtheitstest Anschlussrohre RK02

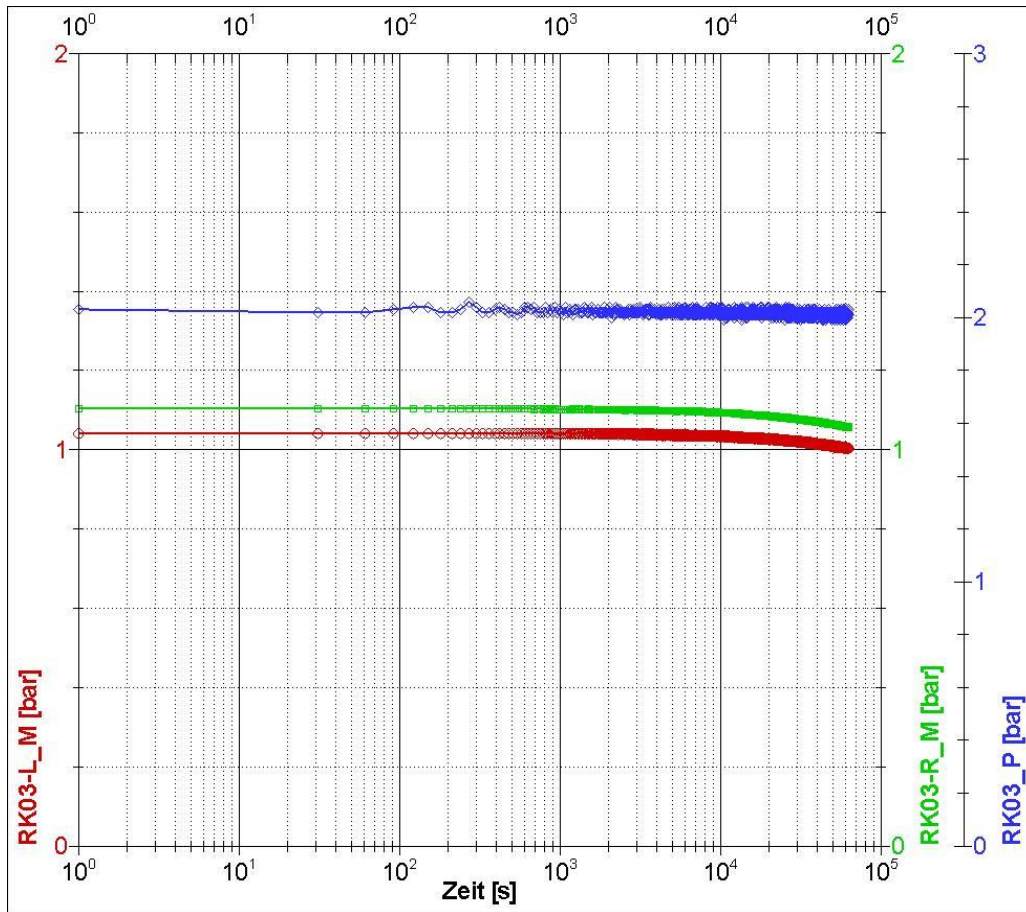


Abbildung 52: Dichtheitstest Anschlussrohre RK03

Der höchste Druckabfall war in der linken Anschlussleitung von RK02 mit rund 10,0 kPa über einen Zeitraum von mehr als 24 Stunden zu verzeichnen. In allen anderen Anschlussrohren waren die Druckabfälle geringer. Im Vergleich mit dem zu erwartenden Druckabfall zum Nachweis einer Permeabilität von  $k \sim 1E-18 \text{ m}^2$  (siehe im Vorgriff die Prognose in Abbildung 108) wurde dies als hinreichend dicht bewertet.

### 6.1.7 Installation der Temperatursensoren

Zur Erfassung der Temperaturentwicklung im Bauwerk während der Erhärtung des MgO-Baustoffs wurde in dem Halbdamm in Längsrichtung ca. mittig ein Messquerschnitt mit 8 Temperatursensoren installiert (Abbildung 53). Dieser Messquerschnitt liegt damit bei ca. 7,3 m Abstand zur Schalung und ist zwischen dem Injektionsring IS1685 und der Ringkammer RK02 positioniert Abbildung 54.

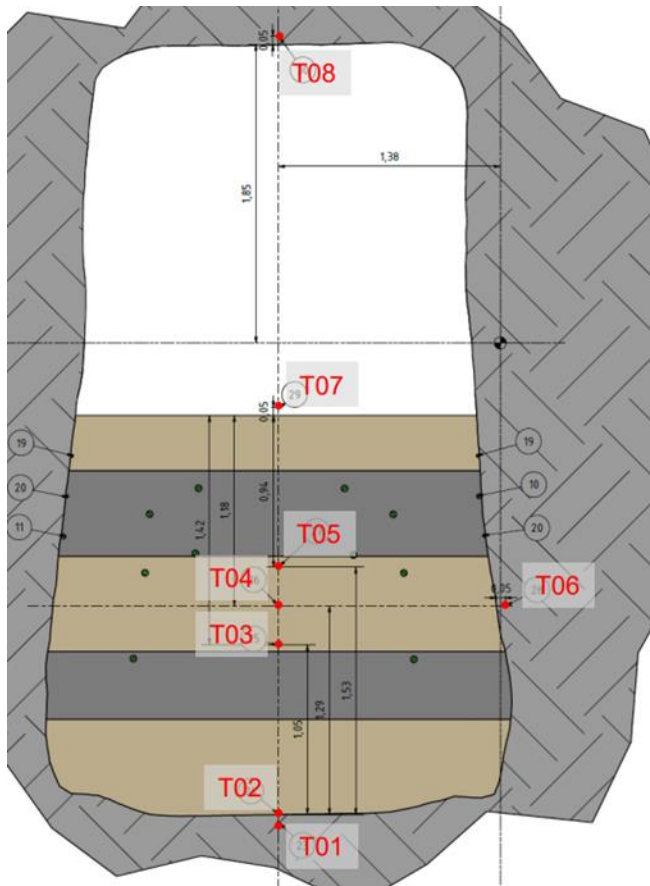


Abbildung 53: Lage der Sensoren im Messquerschnitt

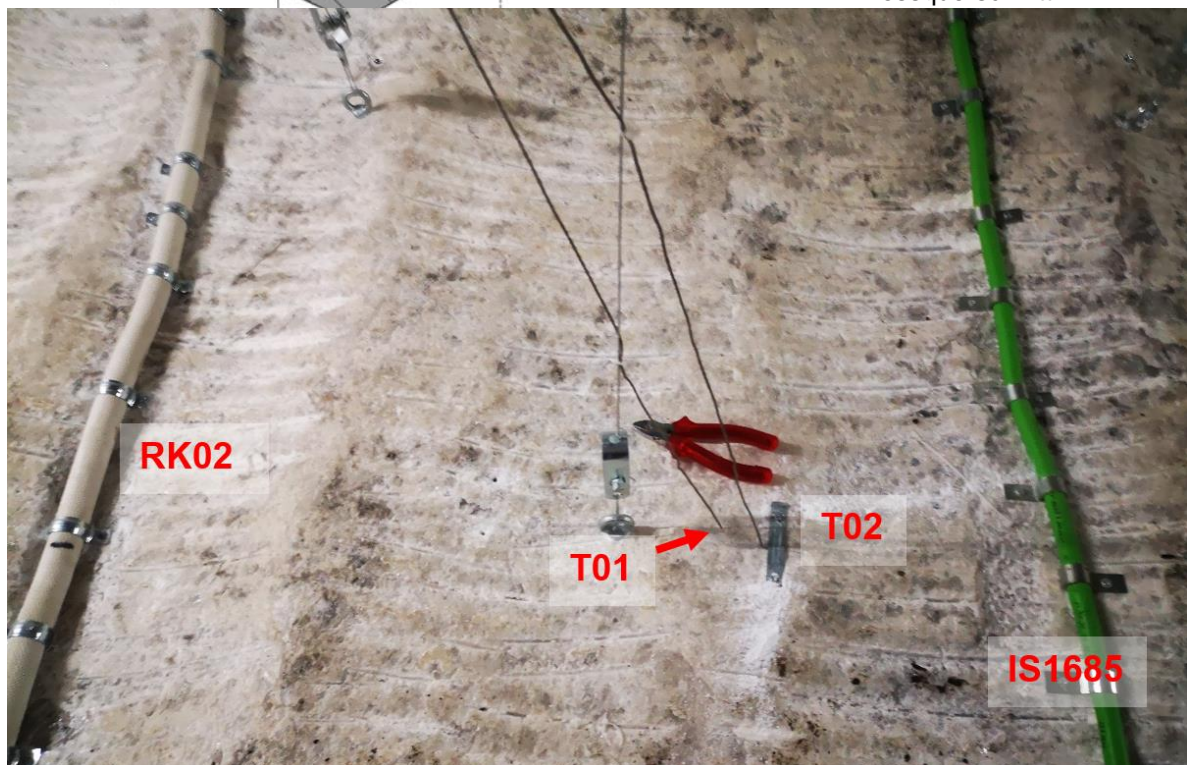


Abbildung 54: Lage der Temperatursensoren T01 und T02 auf der Sohle

Gemäß Abbildung 54 ist in der Messebene ein Spanndraht zwischen der Sohle und der Firste installiert worden, welcher zur Fixierung der Temperatursensoren im Innern des Baukörpers des zukünftigen Damms verwendet wurde. Gemäß Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 ist der Temperatursensor T01 in der Sohle installiert und liegt ca. 0,1 m neben dem Spanndraht bzw. der Messebene.



Abbildung 55: Einbau des Temperatursensors T01

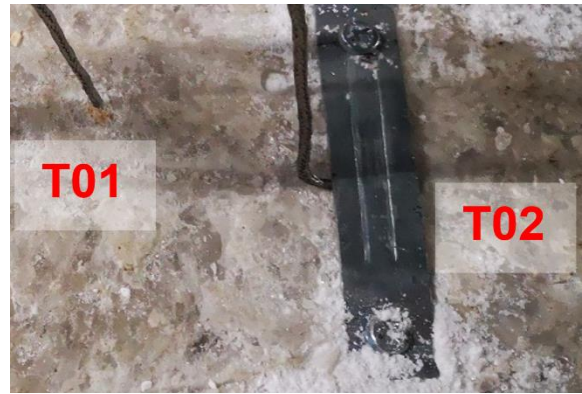


Abbildung 56: Befestigung der Temperatursensoren auf der Sohle

Der Abstand des Temperatursensor T01 zum Injektionsring IS1685 beträgt ca. 0,4 m und zur Ringkammer RK02 ca. 0,6 m.

Der Temperatursensor T01 wurde ca. 5 cm tief in der Sohle versenkt. Dazu wurde ein Loch mit  $\varnothing$  4 mm gebohrt und der Sensor mit  $\varnothing$  3mm bis zum Ende hineingesteckt. Der Ringspalt im Bohrloch wurde mit Bohrmehl verstopft und der stahlarmierte Sensordraht wurde am Bohrlochrand mit einem kleinen Holzspan verkeilt (Abbildung 55 und Abbildung 56).

Der Temperatursensor T02 liegt wenige Zentimeter neben Temperatursensor T01 auf der Sohle auf und ist mit einer Stahllasche auf der Oberfläche fixiert worden (Abbildung 56).

Die 3 Temperatursensoren in der Mitte des Bauwerks (T03, T04 und T05) sind entlang des Spanndrahtes in der Messebene positioniert und sind von dort aus ca. 5cm in den Baustoff abgewinkelt (Abbildung 57).

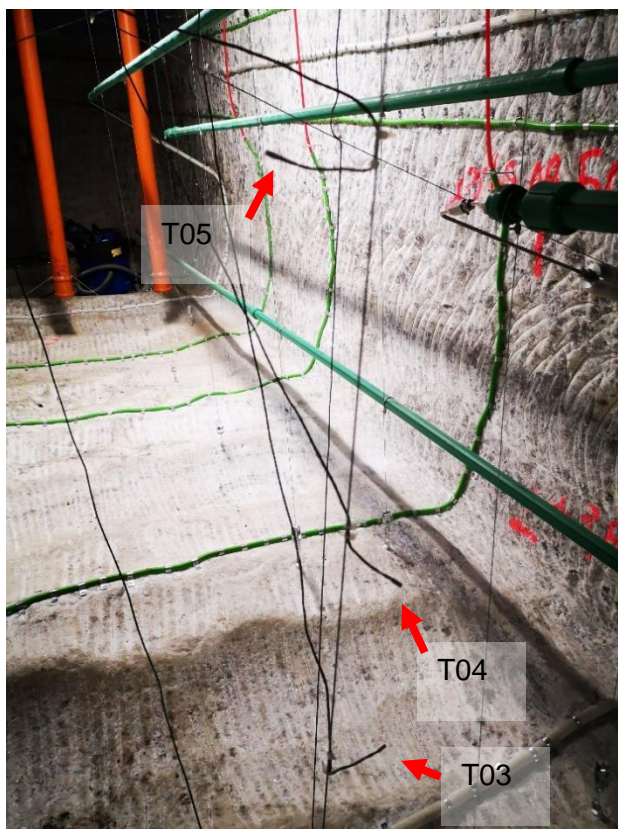


Abbildung 57: Positionen der Temperatursensoren in der Mitte des Baustoffs (perspektivisch verzerrte Darstellung)

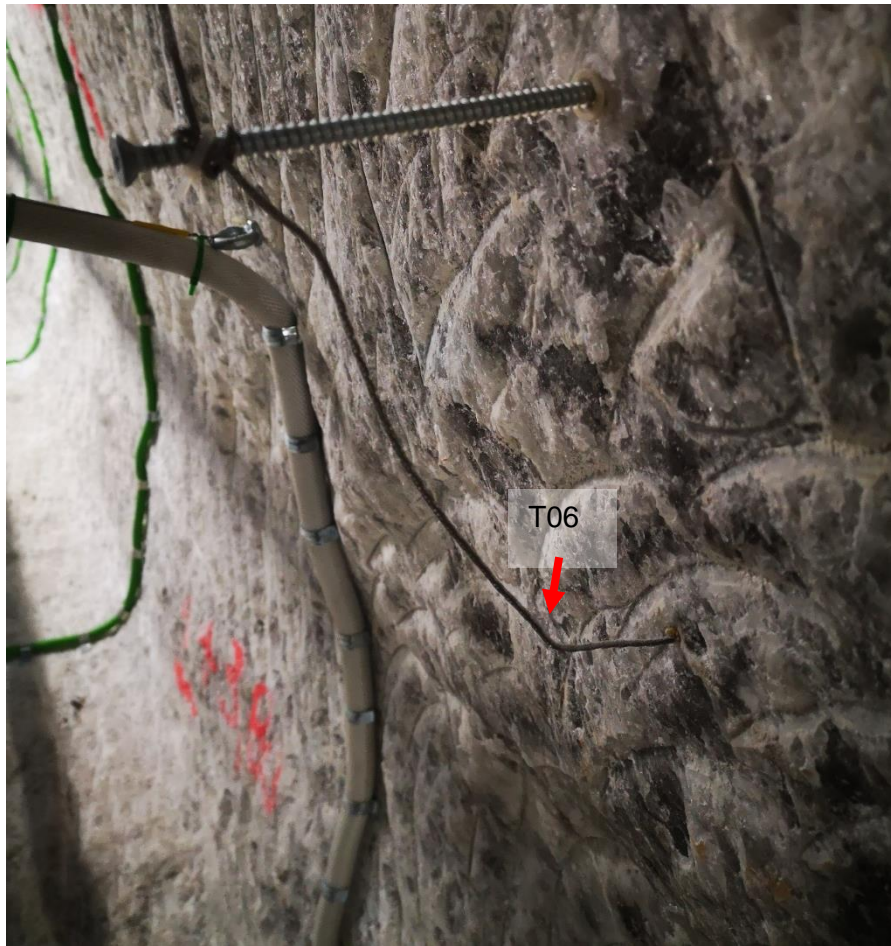


Abbildung 58: Lage des Temperatursensor T06 im rechten Stoß (RK02 im Hintergrund)

Der Temperatursensor T06 liegt auf dem Niveau von T04 und ist analog zum Temperatursensor T01 in die Salzkontur eingebunden (Abbildung 58).

Der Temperatursensor T07 liegt ca. 5 cm oberhalb des Betonspiegels in der Luft und wurde analog T03 bis T05 positioniert.

Der Temperatursensor T08 ist ca. 5 cm tief in die Firste eingebunden, wobei der Sensor nur in ein Bohrloch analog zu T01 eingesteckt wurde. Aufgrund der Überkopfsituation wurde kein Bohrmehl eingebracht.

### 6.1.8 Einbau der Armierungsmatten

Als letzte Einbaumaßnahme vor der Betonage wurden konstruktiv gewählte Armierungsmatten in die Versuchsstrecke eingebaut, mit dem Ziel oberflächennah die expansionsbedingten Dehnungen zu behindern und so einem Auftreten von oberflächennahen Rissen entgegenzuwirken (Abbildung 59).

Die Armierungsmatten wurden so aufgehängt, dass sie 3 cm unterhalb der geplanten horizontalen Betonoberfläche verliefen. Die Matten wurden mithilfe von Kabelbindern an horizontal gespannten Drähten befestigt. Von der Holzschalung aus betrachtet wurden die Armierungsmatten über die ersten 14 Meter und die komplette Breite der späteren Halbdammoberfläche gespannt.

Zusätzlich wurden hinter der Stirnfläche des Halbdammes, ebenfalls im Abstand von 3 cm zu der Holzschalung, Armierungsmatten über die gesamte Querschnittsfläche eingebracht, um den Einfluss der fehlenden Einspannung durch massive Widerlager zu verringern. Sie wurden

ebenfalls mit Kabelbindern an den gespannten Drähten befestigt. Das Produktdatenblatt zu den Armierungsmatten findet sich in Anlage 5.

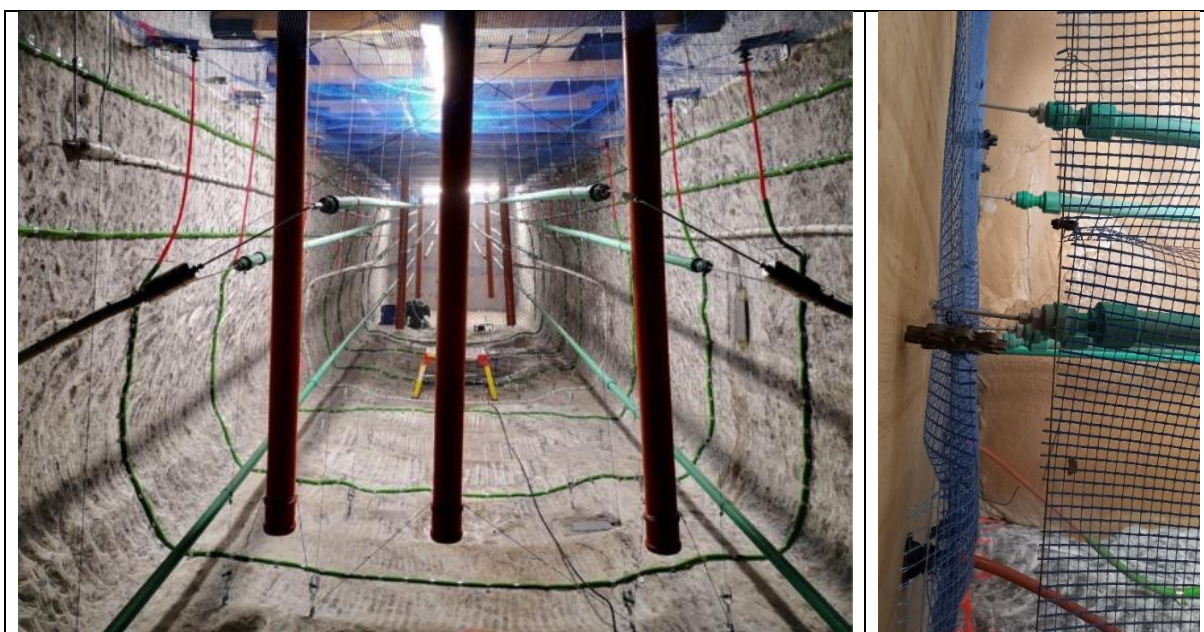


Abbildung 59: Eingebaute Armierungsmatten nahe der geplanten Halbdamtoberfläche (links) und an der Schalung (rechts)

### 6.1.9 Einbau von KG-Rohren

Für Untersuchungen mit dem Ziel den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit von Salz auf die Anbindung von Salz und MgO-Baustoff mittels Kompositproben zu bestimmen, wurden drei Flächen unterschiedlicher Rauheit erstellt und untersucht (siehe Tabelle 3, Kapitel 5.4.2). Um die Anzahl an gestoßenen Bohrmeter durch das Bauwerk gering zu halten, wurden über diese angerauten Felder jeweils ein verschlossenes, abgedichtetes KG-Rohr gehängt (Abbildung 59, links). Sechs weitere KG-Rohre wurden an unterschiedlichen Positionen aufgehängt, um unbearbeitete Gebirgsoberflächen beproben zu können. Mit Blick auf die Ortsbrust wurden die KG-Rohre gemäß Tabelle 8 positioniert.

Tabelle 8: Position der KG-Rohre in Bezug auf die Stirnseite des Halbdamms

Abstand zur Stirnseite des Damms [m]	KG-Rohrnummer		
	Linker Abschnitt	Mittiger Abschnitt	Rechter Abschnitt
12,0	1	2	3
5,5	4	5	6
1,5	7	8	9

Die KG-Rohre wurden entsprechend den Vorgaben eingebaut, dass die Rohre vertikal verlaufen, gleichmäßig auf die Sohlbreite verteilt sind und der Abstand zwischen dem Rohrende und der Sohle ca. 30 cm beträgt. Diese Vorgaben wurden mit kleinen Abweichungen eingehalten.

## 6.2 Einbau des MgO-Betons

### 6.2.1 Rezeptur des eingebauten MgO-Baustoffs

Basierend auf dem Stand der Technik wurde zu Beginn des Projektes entschieden, die der A1-Basisrezeptur als Dichtbaustoff für den Halbdamm zu verwenden. Die Auswahl der einzelnen Komponenten erwies sich als deutlich schwieriger als zu Beginn angenommen. Hierbei stellte die Auswahl eines geeigneten Magnesiumoxids die größte Herausforderung dar. Dies lag an der Reaktivität des Materials, wobei eine zu geringe Reaktivität aufgrund der geringen Erhärtungsdauer und von hohen Anfangstemperaturen als nicht erstrebenswert angesehen worden ist, da durch die größere Temperaturerhöhung ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Rissen besteht. Die Unterschiede zwischen verschiedenen beprobten Mustern desselben Produktes erforderte die Kontaktaufnahme mit anderen MgO-Produzenten, um geeignetes Material in gleichbleibender Qualität gewährleisten zu bekommen<sup>4</sup>. Das MgO von Styromag, das zur Anwendung kam, wies eine Reaktivität von 235 s (pH-Wert 7) auf und lag in der für die Verarbeitbarkeit als geeignet angesehenen Bandbreite von 150 bis 500 Sekunden [14].

Die für die Betonage angemischte Suspension hatte im Ergebnis einer Rezepturanpassung die in Tabelle 9 aufgeführte Zusammensetzung. Die Details zur Rezepturanpassung finden sich im Technischen Anhang. Die Zugabe von zusätzlichem Anhydritmehl wurde erforderlich, um die Suspensionstabilität durch den Feinkornanteil zu verbessern und einen homogenen Dichtbaustoff zu erhalten. Die Produktdatenblätter sowie weitere Informationen zu den eingesetzten Ausgangsstoffen finden sich in 0.

Tabelle 9: Übersicht und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe der modifizierten A1-Rezeptur pro Charge (Mischerfüllung)

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

Diese Baustoffrezeptur weicht leicht von dem vorgegebenen Mischverhältnis der A1-Basisrezeptur ab. Jedoch wird in der Basisrezeptur für den A1 festgelegt, dass im Steinsalz natürlich vorhandene Unreinheiten bis zu 10 % kein Problem darstellen und dass Anhydrit im Steinsalz natürlich vorkommt [15]. Der Anteil von 3,9 % Anhydritmehl wurde dabei aus praktischen Gründen gewählt. Das Anhydrit wurde in 25 kg Säcken angeliefert, wobei ein Sack dabei ca. 2 % der Gesamtmasse des im Mischer angerührten Zementes entspricht. Im Ergebnis von Laborversuchen wurde die zusätzliche Erhöhung der Masse auf ca. 3,9 % durch Anhydritmehlzugabe ebenfalls als geeignet empfunden.

### 6.2.2 Mischtechnik

Für die Betonage des Halbdammes wurde ein benötigtes Volumen von 102,2 m<sup>3</sup> berechnet (Tabelle 1). Dieses Volumen wurde mit zwei Zwangsmischern Filamos m 750 H angerührt (Abbildung 60).

<sup>4</sup> Auf die Corona-Pandemie bedingten Lieferprobleme wurde bereits hingewiesen.



Abbildung 60: Übersicht über die eingesetzte Mischtechnik



Abbildung 61: Befüllung des Zwangsmischers Filamos m 750 H mit Steinsalz

Der Mischvorgang wurde folgendermaßen durchgeführt: Das bereits vortionierte Salz wurde in einem BigBag gelagert. Durch Aufschneiden des Bigbags, der mithilfe eines Radladers über das Gitternetz des Zwangsmischers gehoben wurde, fiel das Salz in den Mischer (Abbildung 61). Für den Transport des Salzes und das Einfüllen in den Mischer wurde eine Zeitdauer von 2,5 Minuten angesetzt.

Nachdem das Steinsalzgrus eingebracht worden war, förderte eine Pumpe 232 Liter (302 kg) an  $MgCl_2$ -Lösung kontinuierlich in den laufenden Mischer. Dies dauerte vier Minuten. Das Salzlösungsvolumen wurde mit einem Durchflussmessgerät erfasst.

Anschließend wurde 2 weitere Minuten gemischt. Danach erfolgte die Zugabe von 75 kg  $MgO$  und 25 kg Anhydrit. Dies wurde zwei Minuten durchgemischt. Anschließend wurden 75 kg  $MgO$  und 25 kg Anhydrit hinzugefügt und drei Minuten gemischt. Das Zugeben des  $MgO$  und des Anhydrits erfolgte in zwei Chargen, um ein Auftreten von Agglomeraten zu minimieren. Die Gesamtdauer des Mischens wurde mit 12,5 Minuten angesetzt, bei auftretender Agglomeration 14,5 Minuten. Das Gesamtgemisch wies nach diesen Schritten keine erkennbaren Agglomerate auf. Für die Entleerung des Mischers wurden 4 Minuten veranschlagt.

### 6.2.3 Pumptechnik

Durch das Öffnen eines Scharniers am Boden der Mischtrommel des Zwangsmischers gelang die fertige Suspension in die Betonpumpe mit der Bezeichnung S5 EV/CM der Firma Putzmeister (Abbildung 62). Anschließend wurde die Suspension hinter die Schalung mithilfe eines Schlauches gepumpt. Das Einbringen erfolgte im sogenannten Kontraktorverfahren, d.h. der Auslass der Betonierschlauches befand sich – sieht man vom Betonierbeginn ab - unterhalb des Suspensionsspiegels. So wurde vermieden, dass über das Fördern zusätzlich Luft in die Suspension eingetragen wurde.



Abbildung 62: Auslaufen des Materials vom Zwangsmischer in die Betonpumpe S5 EV/CM

## 6.2.4 Betonageverlauf

Die Betonage des Halbdammes begann am 26.07.2021 und endete am 28.07.2021. Der nachstehenden Tabelle 10 können die Rahmendaten der Betonage entnommen werden. Geplant war eine Frisch-in-Frisch Betonage, wobei für zulässige Betonierpausen von maximal 9 Stunden Erfahrungswerte für die der A1-Basisrezeptur zugrunde gelegt wurden.

Tabelle 10: Überblick über die wichtigsten Daten der Betonage

Datum; Schicht	26.07.21 Früh	26.07.21 Spät	27.07.21 Früh	27.07.21 Spät	28.07.21 Früh	Summe
Start - Ende [hh:mm]	10:50- 17:00	17:00- 23:10	06:50- 14:46	16:36- 23:14	07:34- 12:08	-
Arbeitszeit [hh:mm]	06:10	06:10	07:56	06:38	04:34	31:28
Pause zur vorherigen Schicht [hh:mm]	-	0	07:40	01:46	08:20	-
Chargen [-]	26	27	36	34	26	149
Masse der eingefüllten Suspension [kg]	33098	34371	45828	43282	33098	189677
Tagesmittelwert Suspensionsdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,904	1,904	1,905	1,905	1,885	-
Volumen der eingefüllten Suspension [l]	17383	18052	24057	22720	17559	99771

Das Volumen der eingefüllten Suspension wurde jeweils mit der durchschnittlichen Suspensionsdichte des Tages aus der eingefüllten Masse errechnet, siehe Tabelle 10 und Anlage 7. Im Ergebnis der Betonage unterscheidet sich das Volumen der eingefüllten Suspension sich weniger als 3 % von dem berechneten benötigten Volumen.

Während des Betonageablaufes traten keine Zwischenfälle auf.

## 6.2.5 Baubegleitende Qualitätssicherung

### 6.2.5.1 Ausgangsstoffe

Die Ausgangsstoffe der Baustoffrezeptur wurden beim Hersteller bzw. bei Anlieferung beprobt, um festzustellen, ob sie die Qualitätsanforderungen erfüllen. Weitergehende Informationen zur Auswahl der Baustoffkomponenten und zur Ableitung der Vorgaben für die Qualitätssicherung finden sich im Technischen Anhang.

### 6.2.5.2 Magnesiumoxid

Für den Bau des Halbdammes wurde das Magnesiumoxid von Styromag eingesetzt, da es eine Reaktivität in der für die Verarbeitbarkeit als geeignet angesehenen Bandbreite von 150 s bis 500 s aufwies. Das Produktdatenblatt des MgO findet sich in Anlage 6.1. Nach Anlieferung wurden von allen 8 Paletten Proben genommen und im Labor der K-UTEC beprobt. Im Ergebnis der Beprobung zeigte sich, dass die Reaktivität des angelieferten Magnesiumoxids in der Bandbreite von 174 s bis 199 s (pH 7) geringer war als die im Datenblatt angegebenen Werte von 238 s bis 305 s bei pH 7, aber in der als geeignet angesehenen Bandbreite lag, Anlage 6.2.

Festzuhalten ist auch, dass bei Auswahl des Magnesiumoxids im Vorfeld festgestellt worden, dass es das ursprünglich geforderte Reinheitskriterium von 93 % nicht erreichte. Da das Magnesiumoxid im Ergebnis der Auswahl dennoch als am besten geeignet angesehen wurde, wurde die Rezeptur an das MgO-Massenverhältnis angepasst, da die anderen Bestandteile als vernachlässigbar angesehen wurden. Dennoch erfolgte eine Analyse der wichtigen Bestandteile des angelieferten Magnesiumoxids an Hand von Stichproben. Die Analyseergebnisse sind ebenfalls Anlage 6.2 zusammengestellt.

### 6.2.5.3 Salzgrus

Der Steinsalzgrus wurde aus verschiedenen Kornfraktionen der Grube Sondershausen zusammengemischt. Dafür wurden die Kornfraktionen von „Band 6“ und „Band 8“ sowie Feinsalz (Staubsalz) ausgewählt. Weitergehende Informationen zur Auswahl des Salzgruses finden sich im Technischen Anhang.

Für die Analyse der einzelnen Kornfraktionen wurden beim Hersteller in der Grube die Förderbänder beprobt (Abbildung 63). Das jeweilige Förderband wurde hierfür angehalten und an drei unterschiedlichen Bandabschnitten Proben entnommen. In einem Abstand von 20 Minuten wurde dies wiederholt.



Abbildung 63: Beprobung einer Bandanlage am 21.01.2020

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

Das Feinsalz wurde mithilfe eines HELOS (H2387) & RODOS, R5 gemessen, da diese Salzproben zu feinkörnig sind und nicht mit einem Siebturm analysiert werden können. Die kumulativen Korngrößenverteilungen sind in Anlage 6.3 aufgeführt.

Für die Errichtung des Halbdammes wurde das Salz in Bigbags angeliefert (Abbildung 64). Jeder Bigbag enthielt das Salz einer Kornfraktion. Mithilfe eines für Schüttgut geeigneten Probenehmers wurden diese Bigbags stichprobenartig beprobt und auf die Korngrößenverteilung des darin enthaltenen Salzes untersucht.

Um bei der Betonage die vorgegebene Kornverteilung des Salzgruses einzuhalten, wurde das Steinsalz der drei Fraktionen vorportioniert. Die Vorportionierung des Steinsalzes fand in

der Grube Teutschenthal statt. Entsprechend der aus den vorangegangenen Analysen folgenden Massenverhältnissen wurden die einzelnen Kornfraktionen miteinander vermengt und in Bigbags gelagert. Diese Umverteilung erfolgte durch den Einsatz von handelsüblichen Eimern und Schaufeln. Das Gewicht der einzelnen Fraktionen wurde bei der Bigbagpräparation mithilfe einer geeichten Waage kontrolliert.

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



Abbildung 64: Bigbagbeprobung am 05.11.2020

#### **6.2.5.3.1 MgCl<sub>2</sub>-Lösung**

Nach Anlieferung der Lösung in IBC-Containern erfolgte die Probenahme. Die Probe wurde im Analytischen Labor der TU-C auf ihre Zusammensetzung überprüft.

Die von der DEUSA bezogene SES-30 30%-Lösung entsprach in ihrer Zusammensetzung allen Anforderungen. Ihre Dichte lag jedoch geringfügig unterhalb der Anforderungen. Die Abweichung war jedoch so gering, dass sie nach Absprache mit den Baustoffexperten der Projektpartner genutzt wurde. Das Produktdatenblatt und die Analyseergebnisse finden sich Anlage 6.4 und in Anlage 6.5.

#### **6.2.5.3.2 Anhydritmehl**

Wie bereits ausgeführt wurde der modifizierten A1-Rezeptur zur Erhöhung des Feinkornanteils Anhydritmehl zugegeben. Das Anhydritmehl wurde als Sackware von der Firma Casea bezogen. Das Produktdatenblatt findet sich in 0.

Bei Überprüfung des Anhydritmeihls am Institut für Aufbereitung und Deponietechnik der TU-C wurden bei einem Glühverlust von 1,6 % keine weiteren Bestandteile neben dem Anhydrit festgestellt.

#### **6.2.5.4 Baustoffsuspension - Suspensionsdichte, Fließmaß und Suspensionstemperatur**

Begleitend zur Errichtung des Dammes wurden 22 Chargen beprobt, untersucht und die Ergebnisse für die Baustoffsuspensionsdichte, das Fließmaß und die Suspensionstemperatur dokumentiert.

Die Suspension wies im Mittel eine Dichte von  $1,901 \pm 0,016 \text{ g/cm}^3$  ( $1,872\text{-}1,923 \text{ g/cm}^3$ ;  $N=22$ ) auf. Die Dichte des Materials wich von der gemessenen Dichte der Vorversuche mit der Basisrezeptur A1 ab, da das Anhydritmehl hinzugefügt wurde. Die ermittelten Suspensionsdichten von werden als homogen betrachtet. Üblicherweise wird neben der Suspensionsdichte auch der Luftporengehalt der Baustoffsuspension ermittelt. Der dafür erforderliche Luftporentopf stand dafür nicht rechtzeitig zur Verfügung, so dass diese Daten nicht erhoben werden konnten<sup>5</sup>.

Das Fließmaß in der Fließrinne wies nach 30 Sekunden einen Wert von  $454 \pm 23 \text{ mm}$  ( $410\text{-}500 \text{ mm}$ ;  $N=22$ ) auf. Die maximale Fließweite betrug  $501 \pm 34 \text{ [mm]}$  ( $450\text{-}560 \text{ mm}$ ;  $N=22$ ). Diese Fließmaße unterschieden sich von den in den Vorversuchen ermittelten Werten und werden ebenfalls auf die Rezepturanpassungen insbesondere die Zugabe von Anhydritmehl zurückgeführt.

Als weiterer Einflussfaktor auf die Suspensionsdichte und das Fließmaß wurde eine mögliche Variation in der Verteilung des Salzgruses identifiziert. Bei der Mischung der unterschiedlichen Salzfraktionen sind Abweichungen möglich, da die Genauigkeit der genutzten Waage bei der Vorproportionierung des Steinsalzes im Kilogramm Bereich lag.

Die Suspensionstemperatur betrug  $31,7 \pm 0,5 \text{ °C}$  ( $30,5\text{-}32,8 \text{ °C}$ ;  $N=22$ ). Sie stellt einen wichtigen Erfahrungswert dar, um die zur Verfügung stehende Zeit für den Betonageprozess einzuschätzen. Sie dient weiterhin als Datengrundlage für die numerische Simulation der Temperaturentwicklung (siehe Technischer Anhang).

Eine detaillierte Auflistung der beprobten Chargen befindet sich in Anlage 7.

#### **6.2.5.5 Erhärtungsverhalten - Quasiadiabatische Temperaturmessung**

Da während der Aushärtung von Magnesiabindern Hydratationswärme entsteht, ist die Temperaturentwicklung des Baustoffs während der Erhärtung ein aussagekräftiger Parameter für die Qualitätssicherung. Im Labor wird idealerweise die adiabatische Temperaturerhöhung des Baustoffs aufgezeichnet und dokumentiert. Da adiabatische Kalorimeter allerdings nicht baustellentauglich sind, wird auf die quasiadiabatischen Tonnen (siehe Abbildung 65) zurückgegriffen. Diese Tonnen sind mit Isolationsmaterial ausgekleidet, sodass die Wärmeabfuhr reduziert wird. In die Mitte des Isolationsmaterials wird Baustoffsuspension in einem KG-Rohr platziert. In die Suspension werden Temperaturfühler eingebracht, mit welchen die Daten aufgezeichnet werden. Gegebenenfalls können die ermittelten Temperaturkurven in der Folge mit Hilfe der im Labor gemessenen adiabatischen Temperaturerhöhung korrigiert werden, was für eine baubegleitende Qualitätssicherung allerdings nicht nötig ist. Viel mehr dienen Temperaturkurven einer gleichen Baustoffrezeptur als Referenzkurven zum Vergleich. Die Kurven vergleichbarer Baustoffrezepturen bieten eine Möglichkeit, das verwendete Magnesiumoxid vergleichend zu bewerten und somit die Qualität dieses Baustoffbestandteils sicherzustellen.

---

<sup>5</sup> Aufgrund der durch die Corona-Pandemie bedingten Lieferprobleme stand der Luftporentopf zum Betonagetermin nicht rechtzeitig zur Verfügung.



Abbildung 65: Beispielbilder quasiadiabatisches Kalorimeter

Bei der Dammerstellung wurden baubegleitend die Temperaturkurven von zwei Chargen ermittelt. Die erste Temperaturkurve stammt von Charge 3 (Teutschenthal\_Bau\_1), die zweite von Charge 25 (Teutschenthal\_Bau\_2). Beide Kurven sind in Abbildung 66 zu finden.

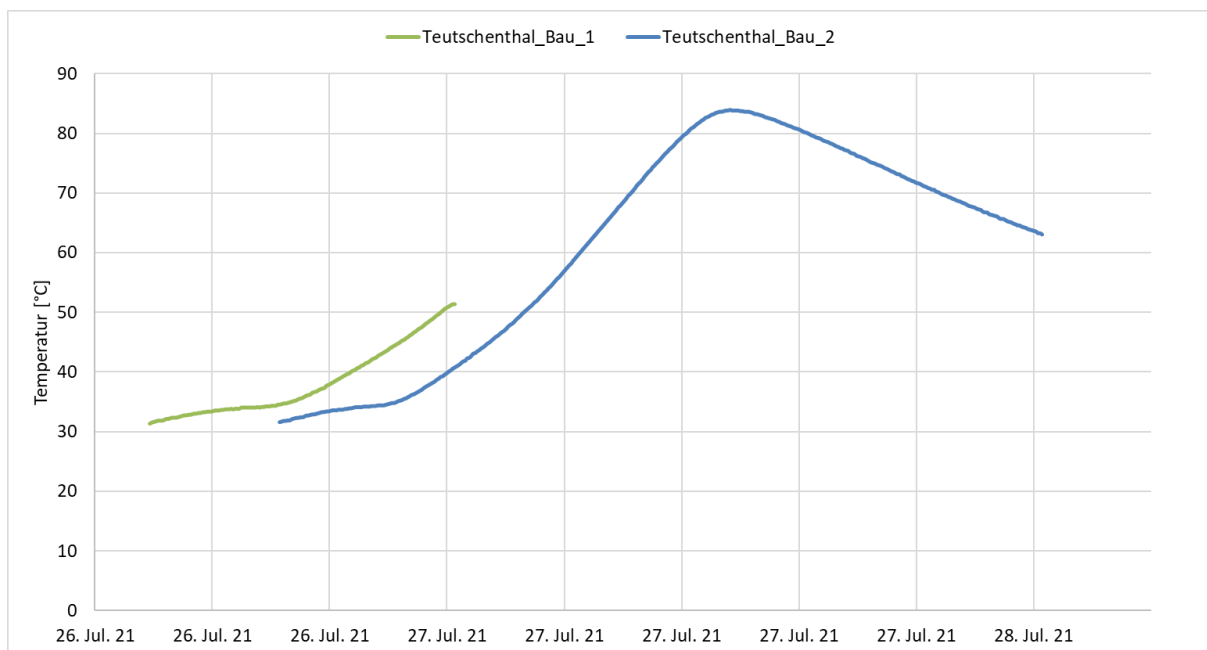


Abbildung 66: Temperaturverläufe der baubegleitenden Temperaturmessungen im quasiadiabatischen Kalorimeter

Wie in der Abbildung zu erkennen, ist bei der zu Charge 3 (Teutschenthal\_Bau\_1) gehörigen Kurve ein Messabbruch zu erkennen. Grund hierfür ist eine Fehlfunktion des verwendeten Datenloggers. Somit sind nur für die ersten 12,5 Stunden Daten verfügbar. Für Charge 25 (Teutschenthal\_Bau\_2), sind Daten für den gesamten Messzeitraum verfügbar und der Kurvenverlauf ist insgesamt im Bereich von dem was zuvor prognostiziert und erwartet wurde. Sieht man von dem zeitlichen Versatz ab, ist die Übereinstimmung des Anfangsbereiches der Kurven als gut zu bewerten. Zusätzlich zu der Temperaturentwicklung des Baustoffs ist auch die Temperaturerhöhung ein wichtiger Vergleichswert. Dieser wird durch Subtraktion der Ausgangstemperatur des Baustoffs von der jeweiligen Temperatur ermittelt.

Die relevantesten Parameter zu der Temperaturkurve von Charge 25 sind nachstehend zusammengefasst:

Maximaltemperatur:	84 °C
Ausgangstemperatur Baustoff:	31,6 °C
Maximale Temperaturerhöhung:	52,4 K
Zeit bis zur Maximaltemperatur:	~ 18,5 h

### 6.2.5.6 Festkörpereigenschaften - Biegezugfestigkeit und einaxiale Druckfestigkeit

Baubegleitend wurden zur Herstellung von Probekörpern die Baustoff suspension der Chargen in Formen abgefüllt.

Im Rahmen der baubegleitenden Qualitätssicherung wurden für drei Probenchargen die mechanischen Festkörpereigenschaften Biegezugfestigkeit und einaxiale Druckfestigkeit nach 7, 14 und 28 Tagen an prismatischen Probekörpern gemäß DIN EN 196-1 geprüft. An den Prismen der Abmessungen 40x40x160 mm erfolgte erst die Biegezugprüfung und danach die Druckfestigkeitsprüfungen an den Bruchhälften, siehe Abbildung 67. Die Lagerungstemperatur Probekörper lag zwischen ca. 23 °C und 27 °C. Die Abbildung 68 stellt die Ergebnisse der Prüfungen graphisch dar. Die detaillierten Ergebnisse befinden sich in Anlage 7.

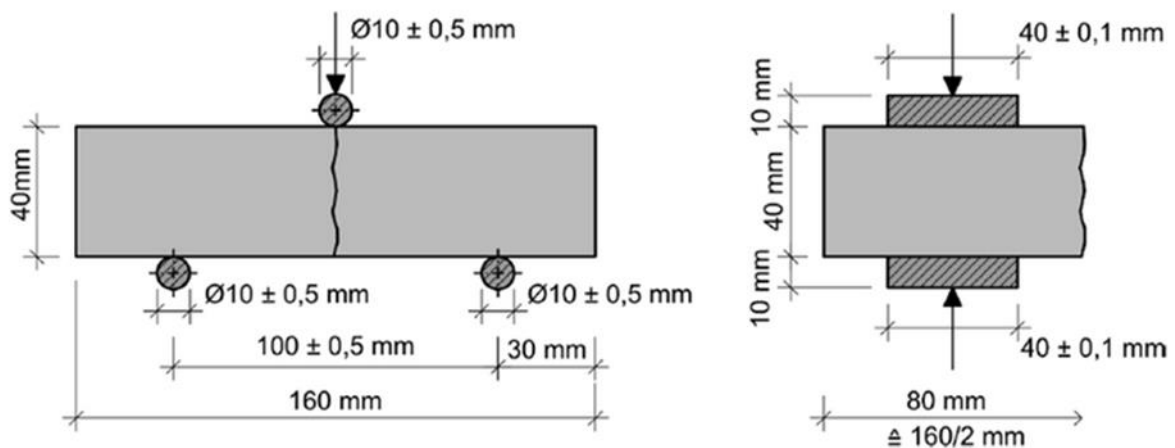


Abbildung 67: Schematische Darstellung der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen

Die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen wies eine Spanne von 42,9 bis 54,6 MPa auf. Diese Werte sind als hoch. Zwischen den einzelnen Chargen ist keine zeitabhängige Tendenz bezüglich der Druckfestigkeiten zu entnehmen. So wies die Charge 002 eine mit der Zeit zunehmende einaxiale Druckfestigkeit auf. Die einaxiale Druckfestigkeit steigt von 46,8 MPa nach 7 Tagen auf 52,3 nach 14 Tagen und anschließend auf 54,6 MPa. Die Charge 64 hingegen wies einen Anstieg der einaxialen Druckfestigkeit von 7 auf 14 Tagen auf. So erhöhte sich der Wert von 41,5 auf 52,3 MPa. Nach 28 Tagen jedoch wies die Charge nur noch eine Druckfestigkeit von 42,9 MPa auf. Die Druckfestigkeit hat abgenommen. Die Charge 146 hingegen zeigte mit zunehmender Lagerung eine Erhöhung der einaxialen Druckfestigkeit. So erhöhte sich der Wert von 38,5 MPa nach 7 Tagen auf 42,7 MPa nach 14 Tagen und anschließend stieg die Festigkeit auf 44,2 MPa nach 28 Tagen.

Analog zur Druckfestigkeit wies auch die Biegezugfestigkeit keine einheitliche Entwicklung auf. Bei der Probe 002 betrug die Biegezugfestigkeit 11,6 MPa nach 7 Tagen, nach 14 Tagen betrug sie 12,4 MPa und nach 28 Tagen 13,3 MPa. Die Charge 064 besaß nach 7 Tagen eine Biegezugfestigkeit von 10,0 MPa, nach 14 Tagen stieg sie auf 10,7 MPa und nach 28 Tagen sank die Biegezugfestigkeit auf 9,8 MPa. Die Charge 146 hingegen wies nach 7 Tagen eine einaxiale Biegezugfestigkeit von 9,0 MPa, nach 14 Tagen eine von 10,7 MPa und nach 28 Tagen eine Biegezugfestigkeit von 9,7 MPa auf. Aus den Ergebnissen für die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit lässt sich schlussfolgern, dass bereits nach 7 Tagen der modifizierte A1-Baustoff bei den gegebenen Lagerungstemperaturen (Anlage 7) soweit ausgehärtet war, dass die Unterschiede die Bandbreite zwischen den einzelnen Proben charakterisieren und weniger durch das Alter der Probekörper bedingt sind.

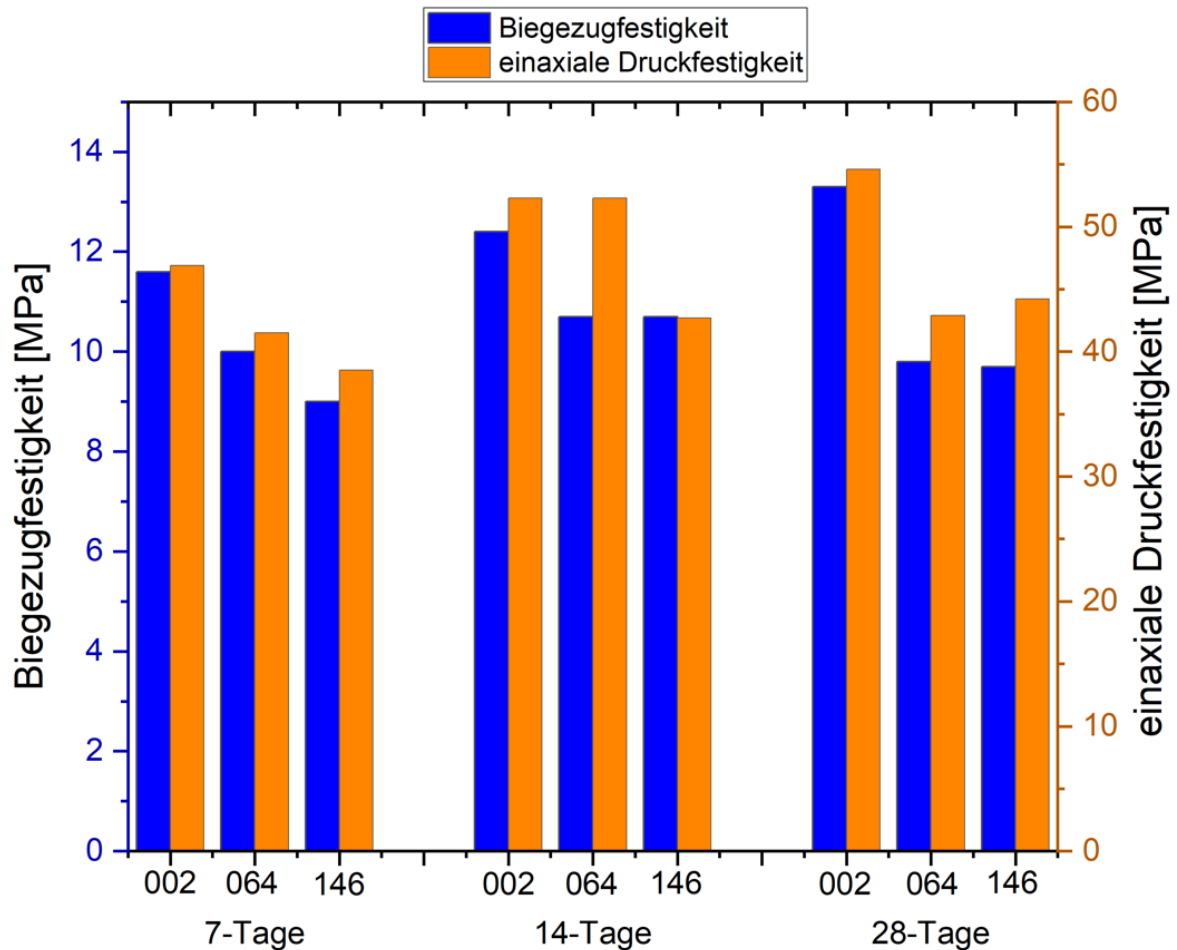


Abbildung 68: Übersicht über die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit und der Druckfestigkeit liegen in einer Größenordnung, die typisch für A1-Sorelbeton sind [16].

### 6.2.5.7 Beobachtungen während der Betonage

Nach einer Betonagepause von fast zwei Stunden wurden in der Mitte des vorderen betonierten Bereiches Risse wahrgenommen. Die Oberfläche in diesem Bereich wurde als trocken empfunden, während der hintere Bereich der Strecke offensichtlich noch feucht war. Auch scheint der Randbereich feuchter als der mittige Bereich zu sein. Darauf wurde mit einem Umhängen des Schlauches reagiert, der sich ursprünglich bei etwa 10 m hinter der Schalung befand, da festgestellt wurde, dass die Suspension sich nicht gleichmäßig ausbreitete, Abbildung 69. Das Foto wurde zum Beginn der Spätschicht am 27.07.2021 aufgenommen, als der Pumpbetrieb wieder aufgenommen wurde, da die vorangegangene Fröhschicht gegen 14:15 Uhr mit dem Pumpen aufgehört hatte. Wie bereits erwähnt schwankte die Fließrichtung des MgO-Baustoffs, so dass davon auszugehen ist, dass der vordere angetrocknete Bereich mehrere Stunden nicht von frischem Beton erreicht wurde.

Weiterhin entstand der Eindruck, dass durch das Kontraktorverfahren ein Aufschwimmen der bereits angesteiften Suspensionsoberfläche als Schläpfe begünstigt wurde. Auch fiel die Bildung von Betonierschaum auf.



Abbildung 69: Rissbildung an der Oberfläche zu Beginn der Spätschicht am 27.07.2021 16:36 Uhr

Während der Betonage sammelte sich der Schaum beidseitig am jeweils tiefsten Punkt des Suspensionsspiegels an. Insbesondere ist dieser Schaum bei neu eingebrachtem Material mit aufgeschwommen. In Abbildung 70 ist die Ansammlung des Schaumes zu Beginn des dritten Betonagetages dargestellt. Die Abbildung 71 zeigt beispielhaft ein erhärtetes Schaumagglomerat, welches auf der Baustoff Suspension aufschwamm und händisch entfernt wurde. Seine Entfernung wurde deshalb soweit möglich vorgenommen, da durch den aufsteigenden Schaum die Gefahr bestand, dass die Armierungsmatten hochgedrückt werden und dadurch in ihrer Funktion behindert würden. Dazu wurden die Armierungsmatten an Bauwerksenden aufgeschnitten.



Abbildung 70: Schaumansammlung an dem tiefsten Punkt des Betonagelevels



Abbildung 71: Ein Schaumagglomerat

Anhand der horizontal installierten Injektionsschläuche am SE-Stoß konnte der Fließwinkel der Suspension abgeschätzt werden (Abbildung 72).



Abbildung 72: Stand der Betonage am Ende der Spätschicht am 27.07.2021 22:53 Uhr

In einer Entfernung von ca. 10 m zum Schlauch, der die Suspension einbringt, beträgt die Spiegelhöhendifferenz ca. 35 cm. Hieraus ergibt sich ein Fließwinkel von ca. 2 °.

#### 6.2.5.8 Weitere Beobachtungen während des Baus

Die Schalung des Damms wurde im Dezember 2020 errichtet, wobei in beide Stöße 4 Stück I-Träger eingelassen wurden (Abbildung 73). Auf die I-Träger wurde eine doppelte Beplankung aus Holz abgestützt. Die Betonage des Damms erfolgte ab dem 26.07.2021 bis zum 28.07.2021.

Bereits bei einer Befahrung am 05.08.202, also 8 Tage nach Abschluss der Betonage, wurde eine mittige Durchbiegung von ca. 1,8 cm am 3. I-Träger (gezählt von unten) festgestellt.

Für die Bestimmung der Durchbiegung wurde links und rechts eine Schnur an das I-Profil angelegt und in der Mitte der Abstand zum Profil mit dem Zollstock bestimmt (Abbildung 74). Die Temperatur im Kern des Bauwerks betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 55 °C.



Abbildung 73: I-Träger der Schalung



Abbildung 74: Mittige Durchbiegung des 3. I-Trägers



Abbildung 75: Risse im Mörtel an der Verlagerung eines I-Trägers am Stoß

Gleichzeitig wurden auch Risse an der Verlagerung des I-Trägers am Stoß festgestellt (Abbildung 75).

Zu späteren Zeitpunkten wurde die Durchbiegung nicht mehr gemessen. Der Rückbau der Schalung erfolgte Mitte September 2021. Beim Rückbau war auffällig, dass die Träger merkbar unter Spannung standen.

Dass die Konvergenz der Stöße die Durchbiegung der I-Träger begünstigt bzw. verstärkt hat, kann praktisch ausgeschlossen werden, da aus bautechnischen Gründen die Träger immer mit etwas Spiel eingebracht werden und weiterhin die Rissbildung an den Auflagerpunkten (Abbildung 62) keine Hinweise auf eine konvergenzbedingte Ursache zeigt.

Bemerkenswert ist dieser Sachverhalt ohne ihn weiter zu quantifizieren, weil der Halbdamm eine freie Oberfläche besitzt und trotzdem offensichtlich ein hoher Druck auf die Schalung ausgeübt wurde, der über den reinen Suspensionsdruck hinausgeht.

### 6.2.6 Beschreibung des hergestellten Betonkörpers

Nach dem Aushärten des Betonkörpers und dem Ausschalen der Stirnfläche ließen sich am Baukörper folgende Sachverhalte feststellen. Die Armierungsmatten, die vor der Betonage so eingebaut worden sind, dass sie sich nach der Betonage circa 3 cm unterhalb der Betonoberfläche befinden, haben offensichtlich zu dem gewünschten Resultat geführt. Während die ersten 50 cm des Bauwerkes, von der Schalung aus betrachtet, einige Oberflächenrisse aufwiesen (Abbildung 76), deren Verlauf auf einen im Zusammenhang mit der Durchbiegung der Schalung bzw. Schalungsträger stehen können, die nur eine „weiche Einspannung“ darstellen, sind keine weiteren Risse auf der Oberfläche optisch zu erkennen (Abbildung 77).



Abbildung 76: Oberflächenrisse an der Schalung



Abbildung 77: Keine weiteren Oberflächenrisse entlang des Dammbauwerkes

Während sich die Bauwerksoberfläche wie erwartet darstellte, zeigte die Stirnfläche nach dem Ausschalen deutlich die Lage Schichtübergänge insbesondere die mit den längeren Betonierunterbrechungen, vgl. Abbildung 78.

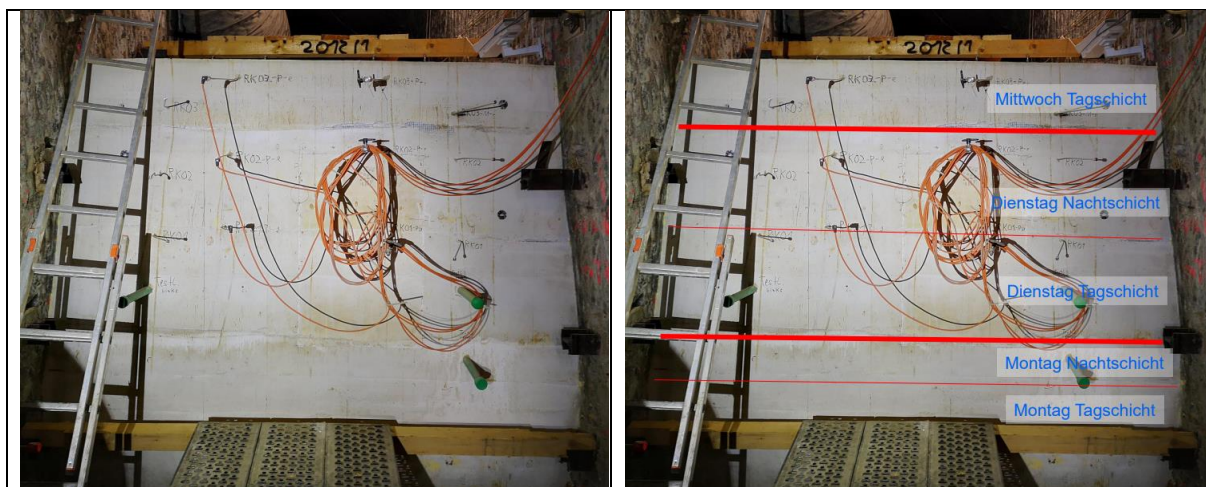


Abbildung 78: Schichtübergänge an der Stirnfläche des Bauwerks

Da die längeren Betonierunterbrechungen sehr nahe an die erfahrungsbasierte Maximalzeit von 9 Stunden kommen (Tabelle 10) und gleichzeitig der begleitende quasiadiabatische Temperaturanstieg sehr steil ist, können zwei Betonierfugen entstanden sein.

Vergleicht man die Kurve mit den zuvor im Labor ermittelten quasiadiabatischen Temperaturkurven (vgl. Abbildung 79) für verschiedene MgO-Sorten sieht man einen im Grundsatz ähnlichen Verlauf. Allerdings gibt es deutliche Unterschiede bei der Maximaltemperatur und dem Zeitpunkt des Temperaturanstiegs. Für diese Unterschiede gibt es eine Reihe an möglichen Erklärungen. So hat die Ausgangs-/Starttemperatur einen erheblichen Einfluss. Bei Prinzipiell gilt, dass bei höherer Ausgangstemperatur eine frühere und steilere Temperaturentwicklung zu erwarten ist. Außerdem spielt der verwendete MgO-Typ eine Rolle, da unterschiedliche MgO-Typen unterschiedliche Reaktivitäten haben und somit unterschiedlich stark und schnell reagieren. Während die Reaktivität des MgO Lehmann&Voss (1) in der Messung vom 03.05.2021 eine außerhalb der Bandbreite liegende geringe Reaktivität aufwies, siehe Technischer Anhang, lagen die Reaktivitäten der übrigen getesteten MgO-Sorten in der zulässigen Bandbreite. Der Vergleich der gemessenen quasiadiabatischen Temperaturentwicklungen lässt die qualitative Schlussfolgerung zu, dass die erfahrungsbasierte maximale Betonierpausendauer von 9 Stunden für die bei Bau des Halbdamms verwendete modifizierte A1-Rezeptur zu lang gewesen ist.

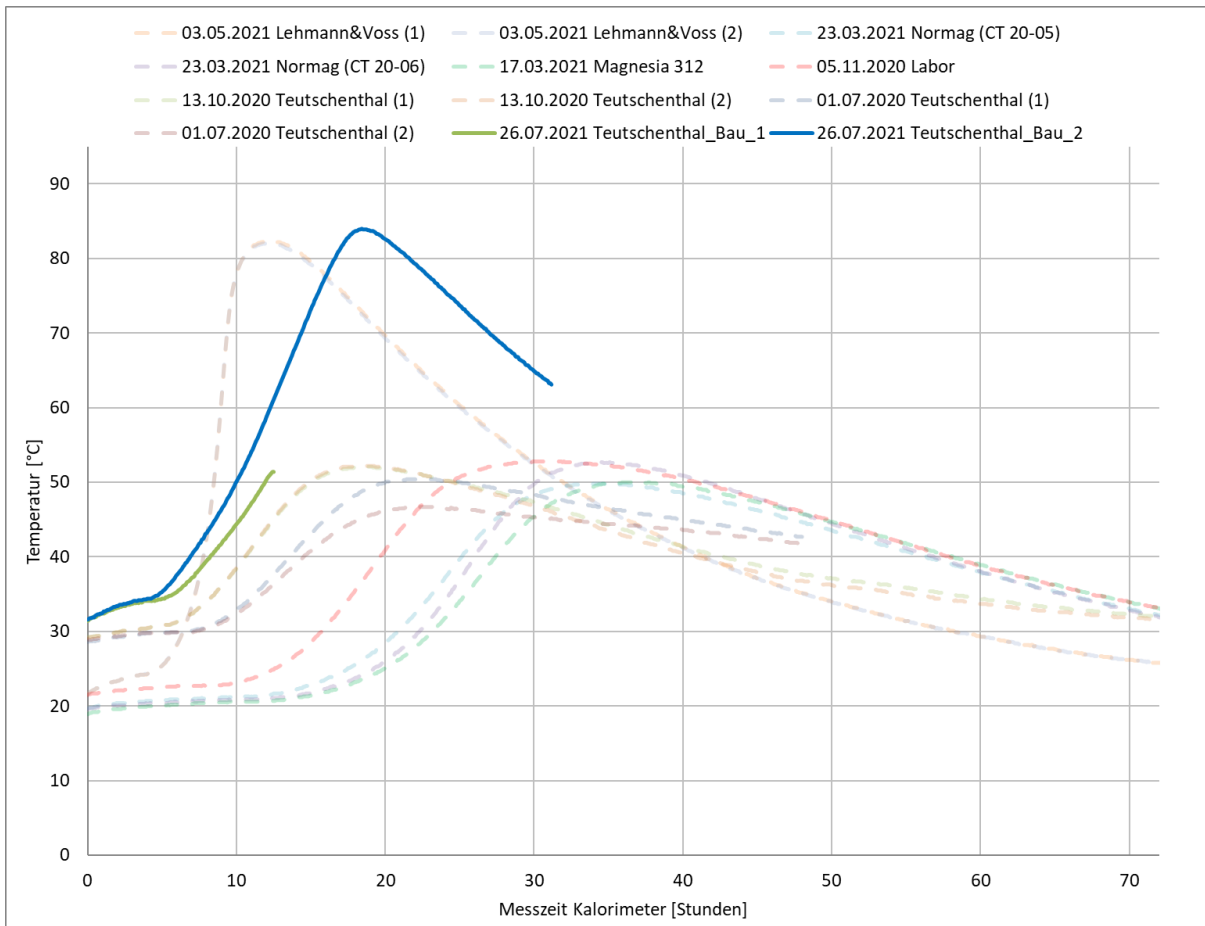


Abbildung 79: Temperaturverläufe der Temperaturmessungen welche im Zusammenhang mit dem STROEFUN III-Projekt in-situ und im Labor durchgeführt wurden

Zur Erkundung, ob Betonierfugen entstanden sind, wurde eine Erkundungsbohrung (Bohrung B14-164) in das Bauwerk geteuft (Abbildung 80, links). Die gewonnenen Kerne bestätigen die Existenz der Betonierfugen (Abbildung 80, rechts).

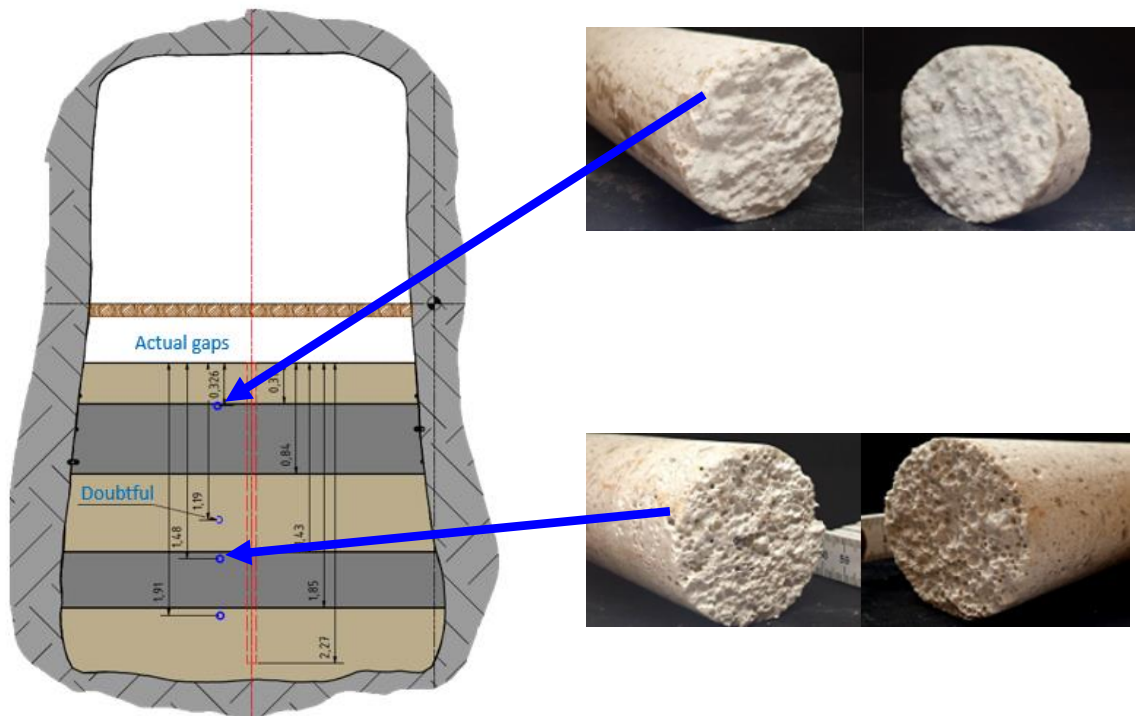


Abbildung 80: Lage der Erkundungsbohrung B14-164 (links) und Kernmaterial aus dem Bereich der Betonierfugen (rechts)

Auf die hydraulischen Eigenschaften der Betonierfugen wird erst im Zusammenhang der Strömungstechnischen Situation am Bauwerk und in der Kontaktzone eingegangen (Kapitel 7.3.2.2). Im Vorgriff auf die Ergebnisse lässt sich jedoch feststellen, dass die Betonierfugen die nachfolgend beschriebenen Injektionskampagnen nicht beeinflussten.

### 6.3 Injektionen am Bauwerk

Das Abdichten des Kontaktbereiches Dichtbaustoff/ Gebirge mithilfe von Injektionsmitteln war ein Meilenstein des STROEFUN III-Projektes. Dazu wurden in 4 Kampagnen Injektionsarbeiten am Halbdamm durchgeführt:

1. Kampagne Injektion mit Styromag-Suspension am 17.03.2022 - 9. vertikaler Injektionsring
2. Kampagne Injektion mit Epoxidharz am 22.03.2022 - 9. vertikaler Injektionsring + oberer, horizontal umlaufender Injektionsring
3. Kampagne Injektion mit MFBBa-Suspension am 03.06.2022 - 3. und 4. vertikaler Injektionsring
4. Kampagne Injektion mit MFBBa-Suspension am 09.06.2022 - 1. bis 4. vertikaler Injektionsring

Im Zuge der pneumatischen Tests (siehe Kapitel 8.5.2) zeigte sich, dass alle vertikalen Injektionsringe strömungstechnisch mit der Kontaktzone und den Ringkammern verbunden sind. Im Grunde funktionierten die Injektionsschläuche selbst wie Ringkammern und konnten sogar, mit Drucksensoren versehen, zur Messung der Druckausbreitung bei der Testung der Ringkammern verwendet werden (siehe Anlage 12.7). Die nachgewiesene strömungstechnische Verbindung der Injektionsschläuche wurde als optimale Voraussetzung für die nachfolgend beschriebenen Injektionsarbeiten gewertet. Dieses Verhalten wurde bei der Planung so im Projekt nicht vorhergesehen, da die Injektionsschläuche konstruktiv darauf ausgelegt wurden, nur einen Abstrom aus dem Schlauch heraus, aber nicht in den Schlauch hinein zuzulassen.

## 1. Kampagne

Aus pragmatischen Gründen wurde die erste Injektionskampagne mit einer MgO-Suspension auf Basis des für das Bauwerk verwendeten Styromag-MgO durchgeführt. Dabei wurde die nachstehende zum modifizierten A1 passende Rezeptur (Tabelle 11) angewendet. Das Verhältnis der  $MgCl_2$ -Lösung zum Styromag-MgO ist für den A1 stöchiometrisch fest vorgeschrieben, was zu einer relativ dünnflüssigen und sedimentationsgefährdeten Suspension führt. Deshalb wurde als Sedimentationsstabilisator Anhydritmehl hinzugefügt. An die zuzufügende Masse Anhydritmehl wurde sich über eine schrittweise Zugabe „herangetastet“. Ausschlaggebend für die Beurteilung war die Marsh-Trichterauslaufzeit (TAZ, Auslaufdurchmesser 10 mm) der hergestellten Suspension. Im Ergebnis wurde die in Tabelle 11 genannte Zusammensetzung mit einer TAZ=12 s und einer Dichte von  $1,81 \text{ g/cm}^3$  (ca.  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ) als geeignet angesehen und eingesetzt, siehe auch Anlage 8.1.

Tabelle 11: Zusammensetzung des Styromag-Injektionsmittels

Ausgangsstoff	Masse [kg]	Ma.-%
$MgCl_2$ -Lösung	15,8	50,2
Styromag- MgO	9,2	29,2
Anhydrit	6,5	20,6

Injiziert wurde unter Verwendung einer Schneckenpumpe „SP Star“ der Firma Dittmann. Die Injektion erfolgte im 9. vertikalen Injektionsring - hinterster vertikaler Injektionsring im Bauwerksverlauf (siehe Abbildung 81).

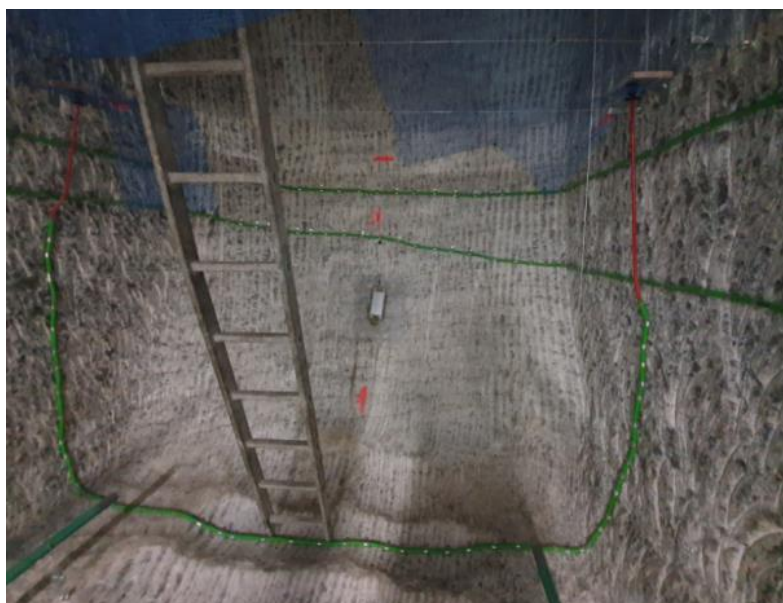


Abbildung 81: Verlauf des 9. vertikalen Injektionsrings

Mit Hilfe eines langen Stahldrahtes wurde vor der Injektion die Durchgängigkeit des 9. Injektionsschlauches getestet. Dabei wurde festgestellt, dass der Injektionsschlauch nicht durchgängig ist. An den beiden Anschlussseiten konnte der Draht nur ca. 0,7 m bzw. ca. 1,4 m eingeschoben werden. Eine Prüfung mit Druckluft ergab jedoch eine Durchgängigkeit.

Nach einseitigem Anschluss der Pumpe, wurde der Injektionsring mit Suspension gefüllt, bis die Suspension am offenen Ende des Injektionsrings austrat. Danach wurde das offene Ende geschlossen und mit dem Injizieren begonnen. Der Injektionsdruck stieg bis auf ca. 1,2 MPa an und fiel schlagartig bis auf ca. 0,7-0,8 MPa ab. Am Vorlagebehälter der Pumpe war ein Absinken des Vorratsspiegels sichtbar. Das Pumpen erfolgte so lange, bis keine Spiegeländerung im Vorlagebehälter mehr sichtbar war. Dann wurde bei 1,8 MPa das Druckmaximum

der Pumpe erreicht. Kurze Zeit nach dem Erreichen des Druckmaximums wurde durch visuelle Kontrolle des Vorratbehälters der Schneckenpumpe festgestellt, dass keine weitere Suspension verpresst wurde, da sich der Füllstand nicht mehr änderte. Der Versuch wurde an dieser Stelle beendet.

Folgende Volumendaten lassen auf eine injizierte Menge von 1,77 l Suspension schließen Tabelle 12.

Tabelle 12: Übersicht Volumina

Volumen verpumpt	2350 cm <sup>3</sup>
Volumen Injektionsleitung; L= 5,65 m, d <sub>i</sub> =0,011 m	540 cm <sup>3</sup>
Volumen Zuleitung; L=1,45 m d <sub>i</sub> =0,006 m	40 cm <sup>3</sup>
Volumen injiziert	1770 cm <sup>3</sup>

Ca. 10 min nach der Injektion wurde der Injektionsring mit reiner Anmachlösung gespült und danach die restliche Lösung mit Druckluft ausgeblasen. Das Ausblasen gelang nur mit zweifelhaftem Erfolg, worauf die Leitung ein zweites Mal mit MgCl<sub>2</sub>-Lösung gespült wurde. Dieser zweite Spülvorgang gelang nicht in der gleichen Weise, wie beim ersten Spüldurchgang. Es besteht die Vermutung, dass das Injektionsgut in den Injektionsschlauch zurückgedrückt wurde.

Mit diesem Stand wurden die Arbeiten eingestellt und 5 Tage später mit der Injektion von Epoxidharz fortgeführt.

## 2. Kampagne

Vor den nächsten Injektionsarbeiten wurde am 22.03.2022 eine Beaufschlagung der naheliegenden RK03 mit Gasdruck durchgeführt (siehe Test 09 in Anlage 12.8.2). Dabei zeigte sich, dass die Injektion der Styromag-Suspension keinen maßgeblichen Einfluss auf den Gasabfluss bzw. Druckabfall in der Ringkammer 3 (RK03) hatte.

Nach dem Test der Ringkammer 3 wurde der 9. (hinterste) Injektionsring nach der Mörtelinjektion vom 17.03.2022, mit Epoxidharz Epojet LV (Anlage 8.3) verpresst. Dafür wurde eine Hochdruckmembranpumpe (MINOVA CT-ET I) verwendet und 4 Liter Harz vorgelegt. Das Harz wurde mit Uranin (Natriumsalz des Fluorescein) getracert, was aber aber kaum Erfolg hatte, da Uranin für wässrige Lösungen verwendet wird.

Die Pumpe wurde mit einem 17 m langen Hochdruckschlauch an den Injektionsring angeschlossen, während das andere Ende des Injektionsringes offen blieb. Der Pumpendruck (gemessen an der Pumpe) betrug relativ konstant 4,0MPa, wobei ein geringerer Pumpendruck nicht einstellbar war. Damit wurden ca. 2,5 Liter Epoxidharz verpresst. Im Ergebnis kam es nicht zu einem Austritt von Harz am offenen Ende des Injektionsschlauchs. Danach wurde die Pumpe an das andere (bisher offene) Ende der Injektionsleitung angeschlossen und die restlichen 1,5 Liter verpresst. Da der Verpressvorgang sehr kontinuierlich verlief, wurden weitere 4 Liter Harz mit Tracer vorgelegt und weiter verpresst. Nachdem an beiden Enden der Injektionsleitung jeweils insgesamt ca.3,5 Liter Harz verpresst waren, wurde die Injektion beendet. Damit wurden insgesamt 7,0 Liter Harz in den 9. Injektionsring verpresst. Die Differenz von 1,0 Liter zu den ursprünglichen 8,0 Litern Harz entfällt auf das Volumen des Injektionsschlauchs und des Pumpenschlauchs.

Rein subjektiv wäre ein weiteres Verpressen möglich gewesen, da hinsichtlich des Injektionsdruckes und des Förderstromes keine Veränderung festgestellt wurde. Um jedoch ein unkontrolliertes Einpressen von einer großen Menge Harz in das Bauwerk zu verhindern, wurde die Injektion nach der angegebenen Menge von insgesamt 7,0Litern beendet.

Ca. 2,5 h nach der Injektion mit Harz wurde die naheliegende Ringkammer 3 (RK03) erneut mit Gasdruck getestet (siehe Test 10 Anlage 12.8.2). Auch dabei wurde kein maßgeblicher Einfluss auf den Gasabfluss bzw. Druckabfall in der Ringkammer 3 (RK03) festgestellt.

Nach der Testung wurde am gleichen Tag im Anschluss eine Injektion des oberen horizontalen Injektionsringes (ca. 33 m Länge) mit einer Styromag-Suspension mit der gleichen Rezeptur vom 17.03.2022 durchgeführt. Die Marsh-Trichterzeit betrug 17 s (12 s am 17.03.2022), die Dichte wurde nicht bestimmt. Der Injektionsschlauch des oberen horizontalen Ringes war auch mit bis zu 3 bar Druckluft nicht durchgängig, sodass nacheinander an beiden Enden des Injektionsschlauches verpresst wurde.

Insgesamt wurde ein Injektionsdruck von ca. 1,5 MPa aufgebaut und ca. 5,6 Liter Suspension verpumpt. Bei einem theoretischen Volumen des Injektionsschlauchs von ca. 3,3 Litern, muss von einer verpressten Suspensionsmenge von 2,3 Litern ausgegangen werden. Da der Injektionsschlauch nicht durchgängig war, konnte nach der Injektion auch keine Spülung vorgenommen werden.

Der Injektionsschlauch wurde bei ca. 1,5 MPa Suspensionsdruck verschlossen, sodass ein Aushärten unter Druck erfolgen konnte. Eine weitere Injektion mit Harz war damit an diesem oberen horizontalen Injektionsschlauch ausgeschlossen.

### 3. Kampagne

Anders als bei den ersten beiden Injektionskampagnen, wurde die 3. Kampagne im vorderen Bauwerksbereich zwischen der 1. und 2. Ringkammer durchgeführt. Am 03.06.2022 erfolgte in der 3. Injektionskampagne eine erste Injektion mit dem MgO-Injektionsbaustoff MFBBa (siehe Anlage 8.2.; Charge 284749 A9), welcher durch den Projektpartner BGE TECHNOLOGY GmbH zur Verfügung gestellt wurde.

Bei der Herstellung wurden 15,00 kg der Trockenmischung mit 15,00 kg Deusa S30 (Anmahlösung A1) unter 3 min Rühren mit ca.  $200 \text{ min}^{-1}$  (Mischer mit gegenläufiger Doppelwendel) gemischt. Die Temperatur der Mischung betrug  $28,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Dichte der Mischung wurde mit  $1,82 \text{ g/cm}^3$  und die Trichterauslaufzeit (Marsh-Trichter, 10 mm Düse) mit 9 s ermittelt.

Die erste Injektion erfolgte am 3. Injektionsring (1 m Abstand zu RK01, siehe Anlage 3), welcher bis zum Austritt des Injektionsmittels am offenen Ende befüllt wurde. Danach erfolgte der Verschluss des offenen Endes und es wurde mit dem Verpressen begonnen. Zum Einsatz kam wieder eine SP-STAR Pumpe (Exzentrerschnecke). Der Verpressdruck betrug ca. 1,7 MPa. Da keine Abnahme des Mischgutspiegels im Vorlagebehälter feststellbar war, erfolgte der Abbruch des Verpressens nach 3 min 40 s.

Direkt danach erfolgte die Injektion des 4. Injektionsringes (1 m Abstand zu RK02, siehe Anlage 3) in der gleichen Art und Weise, wie für den vorherigen 3. Injektionsring beschrieben.

Auch bei dieser Injektion war nach 4 min kein weiterer Eintrag des Injektionsguts MFBBa feststellbar, sodass auch diese Injektion abgebrochen wurde. Zum Ende der Injektionsversuche (ca. 1,5 h nach Anmischen der Suspension) betrug die Temperatur der Mischung  $30,2 \text{ }^\circ\text{C}$  und die Trichterauslaufzeit lag bei 8,5 s.

Ein erneuter Versuch mit der Hochdruck-Membranpumpe MINOVA CT-ET I scheitert an der Partikelfracht der MFBBa-Suspension, obwohl mit einem  $d_{95}$  von ca.  $20 \text{ } \mu\text{m}$  die Partikelgröße in der Suspension relativ klein ist (siehe Anlage 8.2).

Die Injektionsringe wurden nach den Injektionsversuchen mit jeweils ca. 1 Liter Salzlösung Deusa S30 gespült, bis die Salzlösung aus dem offenen Ende klar austrat. Danach wurde die in den vertikalen Injektionsleitungen stehende Salzlösung mit Druckluft ausgeblasen.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass, im Gegensatz zu den ersten beiden Injektionskampagnen im hinteren Bauwerksteil, in der 3. Kampagne im vorderen Bauwerksteil, kein Injektionserfolg mit einem partikelgestützten Injektionsmaterial erreicht werden konnte.

#### 4. Kampagne

Am 09.06.2022 wurde die 4. und letzte Injektionskampagne durchgeführt. Dabei sollten die Injektionsringen Nr. 1 bis Nr. 4 im vorderen Bauwerksteil injiziert werden.

Die hinteren Injektionsringe Nr. 5 bis Nr. 9 (ab der 2. Ringkammer RK02) wurden innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr verwendet, um die hintere Bauwerkshälfte unbeeinflusst für die Wirkung der Gebirgskonvergenz zu belassen.

Vor den Injektionsarbeiten wurden die 4 Injektionsringe mit Salzlösung DEUSA S30 gespült, wobei teilweise weiße Bröckchen / Flocken Ø 1-3 mm ausgespült wurden. Danach erfolgte ein Ausblasen der Salzlösung mit Druckluft.

Für die Herstellung der MFBBa-Suspension wurden 15,00 kg der Trockenmischung mit 15,00 kg Deusa S30 (Anmachlösung A1) unter 3 min Rühren mit ca.  $200 \text{ min}^{-1}$  (Mischer mit gegenläufiger Doppelwendel) gemischt. Die Temperatur der Mischung betrug  $30,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Dichte der Mischung betrug  $1,91 \text{ g/cm}^3$  und die Trichterauslaufzeit (Marsh-Trichter 10mm Düse) wurde mit 8 s ermittelt.

Anders als bei den bisherigen Verpressversuchen, wurde in der 4. Injektionskampagne eine Handhebelpumpe verwendet. Die verwendete Handhebelpumpe besitzt einen Kolbenhub von  $25 \text{ cm}^3$  und erreicht über den Handhebel einen Arbeitsdruck von maximal  $7,0 \text{ MPa}$ .

Der Vorteil einer Handhebelpumpe ist das direkte haptische Feedback und die feine Dosierung des Druckaufbaus. Auch ein etwaiger Abstrom des Injektionsguts lässt sich über die Bewegung des Handhebels in Bruchteilen von Kubikzentimetern recht gut „fühlen“, während das Injektionsvolumen über das Abzählen der Kolbenhübe bestimmt werden kann.

Ein Nachteil der Handhebelpumpe, ist die relativ mangelhafte Erzeugung eines kontinuierlichen Förderstroms des Injektionsguts, was für den Injektionserfolg mit partikelgestützten Injektionsmaterialien optimal wäre. Auch hohe Förderraten lassen sich mit einer Handhebelpumpe nicht erreichen.

Die Befüllung des 3. Injektionsringes erfolgte mit 30 Kolbenhüben (ca.  $750 \text{ cm}^3$  bis das Injektionsmittel am offenen Ende austrat. Danach wurde der Injektionsring mit 50 Kolbenhüben (ca.  $1250 \text{ cm}^3$ ) mit dem Injektionsmaterial gespült und anschließend das offene Ende verschlossen.

Sofort wurde mit dem Druckaufbau begonnen, wobei ein maximaler Injektionsdruck von ca.  $7,0 \text{ MPa}$  innerhalb von 1-2 Kolbenhüben erreicht wurde. Ein Abstrom des Injektionsmaterials war nicht spürbar.

Direkt danach erfolgte die Injektion des 4. Injektionsringes (1 m Abstand zu RK02, siehe Anlage 3) in der gleichen Art und Weise, wie am vorherigen 3. Injektionsring beschrieben. Dabei wurde eine Undichtheit am Kunststoffgewinde des Injektionsanschlusses (Schalungspacker) festgestellt, wodurch maximal  $4,0 \text{ MPa}$  Injektionsdruck aufgebaut werden konnte. Da in der Situation unter Tage die festgestellte Undichtigkeit irreparabel eingeschätzt wurde, wurde der 4. Injektionsring ungespült abgeworfen. Anschließende Injektionen sind damit am 4. Injektionsring nicht ausführbar, da dieser nun mit MFBBa-Suspension verfüllt ist.

Im Anschluss wurde der 1. Injektionsring (siehe Anlage 3) mit 30 Kolbenhüben mit Injektionsmaterial gefüllt und mit 50 Kolbenhüben gespült. Auch am ersten Injektionsring wiederholte

sich die bisherige Beobachtung, dass, nach dem Schließen des offenen Endes, kein Abstrom des Injektionsmaterials MFBBa aus dem Injektionsring registrierbar war.

Der 1. und 3. Injektionsring wurde im Anschluss mit jeweils ca. 4 - 5 Liter Anmachlösung Deusa S30 gespült. Während des Spülens wurde testweise in den 1. Injektionsring ca. 50 cm<sup>3</sup> (2 Kolbenhübe) Lösung bei ca. 6,0 MPa eingepresst. Am 3. Injektionsring wurde testweise beim Spülen ca. 75 cm<sup>3</sup> (3 Kolbenhübe) Anmachlösung bei ca. 5,0 MPa eingepresst. Die Spüllösung wurde am Ende der 4. Kampagne nicht aus dem 1. und 3. Injektionsring ausgeblasen.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass, trotz nachgewiesener strömungstechnischer Anbindung aller Injektionsschläuche an den Kontaktbereich, im vorderen Bauwerksbereich keine nachweisbare Injektion mit einer partikelgestützten MFBBa-Suspension bei Drücken bis 7,0 MPa erreicht werden konnte.

Die Tatsache, dass die partikelfreie und vergleichsweise niedrigviskose Anmachlösung injiziert werden konnte, lässt vermuten, dass im vorderen Bauwerksbereich partikelfreie Injektionsmittel mit größeren Injektionsdrücken als 7,0 MPa zu einem Injektionserfolg geführt hätten. Es steht des Weiteren zu vermuten, dass, gerade in sehr feinen Rissnetzwerken, welche typisch für eine saline Auflockerungszone sind, nur dann ein Injektionserfolg erreicht werden kann, wenn die Injektionsdrücke zu einem Aufweiten des Netzwerkes und damit zu einem besseren Eindringen des Injektionsmaterials führen.

## 7 Charakterisierung des Bauwerkes und des Standortes

### 7.1 Geophysikalische Untersuchungen

#### 7.1.1 Zielsetzung

Ziel der geophysikalischen Untersuchungen war es, mit der Mikroseismik Bruchvorgänge nach Betonage zu erfassen während die Geoelektrik und das Bohrlochradar dazu dienen sollten, eine detaillierte Betrachtung der Ausbildung von Zonen erhöhter Permeabilität im Kontaktbereich sowie der Injektion innerhalb des Kontaktbereiches zu erhalten. Für die Messungen mit Geoelektrik und Bohrlochradar wurden unterhalb des Dammes zwei horizontale Bohrlöcher im Salzgestein abgeteuft (Abbildung 82). Weiterhin zeigt Abbildung 82 einige Installationen für die geophysikalischen Messungen.



Abbildung 82: a) Dammbauwerk mit den Bohrlöchern für die Geoelektrik, unten links, und Bohrlochradar, unten rechts. Beide Bohrlöcher wurden im Salzgestein unterhalb des Dammbauwerkes abgeteuft, b) Schutzkiste des Datenrekorders der Mikroseismik imc Cronos Flex mit Kabelanschlüssen zu den Schwingungsmessern, c) auf dem Dammbauwerk verschraubter Beschleunigungsaufnehmer Hersteller PCB, Modell 356B18, d) Bohrlochradarantenne Fa. Geoscanners, Modell BA1000 mit 1000 MHz mit Kabel, e) Geoelektrik Steuereinheit Fa. ABEM Terrameter LS, f) Messrad für die Bohrlochradarmessung

Die geophysikalischen Messungen wurden an drei voneinander getrennten Messtagen ausgeführt. Am 13.08.2021 zwei Wochen nach Fertigstellung des Dammes, am 27.08.2021 vier Wochen nach Fertigstellung und am 23.03.2022 nach der Injektion.

## 7.1.2 Durchführung und der Ergebnisse der geophysikalischen Messungen

### 7.1.2.1 Mikroseismik

Am 13.08.2021 wurde die Mikroseismik auf dem Damm installiert und am 21.04.2022 final abgebaut. Für die Mikroseismik wurden auf dem Damm vier Beschleunigungssensoren in der in Abbildung 83 dargestellten Konfiguration befestigt. Sie wurden dazu auf fest mit dem Damm verbundenen Sockeln verschraubt. Die Abstände von der Stirnfläche des Halbdammes und zwischen den Sensoren sind in der Lageskizze (Abbildung 83) eingetragen. Da eine am Projektanfang vorgeschlagene permanente Datenverbindung zum Datenrekorder untertage nicht realisiert werden konnte, wurden die Daten mittels Datenrekorder aufgezeichnet. Dazu waren alle Sensoren mit dem Datenrekorder über Kabel verbunden. Durch Stromunterbrechungen kam es zu ungeplanten Unterbrechungen in der Aufzeichnung des Datenrekorders. Weiterhin konnte das Auslesen der Speicherkarte durch Änderungen im Projektverlauf nicht zu den vorgeplanten Zeiten erfolgen. Die Größe der Speicherkarte wurde daher erweitert, um längere Zeiträume aufnehmen zu können. Auswertbare Datenreihen liegen für die Zeiträume 13.08.2021 - 19.08.2021 und 23.03.2022 - 29.03.2022 vor.

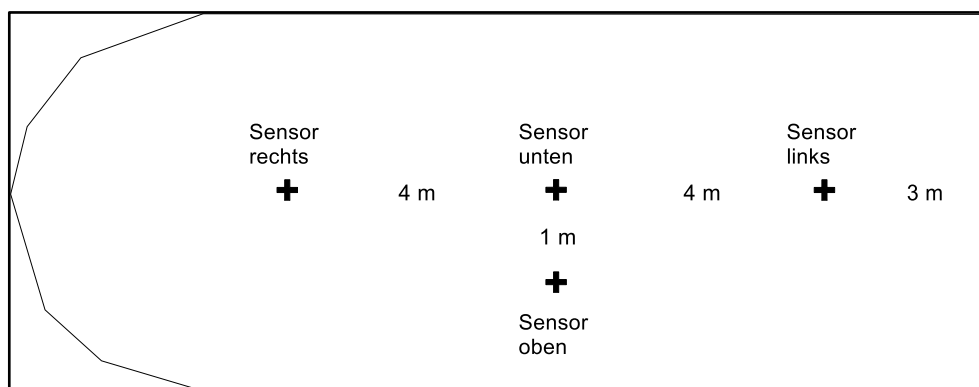


Abbildung 83: Lageskizze der Mikroseismik-Sensoren, links die Ortsbrüst, rechts die Schalung

Die mikroseismische Überwachung konnte zahlreiche Bruchvorgänge am Damm aufzeichnen. Abbildung 84 zeigt beispielhaft ein Seismogramm eines Bruchvorgangs. Weiterhin wurden Phasen mit Arbeiten erkannt. In Abbildung 85 sind zwei Zeiträume mit kontinuierlichen Erschütterungen durch Arbeiten durch die intensiven Ausschläge zu erkennen. Bruchereignisse sind erheblich kürzer, etwa 1/10 Sekunde, als Phasen mit Arbeiten. So lassen sich Bruchereignisse und Phasen mit Arbeiten deutlich unterscheiden.

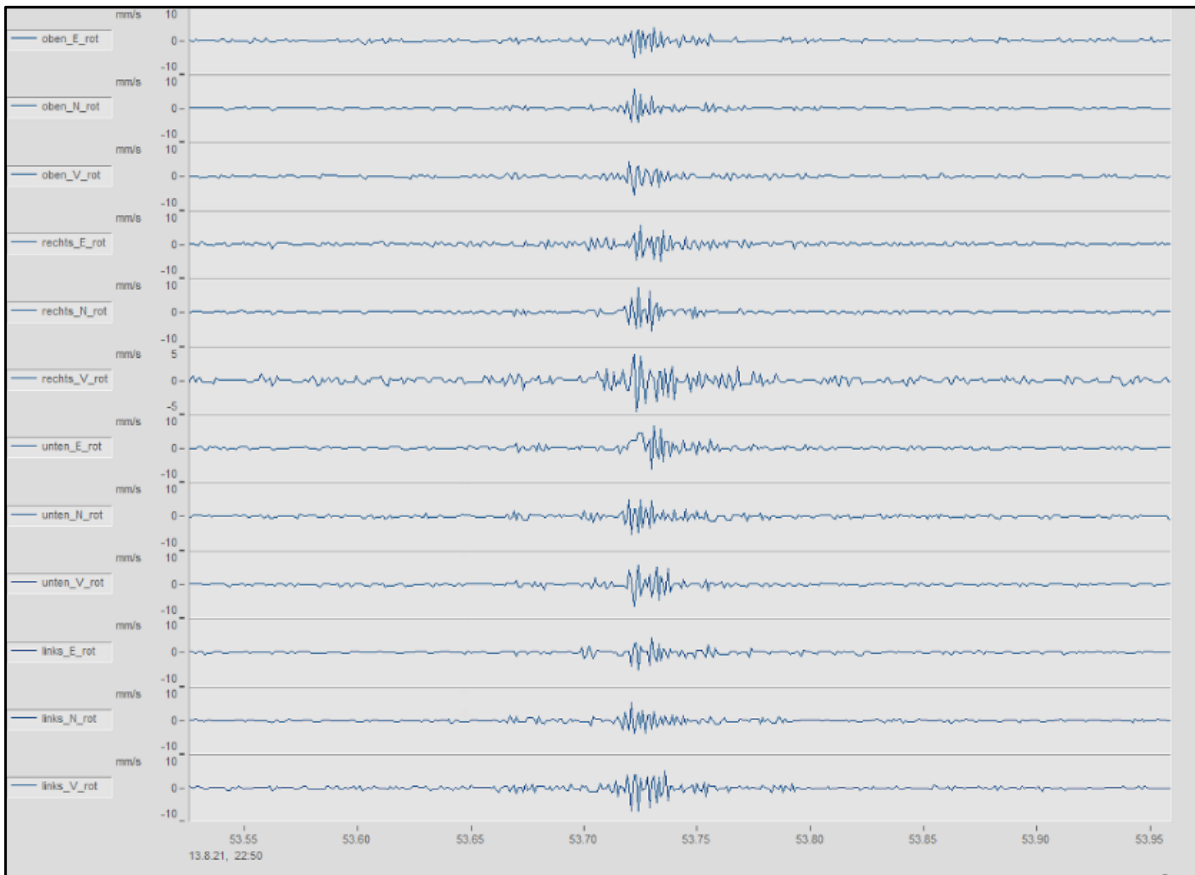


Abbildung 84: Seismogramm eines Bruchvorgangs

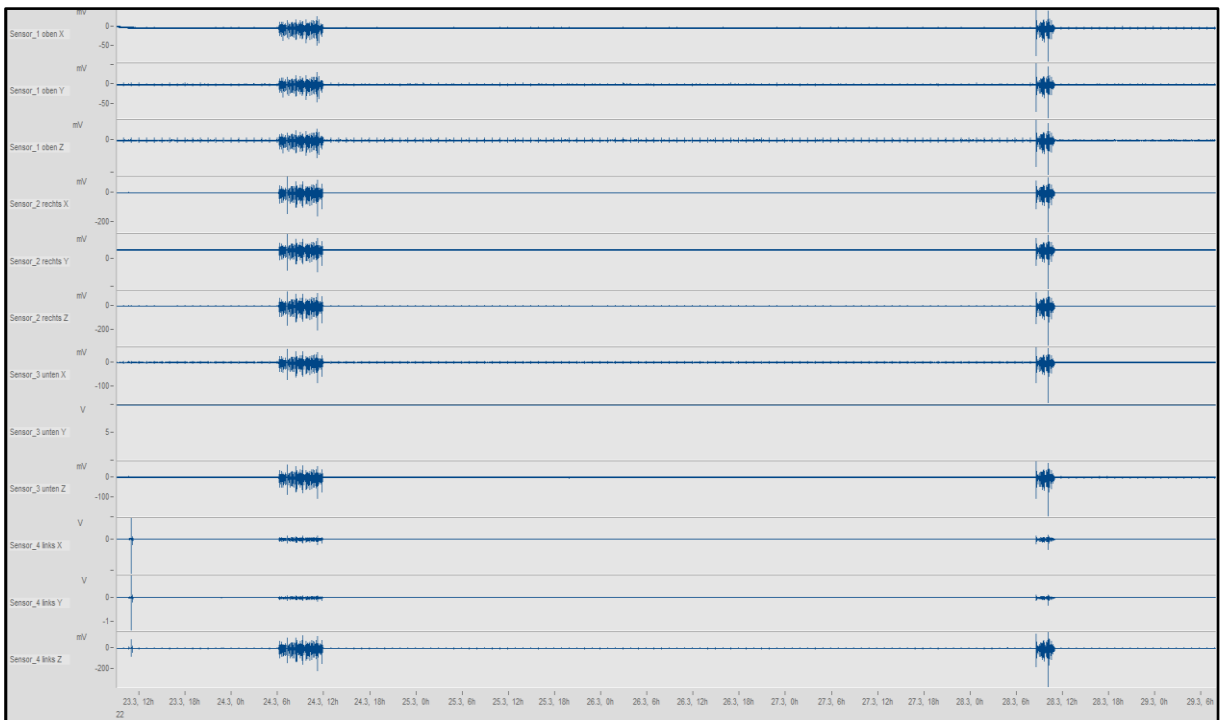


Abbildung 85: Zwei Zeiträume mit Arbeiten am Damm

Die Ortung der Bruchvorgänge ergab zwei Punkte auf dem Damm, an denen sich die Ortungen gruppierten. Auch eine Änderung der Zellengröße bei der Ortung lässt die Ortungsergebnisse am Damm an diese beiden Fixpunkte fallen. Abbildung 86 zeigt die Lage an einer Skizze des Dammes.

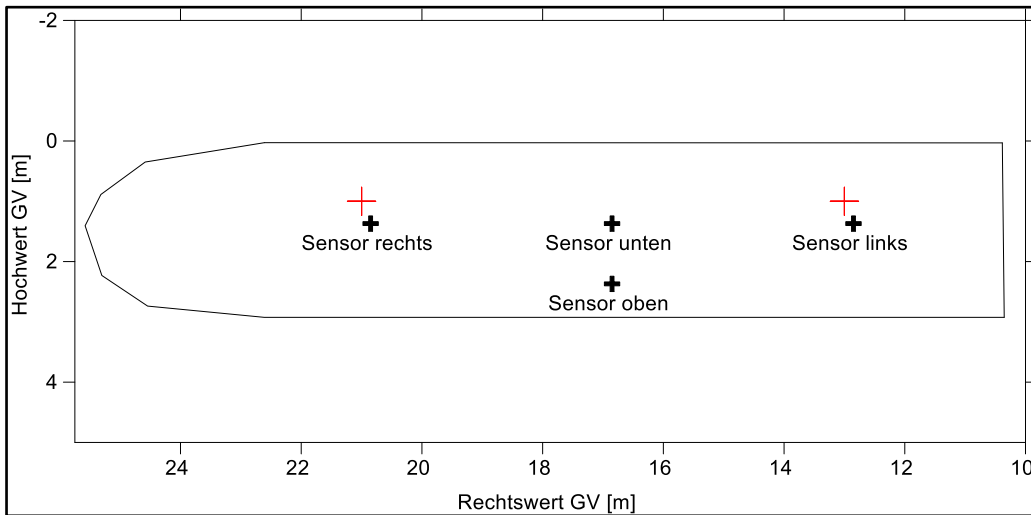


Abbildung 86: Ortungsergebnisse Seismik im Koordinatensystem der Glückauf Vermessung

In Tabelle 13 die Ortungsergebnisse der seismischen Ereignisse des Damms aufgelistet. Die Tiefenlage ist bei allen Ergebnissen 0 m. Da alle vier Sensoren in einer Ebene lagen, ist eine Höhenzuordnung außerhalb dieser Ebene schwierig. Die Ortungen berechnen so alle Herdlagen in der Höhe der Sensoren auf der Oberfläche des Damms.

Tabelle 13: Ortungsergebnisse Seismik

Datum	Uhrzeit	X	Y	Z
		[m]	[m]	[m]
13.08.2021	07:21:30a	21	1	0
13.08.2021	07:21:30b	13	1	0
16.08.2021	21:25:19	21	1	0
17.08.2021	01:20:44	13	1	0
23.03.2022	09:05:23a	13	1	0
23.03.2022	09:05:23b	13	1	0
26.03.2022	03:01:14	13	1	0

Im Ergebnis der Mikroseismik konnten im Mittel 0,6 Bruchvorgänge pro 24 Stunden aus den Daten abgeleitet werden, die sich auf zwei Bereiche konzentrierten.

### 7.1.2.2 Geoelektrik

Die Geoelektrikelektroden wurden an die Oberseite des Bohrlochs mit Spezialausrüstung durch die K-UTEC im Steinsalz gesetzt. Der Abstand zwischen den Elektroden betrug 0,15 m. Die erste Elektrode befand sich 0,3 m vom Stoß der Bohrsenke im Bohrloch. Insgesamt ergibt sich so eine Profillänge von 3,45 m. Die Messungen wurden mit drei unterschiedlichen Konfigurationen ausgeführt - Wenner, Dipol-Dipol und Gradient. Aufgrund der schlechten elektri-

schen Ankopplung zwischen Elektroden und Gestein konnten am 13.08.2021 keine verwertbaren Ergebnisse über die gesamte Messstrecke erzeugt werden. An den weiteren Terminen wurde das Innere des Bohrlochs der Geoelektrik auf der gesamten Länge mit Lauge möglichst homogen neu angefeuchtet, sodass eine ausreichende elektrische Ankopplung der Elektroden gegeben war. Am 27.08.2021 und am 23.03.2022 Termin wurden Geoelektrikmessungen ausgeführt.

Direkt an den Elektroden variierte der spezifische Widerstand stark. Dies wird einerseits durch eine ungleichmäßige Befeuchtung und andererseits durch die Modellrückrechnung (Vollraum/Halbraumsituation) im Nahfeld hervorgerufen. So hatte sich in einigen Bereichen Lauge stärker angesammelt und so zu einem besonders niedrigen Widerstand geführt, wohingegen ein stärkeres Abfließen einen erhöhten Widerstand bedingte. Die Werte direkt am Bohrloch zwischen Einzelelektroden werden daher hier nicht interpretiert.

Die Daten der Messung am 27.08.2021 zeigten eine Zunahme der spezifischen Widerstände mit der Bohrlochtiefe. Die spezifischen Widerstände der Messung am 23.03.2022 hatten gegenüber der vorherigen im bohrlochtieferen Drittel abgenommen.

Am 27.08.2021 lagen die spezifischen Widerstände zwischen unter 10  $\Omega$ m am Stoß der Bohrsenke und etwa 10.000  $\Omega$ m bei über 3 m Bohrlochtiefe. Am 23.03.2022 wurden nur noch maximal 70  $\Omega$ m im tieferen Teil der Bohrung gemessen, wobei die spezifischen Widerstände stoßseitig ähnlich blieben. Ein Anstieg der spezifischen Widerstände mit zunehmender Bohrlochteufe blieb erhalten. Die Widerstände lagen bohrlochnah immer niedriger als bohrlochfern. Zwischen den einzelnen Messkampagnen wurde die Bohrung offengelassen.

Die Messungen werden hier nur bezüglich des Parameters Feuchtigkeit interpretiert. Inwieweit eine Umkristallisation des Baustoffes die Leitfähigkeit beeinflusst, ist nicht bekannt. Die Ergebnisse deuten auf eine Zunahme der Feuchtigkeit am zweiten Messtag hin. Durch einen höheren Wassergehalt im Material können sich die Teilchen im Materialgitter leichter bewegen und sind so für die reduzierten spezifischen Widerstände und damit erhöhte elektrische Leitfähigkeit verantwortlich. Anhand der Geoelektrikergebnisse scheint eine Feuchtigkeitsänderung großflächig ausgeprägt zu sein. Die inverse Modellierung löst keine spezielle feuchte Schicht auf, die auf eine Ausbreitung der Injektion entlang der Grenzfläche zwischen Damm und Gebirge hindeutet.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Geoelektrik bei der ersten Messung eine starke Abnahme der spezifischen Widerstände im Bereich ab rund 2,5 m vom Stoß der Bohrsenke nachwies. Vier Wochen nach dem Errichten lagen spezifische Widerstände in diesem Bereich bei rund 10.000  $\Omega$ m, sechs Monate später nach der Injektion waren sie um einen Faktor 100 kleiner bei ~ 70  $\Omega$ m. Dieses Ergebnis, eine verbesserte Leitfähigkeit, deutet allgemein auf eine Zunahme der Feuchtigkeit in dem Bereich hin. Die Injektion konnte nicht aufgelöst werden, so dass dieses Ziel nicht erreicht wurde.

### **7.1.2.3 Bohrlochradar**

Für die Bohrlochradarmessungen wurde eine 100 MHz Bohrlochradarsonde verwendet, in der Sender und Empfänger kombiniert sind. Die Auslösung der Einzelmessungen erfolgte über ein Messrad außerhalb der Bohrung, über welches das Verbindungskabel zur Sonde lief. Die Sonde wurde mittels Handschubgestänge ins Bohrloch eingeschoben und herausgezogen. Die Messdaten wurden über das Kabel an die Steuerelektronik übertragen und auf einem Bildschirm dargestellt. Um Fehler der Längenmessung des Laufrades auszuschließen, wurden je eine Messung beim Einschieben und Herausziehen der Sonde aufgezeichnet. Die örtliche Zuordnung der Messdaten erfolgte über die Daten der Bohrlochabweichungssonde.

Mit den drei Messungen vom 13.08.2021, 27.08.2021 und 23.03.2022 wurden drei Radargramme erstellt. Es wurde jeweils die gesamte Bohrlochlänge von 16 m mit der Antenne abgefahren. Da die Antenne omnidirektional misst, wurde pro Messung nur ein Radargramm aufgenommen.

In allen drei Radargrammen sind Reflektoren enthalten. Diese Reflektoren wurden durch Metalle der Dammkonstruktion, Stahlträger, Stahlseile und Leitungen verursacht. Diese überdecken hier die wesentlich schwächeren Signale der Kontaktflächen zwischen Damm und umgebendem Salzgestein.

Eine interne Schichtung im Damm, die aus den Befüllungsphasen hervorgeht, konnte nicht als Reflektoren abgebildet werden. Die einzelnen Lagen identischen Materials liegen dicht aufeinander, sodass keine Reflexion der Wellen entstand. Insgesamt konnte mit der Radarmessung keine zeitliche Änderung des Dammes nachgewiesen werden.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass die Radargramme des Bohrlochradars durch Reflexionen der Damm- und Messinfrastruktur geprägt wurden. Eine Auflösung der inneren Struktur des Dammes war nicht möglich, da der Dammkörper selbst offensichtlich so homogen ist, dass keine Reflexionen entstanden. Dagegen verursacht die übrige Infrastruktur eine sehr hohe Störhyperbelüberblendung. Dies deutet auf einen kompakten Einbau ohne Hohlräume hin. Auch wenn das ursprüngliche Ziel die Kontaktflächen zu identifizieren nicht erreicht wurde, ist jedoch die Interpretation der hohen Homogenität des Baukörpers ein Indikator dafür, dass die Betonierfugen möglicherweise nur eine geringere Bedeutung haben.

## **7.2 Monitoringergebnisse**

Die hydraulischen Parameter effektive Permeabilität und Porosität, die bestimmend für den gegenständlichen Funktionsnachweis für das Bauwerk sind, werden mittels Parameteridentifikation bestimmt. Grundlage der Parameteridentifikation ist ein begründetes hydraulisches Strömungsmodell des untersuchten Systems. Dies gilt auch für die hier angestrebte gegenständliche Funktionsbewertung des Dammbauwerkes. Je komplexer ein solches Modell für die Parameteridentifikation jedoch ist, desto mehr Freiheitsgrade besitzt es, die das Identifikationsergebnis beeinflussen können. Deshalb ist es hilfreich bzw. notwendig die Zahl der Freiheitsgrade durch unabhängige Parameterermittlungen zu beschränken. Deshalb wird die strömungstechnische Situation am Standort nach Betonage erneut ermittelt, um Änderungen gegenüber dem Zustand vor Betonage zu erfassen, wobei das Untersuchungsprogramm für das Salinar weitestgehend identisch ist, vgl. Kapitel 5.7.1 und Kapitel 7.3.1.

Weiterhin müssen für das Identifikationsmodell die thermodynamischen Randbedingungen soweit bekannt sein, dass sie auch als Randbedingungen für das Identifikationsmodell genutzt werden können. Dies ist die Zielsetzung der in Kapitel 7.2.2 und Kapitel 7.2.3 beschriebenen Monitoringergebnisse. Sie bilden eine Grundlage für die Auswertung der Bauwerkstestung im Rahmen der gegenständlichen Funktionsbewertung.

Nicht zuletzt beeinflusst auch die mechanische Einspannung und die Einspanndauer die Permeabilität der Kontaktzone und damit das anfangs als maßgeblich angesehene Element des hydraulischen Systems.

Deshalb erfolgt über die Bestimmung der strömungstechnischen Situation hinaus das zeitabhängige Monitoring der Entwicklung der mechanischen Einspannung, der Temperaturentwicklung im Baukörper und am Standort sowie die Erfassung der Klimadaten Lufttemperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte.

## 7.2.1 Entwicklung der mechanischen Einspannung

Wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, wurden 3 kabellose Plattendruckaufnehmer in den Kontaktbereichen zwischen Salzgebirge und MgO-Baustoff installiert. Die kabellos gemessenen Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke sind in der Anlage 9.1.1 bis Anlage 9.1.5 dargestellt.

Der Beginn der Betonage am 26.07.2021 ca. 11 Uhr wurde auch an den kabellosen Plattendrucksensoren registriert (Anlage 9.1.2). Dies betrifft primär den in der Sohle positionierten KLS-01. Die gemessene Temperatur steigt aus dem Ruheniveau von ca. 26 °C kontinuierlich an und erreicht noch vor Abschluss der Betonage, am 28.07.2021 um ca. 12 Uhr, ein Maximum von ca. 48 °C. Die Sensoren in den beiden Stößen (KLS-02 und KLS-03) erreichen das Temperaturmaximum etwa 12 h später zum Ende der Betonage mit ebenfalls ca. 48 °C bzw. 50 °C.

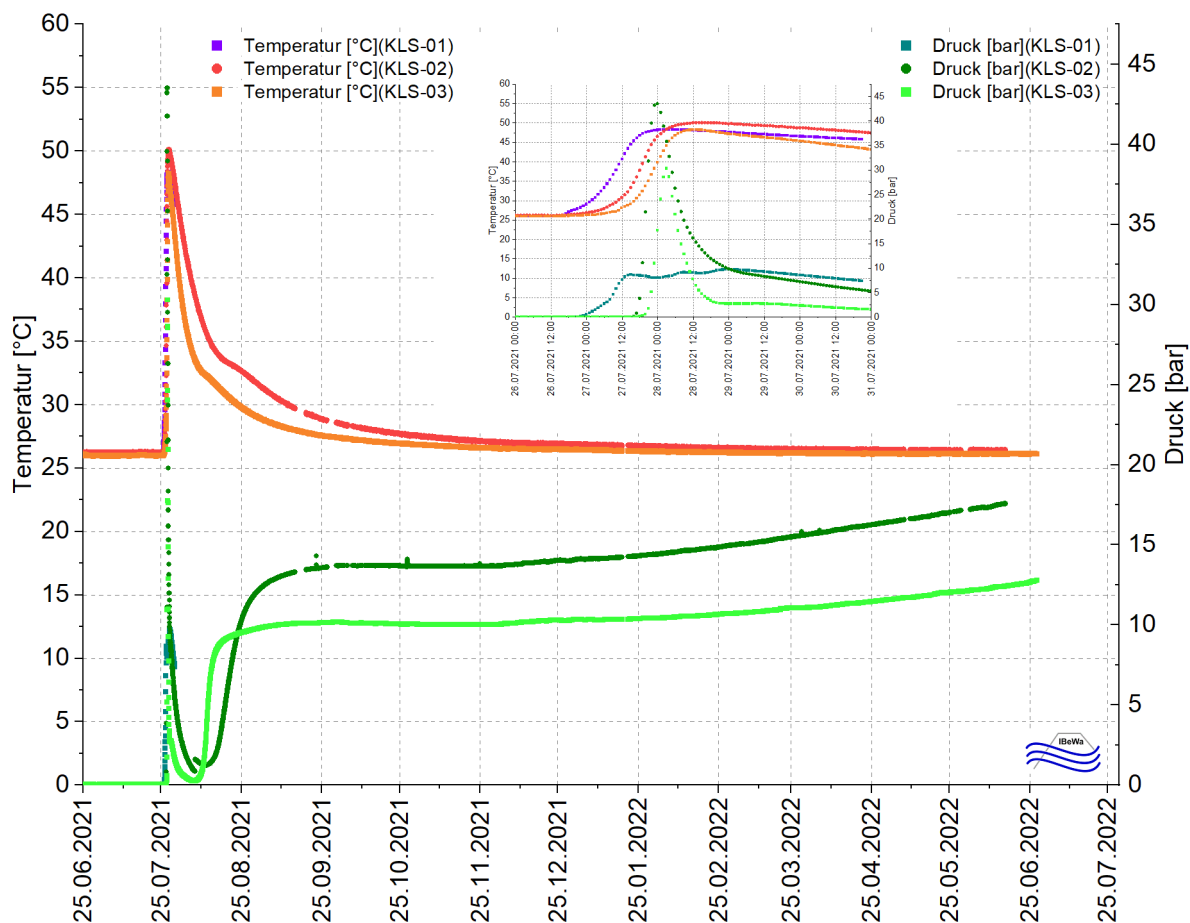


Abbildung 87: Aufgezeichnete Daten der kabellosen Plattendrucksensoren (inkl. der Temperaturdaten in den Sendergehäusen)

Ungefähr 12 h vor dem Temperaturmaximum des Sensors KLS-01 auf der Sohle, wird ein lokales Druckmaximum von ca. 8,7 bar auf der Sohle registriert. Danach verzeichnet der Druckverlauf einen leicht schwankenden Anstieg bis auf ein Maximum von ca. 9,9 bar ungefähr 12 h nach dem Ende der Betonage. Danach fällt der Druck langsam aber stetig wieder bis auf ca. 7,4 bar ab.

Im Verlauf des Druckabfalls fiel der Plattendrucksensor KLS-01 auf der Sohle aus. Ungefähr 1 Monat nach dem Ausfall konnten einige wenige Datenpakete empfangen werden, welche aber nur Systemparameter des Senders enthielten. Daraus ergibt sich die Vermutung, dass ein Problem mit einem Spannungsregler vorliegen könnte, da die Systemspannung oberhalb des Arbeitsbereichs lag. Grundsätzlich muss bedacht werden, dass unzugänglich eingebaute kabellose Sensorik den gleichen Herausforderungen ausgesetzt ist, wie sie bspw. in der Satellitentechnik auftreten.

Ebenfalls ca. 12 h vor dem Temperaturmaximum registrierten die beiden Sensoren in den Stößen ein Druckmaximum von ca. 44 bar (KLS-02) und ca. 30 bar (KLS-03). Im Unterschied zum Sensor in der Sohle liegen die Druckmaxima in den Stößen deutlich höher und werden in nur der Hälfte der Zeit, nach ca. 6 h, erreicht. Innerhalb weniger Stunden, noch vor Erreichen des Temperaturmaximums, fallen die seitlichen Kontaktdrücke unterhalb des Druckniveaus in der Sohle bei KLS-01, das zu diesem Zeitpunkt etwa 10 bar beträgt.

Danach ist eine weitere stetige Abnahme der seitlichen Kontaktdrücke zu verzeichnen, welche bis zu 2 Wochen anhält und ein Minimum im Bereich von 1 bar bis 2 bar erreicht. Zeitgleich sinken auch die Temperaturen im Kontaktbereich auf ein Niveau von ca. 35 °C.

Während die Temperaturen danach weiter absinken, kommt es nach dem Minimum der Kontaktdrücke wieder zu einem ebenso schnellen Druckanstieg innerhalb von ca. 2 Wochen für den hinteren Sensor KLS-03) und bis ca. 4 Wochen für den Sensor KLS-02 am SE-Stoß.

Im Verlauf des Kontaktdrucks (KLS-02) am SE-Stoß zeigt sich im Bereich des Minimums des Verlaufs am 07.08.2021 ein auffälliger Sprung von 0,85 bar auf 1,62 bar. Es liegt die Vermutung nahe, dass es in Folge eines Bruchvorgangs zu einer lokalen Spannungsumlagerung gekommen ist. Da zu diesem Zeitpunkt die Ausrüstung zur Überwachung der Mikroseismik noch nicht installiert war, konnte dieser Vermutung nicht weiter nachgegangen werden. Die Ergebnisse der Mikroseismikuntersuchungen, welche ab dem 13.08.2021 durchgeführt wurden, zeigten jedoch, dass im Mittel alle 40 h ein Bruchvorgang stattgefunden hat, die sich auf zwei Bereiche konzentrierten.

Im Zeitraum von 10/2021 bis 12/2021 stagnierte der Kontaktdruck am SE-Stoß KLS-02 im Bereich von ca. 13,7 bar. Danach stieg der seitliche Kontaktdruck mit durchschnittlich 0,7 bar/Monat an und erreichte am Ende des Projektes ca. 17,6 bar.

Im Zeitraum von 9/2021 bis 12/2021 stagnierte der seitliche Kontaktdruck für den Sensor KLS-03 im Bereich von ca. 10,0 bar. Danach stieg auch dieser Kontaktdruck mit durchschnittlich 0,5 bar/Monat an und erreicht am Ende des Projektes ca. 12,8 bar.

Dass der hintere seitliche Kontaktdruck geringer als der seitliche Kontaktdruck am SE-Stoß ist, kann nur mit der Lage und Neigung am Damm erklärt werden. Der seitliche Plattendruckaufnehmer KLS-02 (siehe Abbildung 35) ist im Verlauf der nach unten geneigten seitlichen Stöße montiert. Durch diese Neigung soll eine vertikale Verspannung des kristallisierenden MgO-Baustoffs und damit ein Ausdehnen in Richtung der offenen Oberfläche minimiert werden (siehe Bauwerkskonzept in Kapitel 4.3). Der hintere seitliche Plattendruckaufnehmer KLS-03 (siehe Abbildung 36) ist, wie der gesamte hintere Stoß in entgegengesetzter Richtung, also nach oben, geneigt. Dadurch ist in diesem Bereich eine deutlich weniger wirksame Einspannung des Bauwerks zu erwarten, was auch messtechnisch nachgewiesen wird.

Der langfristige Verlauf der steigenden Kontaktdrücke lässt eine zunehmende Einspannung des Halbdammes durch das aufkriechende Gebirge vermuten.

Neben den sich langfristig einstellenden Kontaktdrücken, wurden am seitlichen Plattendruckaufnehmer KLS-02 auch kurzfristige Einflüsse der pneumatischen Tests aus der horizontalen Schlauchkammer HK02 (Entfernung HK02 und KLS-02 ca. 0,3 m) erfasst. Da die kabellosen Sensoren überwiegend im Messtakt von 1 h operierten, wurden die kurzfristigen Gasdruckimpulse der Tests nur zufällig registriert, Anlage 9.1.3.

Am 23.09.2021 wurden alle 5 Schlauchkammern gleichzeitig mit ca. 3 bar Überdruck beaufschlagt. Dies hatte zur Folge, dass am seitlichen Plattendruckaufnehmer KLS-02 kurzzeitig ein ca. 1 bar höherer Druck registriert wurde. Nach ca. 4 h hatte sich wieder das ursprüngliche Niveau des Kontaktdrucks von ca. 13,5 bar eingestellt (siehe Anlage 9.1.3).

Am 28.10.2021 wurden erneut alle 5 Schlauchkammern gleichzeitig mit ca. 3 bar Überdruck beaufschlagt. Dabei wurde der Messtakt der kabellosen Sensoren auf einen Messtakt von

1 min eingestellt, um den Verlauf des pneumatischen Tests besser zu erfassen (siehe Anlage 9.1.4). Es erfolgten 2 Gasdrucktests hintereinander mit ca. 3 bar bzw. 4,5 bar Überdruck. Dabei wurde nahezu konstant am Plattendrucksensor eine Druckerhöhung von ca. 0,4 bar registriert. Der eingeleitete Gasdruckimpuls klingt innerhalb von ca. 2 h ab und es wird wieder das ursprüngliche Druckniveau erreicht.

Auch am 29.03.2022 wurde die horizontale Schlauchkammer HK02 mit ca. 4 bar Überdruck getestet (Anlage 9.1.5). Dabei stieg der gemessene Kontaktdruck am seitlichen Plattendrucksensor innerhalb von ca. 17 min von 15,6 bar auf 15,8 bar und fiel innerhalb von 4 h wieder auf das Ausgangsniveau zurück.

Grundsätzlich zeigte sich bei diesen Beobachtungen, dass im Kontaktbereich aus intrinsisch porösem MgO-Baustoff und aufgelockertem Steinsalzgestein das Konzept der effektiven Spannungen nach TERZAGHI für die realen Spannungsverhältnisse kurz nach der Betonage angewendet werden kann.

Es ist zu erwarten, dass mit zunehmender Standzeit die aufgelockerte Steinsalzkontur wieder kompaktiert und der Einfluss der salinaren Auflockerungszone abnimmt.

Die beiden kabellosen Sensoren in den Stößen (KLS-02 und KLS-03) arbeiteten während der Projektlaufzeit zuverlässig und haben bis zum Projektende nahezu kontinuierlich Daten geliefert. Einzelne Datenlücken entstanden durch Probleme mit der Bluetooth-Verbindung zwischen der Empfangsstation und dem Laptop beim Auslesen der empfangenen Daten. Mit Beendigung des Projektes wurde der Messtakt der beiden funktionstüchtigen kabellosen Sensoren auf 3 Messungen pro Tag reduziert, wodurch noch für mehrere Jahre Daten gespeichert und bei Bedarf übertragen werden können.

## **7.2.2 Temperaturentwicklung**

### **7.2.2.1 Messdaten der Temperaturentwicklung**

Zur Erfassung der Temperaturentwicklung im Bauwerk und am Standort während der Erhärtung des MgO-Baustoffs wurde ein Messquerschnitt mit 8 Temperatursensoren instrumentiert, siehe Abbildung 53. In Abbildung 88 sind die gemessenen Temperaturverläufe über die Zeit dargestellt. Während der Betonage zeigte sich ein Temperaturanstieg, der schneller verlief als in Prognoseberechnungen vorausberechnet, wobei im Kern des Bauwerks Maximaltemperaturen von mehr als 100 °C erreicht wurden.

Auf die Ergebnisse der Prognoseberechnungen und die an Hand der Messdaten erfolgte Nachkalibrierung der Berechnungen wird im Technischen Anhang ausführlich eingegangen. Nachfolgend sind nur ausgewählte Simulationsergebnisse beschrieben, die zur Begründung zusätzlicher Untersuchungen am Halbdamm beitragen und daher für das Verständnis der weiteren Vorgehensweise notwendig sind.

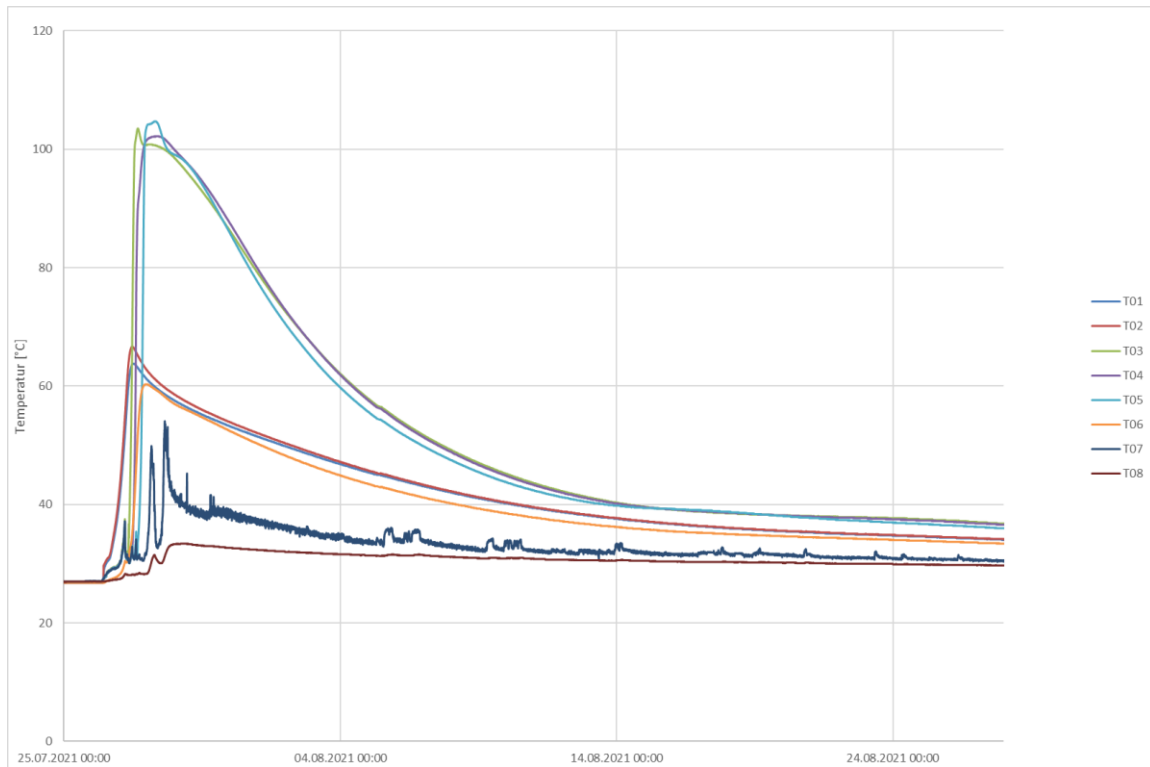


Abbildung 88: Zeitlicher Verlauf der Temperaturentwicklung im Baukörper (T03 bis T05), an der Kontur (T02), im angrenzenden Salinar (T01 und T06) sowie im Salinar der Firste (T06) und in der Luft nahe der Bauwerksoberfläche (T07)

### 7.2.2.2 Simulation der Temperaturentwicklung

Vor Bau des Halbdamms wurde die erhärtungsbedingte Temperaturentwicklung im Baukörper und am Standort auf Grundlage der A1-Basisrezeptur (Prognosemodell) simuliert. Das genutzte Simulationsmodell und weitergehende Ergebnisse sind im Technischen Anhang detailliert beschrieben. In diesem Abschnitt werden ausgewählte Ergebnisse des Prognosemodells, die vor der Betonage erstellt worden sind, vorgestellt und mit den Messdaten verglichen. Die Prognose wurde mit den Materialparametern der Sorelbeton A1-Basisrezeptur durchgeführt.

In Abbildung 89 sind die gemessenen Temperaturverläufe der Sensoren T03, T04 und T05 im Vergleich zur Prognose dargestellt. Daraus ist deutlich zu erkennen, dass die Verläufe der prognostizierten Werte den gemessenen Temperaturen nacheilen. Dies deutet darauf hin, dass der verwendete modifizierte A1-Sorelbeton im Rahmen dieses Projekts eine schnellere Erhärtungsgeschwindigkeit hat. Demzufolge setzt die Erhärtungsphase dieses Betons, im Vergleich zum bekannten Sorelbeton A1-Basisrezeptur, früher ein. Deshalb wurde eine Anpassung der Materialparameter an das gemessene thermische Verhalten vorgenommen werden.

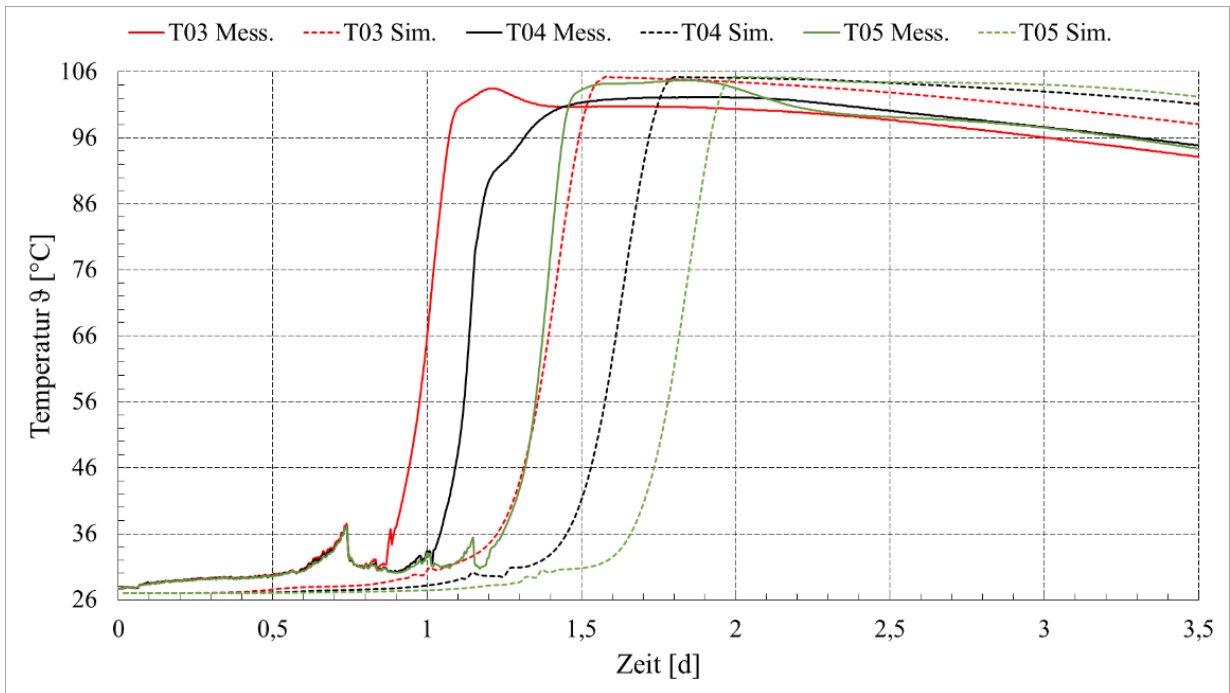


Abbildung 89: Gegenüberstellung der Messungen und der Prognoseberechnungen an den Temperatursensoren T03, T04 und T05 simuliert mit dem Parametersatz des Sorelbeton der A1-Basisrezeptur [17]

In Abbildung 90 sind die zeitlichen Verläufe der gemessenen Daten im Kern des Bauwerks dargestellt. In diesem Bereich herrscht für einige Zeit ein adiabatischer Zustand, der mit dem im Technischen Anhang beschriebenen Stoffmodell approximiert werden kann. Die als Vergleich angegebene Approximation basiert auf den Materialparametern des beschriebenen Sorelbetons A1-Basisrezeptur [17]. Aus Abbildung 90 a) kann man erkennen, dass die Abbindezeit der verwendeten modifizierten A1-Rezeptur kürzer ist als bei der Sorelbeton A1-Basisrezeptur. Die Anpassung erfolgt durch Modifikation Parameter, die den Erhärtungsfortschritt beschreiben.

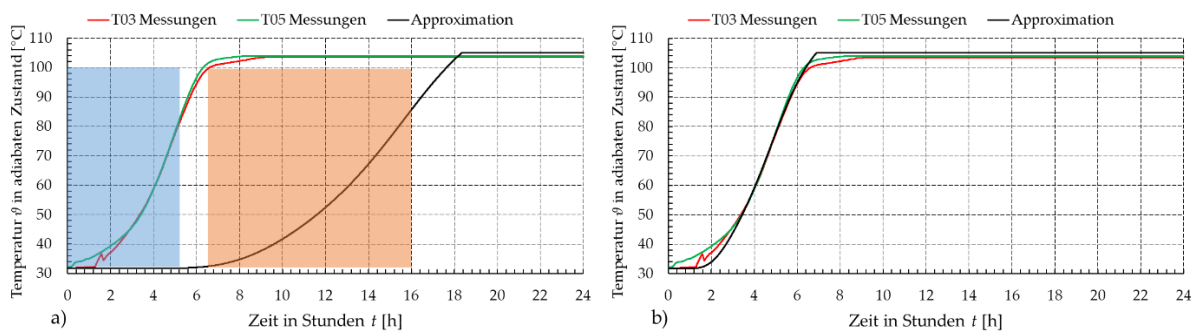


Abbildung 90: Gemessener und berechneter Verlauf der adiabatischen Temperaturentwicklung in Abhängigkeit der Zeit (links A1-Basisrezeptur, rechts Anpassung an die modifizierte A1-Rezeptur). Die farbige hinterlegten Flächen charakterisieren den vergleichbaren Erhärtungszustand der modifizierten A1-Rezeptur (blau) und der A1-Basisrezeptur (orange)

Nach der Anpassung wurden die Simulationen wiederholt und die Ergebnisse mit den gemessenen Temperaturverläufen verglichen. Für den Zeitpunkt des Auftretens der Maximaltemperatur und die Maxilatemperatur selbst (Tabelle 14) liegt eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vor. Das Simulationsmodell und die Ergebnisse sind im Technischen Anhang ausführlich beschrieben

Tabelle 14: Vergleich der gemessenen und simulierten Maximaltemperaturen

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

Damit lieferte die Simulation, die auf eine Erhärtungsdauer von nur 5 Stunden statt 9 Stunden hinweist (Abbildung 90a)) einen weiteren Indikator dafür, dass zwei Bentonierfugen entstanden sind. Dieser ungeplante Sachverhalt wurde wie bereits erwähnt durch zusätzliche Untersuchungen berücksichtigt.

### 7.2.3 Thermodynamische Standortbedingungen - Klimadaten

Die thermodynamischen Standortbedingungen - Temperatur, Luftdruck und relative Luftfeuchte - wurden mit Hilfe eines batteriegestützten Klimadatenloggers aufgezeichnet.

Seit Aufzeichnungsbeginn am 30.04.2019 kam es während der Projektlaufzeit bis zum 30.06.2022 3-mal zu Datenlücken. In 2 Fällen waren die Pufferbatterien erschöpft. In einem Fall war ein Bedienfehler aufgetreten.

In den Parametereganglinien für den Zeitraum 04/2019 bis 03/2020 (Anlage 9.2.1). zeigt sich ein relativ unbeeinflusster Jahresgang. Die Temperatur liegt relativ konstant zwischen 26 °C und 27 °C, wobei einzelne Spitzen bis 28,5 °C aufgetreten sind. Die genannten Temperaturspitzen sind eine Folge der gesteuerten Wetterführung in Verbindung mit dem Einsatz schwerer Technik im Frischwetterbereich. Durch die Lage des Versuchsortes spielen jahreszeitliche Schwankungen der Außentemperatur keine Rolle am Standort.

Die relative Luftfeuchtigkeit am Standort zeigt hingegen sehr wohl einen Einfluss des jahreszeitlichen Wechsels. Im Sommerhalbjahr liegt die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 45 % und 73 %, während im Winterhalbjahr 20 % bis 45 % erreicht werden.

Ab Juli 2020 nahmen die Tätigkeiten am Standort zu, wodurch die Temperatur stärkere Schwankungen bis auf 35 °C zeigte. Die Luftfeuchtigkeit war ebenfalls deutlich höher und schwankte im Winter 2020/2021 im Bereich zwischen 35 % und 62 %.

Die Betonage erfolgte im Zeitraum vom 26.07.2021 bis 28.07.2021 (Anlage 9.2.2). Kurz davor wurden am Standort eine Lufttemperatur von ca. 27 °C und eine relative Luftfeuchte von ca. 70 % aufgezeichnet.

Während und kurz nach der Betonage stieg die Lufttemperatur am Standort auf bis zu 37 °C an, während die relative Luftfeuchtigkeit abnahm und ein Niveau von ca. 44 % erreichte. Innerhalb der darauffolgenden Woche sank die Lufttemperatur wieder auf 31 °C, während die relative Luftfeuchtigkeit im Bereich von 44 % um  $\pm 3$  % schwankte. Eine Woche nach der Betonage stieg die relative Luftfeuchtigkeit wieder auf ein mittleres Niveau von 55 % und schwankte dann im Bereich von 50 % bis 75 % für die folgenden 3 Monate.

Ab 11/2021 stellten sich die ursprünglichen Klimabedingungen am Standort wieder ein und die Lufttemperatur schwankte im Bereich von 27 °C bis 28 °C, während die relative Luftfeuchtigkeit im Bereich von 30 % bis 62 % variierte (Anlage 9.2.1).

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Betonage von über 100 m<sup>3</sup> MgO-Baustoff offensichtlich keine langfristig maßgebliche Änderung des Grubenklimas am Standort bewirkt hat. Einschränkend ist jedoch hinzuzufügen, dass die Zeitreihe nach der Betonage, im Vergleich

zu der vor der Betonage, vergleichsweise kurz ist. Des Weiteren ist das Grubenklima des Standortes nicht frei von den Einflüssen der Wetterführung des Bergwerks und den Einflüssen der Versatzarbeiten in den naheliegenden Grubenbauen im Frischwetterzustrom. Gerade die Abwärme der dieselbetriebenen, schweren Technik beeinflusst die Temperaturen der Frischwetter.

### 7.3 Strömungstechnische Situation am Standort nach Betonage

#### 7.3.1 Arbeitsprogramm in situ Untersuchung nach Bauwerkserrichtung

Im Hinblick auf die Zielsetzung ein begründetes Identifikationsmodell zu etablieren wurden nach vollständiger Aushärtung des MgO-Baustoffs zur Beurteilung der strömungstechnischen Situation 2022 erneut in situ-Permeabilitätsuntersuchungen am Standort und im errichteten Halbdamm durchgeführt. Dabei wurden die in situ Permeabilitätsmessungen im anstehenden Salinar soweit möglich wiederholt und zusätzlich Permeabilitätsuntersuchungen im MgO-Baukörper, in der Kontaktzone von MgO-Baukörper und Salinar im Zeitraum vom 12.01.2022 bis 07.03.2022 durchgeführt. Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen erfolgten als Bohrloch-, Kombi- und Oberflächenpackertests entsprechend den Erläuterungen zur Messmethodik in Anlage 2.1.

Das Arbeitsprogramm der Oberflächenpackermessungen im Salinar nach dem Einbau des Halbdammes ist in Tabelle 15 aufgeführt.

Tabelle 15: Arbeitsprogramm zu den Oberflächenpackermessungen 2022 mittels Druckkolben-Oberflächenpacker mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packerbeschreibung	Teufe (Oberkante)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
OFP, d=200 mm	OFP01_175_000_1G1	OFP_01_175	0,00	Offset beträgt 14,5 mm
	OFP02_175_007_1G1	OFP_01_175	0,07	

Das Arbeitsprogramm für die Kombi- und Bohrlochpackerteste für die Bohrungen in der Sohle in Tabelle 16 und für die Bohrung im Stoß in Tabelle 17 zusammengestellt. Für diese zeitabhängigen in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurden - wenn möglich – die selben Testintervalle verwendet, wie für die Messungen in 2020.

Tabelle 16: Arbeitsprogramm der Kombi- und Bohrlochpackertests in den Bohrungen B02\_060 und B09\_040 in der Sohle (identisches Arbeitsprogramm für Untersuchungen 2020 und Wiederholung 2022) mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
B02_060, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B02_060_0000_G1	ES-KP + kurzer Prüfraum	DK-OFP + DDK-VFP	0,048	Messung nur 2020 erfolgt
	B02_060_0095_G1			0,143	nicht gemessen, da Havarie mit Hydrauliköl
	B02_060_0190_G1			0,238	
	B02_060_0285_G1			0,333	
B09_040, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B09_040_-0170_G1	ES-KP + kurzer Prüfraum	DK-OFP + DDK-VFP	0,01	Ersatzbohrung für B02-060
	B09_040_-0150_G1			0,02	
	B09_040_-0130_G1			0,03	
	B09_040_0000_G1			0,10	
	B09_040_0180_G1	kurzer Prüfraum	DDK-VFP	0,27	
	B09_040_0360_G1			0,45	
	B09_040_0540_INT_G1	Abschlusspacker	DK-ZFP	1,77	

Tabelle 17: Arbeitsprogramm zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B03\_165 im Stoß (identisches Arbeitsprogramm für Untersuchungen 2020 und Wiederholung 2022) mit trockener Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
B03_165, (L = 10,00 m; a = -5,0°; d = 70 mm)	B03_165_-0170_1G1	ES-KP + kurzer Prüfraum	DK-OFP + DDK-VFP	0,005	Messung 2022 entfallen
	B03_165_-0150_1G1			0,015	
	B03_165_-0130_1G1			0,025	
	B03_165_-0065_1G1			0,058	
	B03_165_-0035_1G1			0,073	
	B03_165_0000_1G1		DDK-VFP	0,090	
	B03_165_0180_1G1	kurzer Prüfraum		0,270	
	B03_165_0360_1G1			0,450	
	B03_165_0540_INT_G2	Abschlusspacker	DK-ZFP	5,27	

Zur Erkundung der Betonierfugen wurden im Halbdamm durch die TS-Bau GmbH zusätzlich die zwei vertikalen Bohrungen B14-164 und B15-165 mit einem Durchmesser von 70 mm für in situ-Permeabilitätsuntersuchungen in den Baukörper des Halbdamms gestoßen, siehe Abbildung 91. Die Bohrungen wurden im Trockenbohrverfahren mit trockener Druckluft als Spülfluid erstellt.

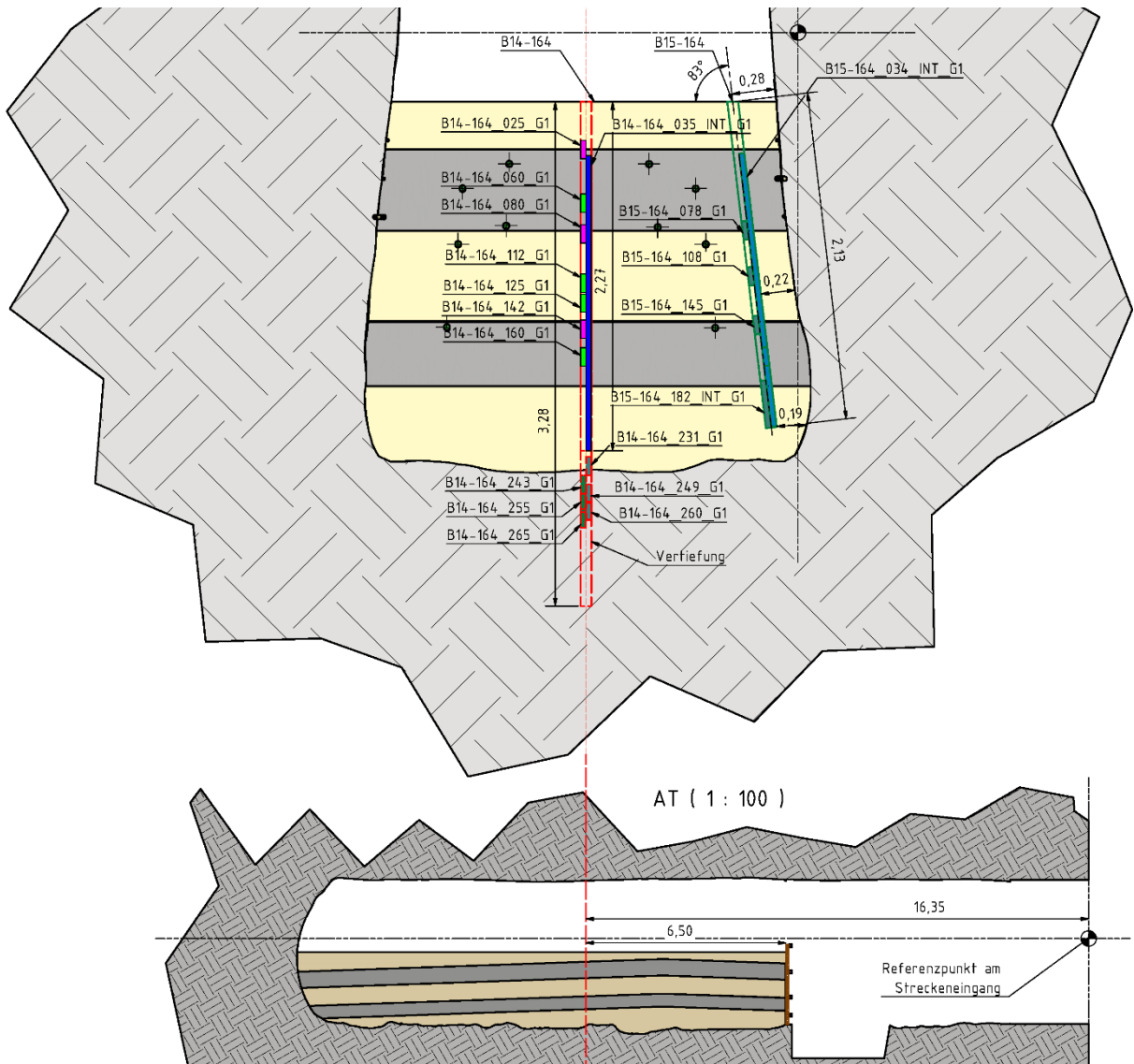


Abbildung 91: Lage der Bohrungen B14-164 und B15-164 mit Angabe der Testintervalle

In den beiden Bohrungen wurden Testintervalle im Baustoffkörper, im Bereich der mindestens zwei erwarteten Betonierfugen getestet. In der Bohrung B14-164 erfolgten auch Testungen im Bereich der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge und im angrenzenden Gebirge.

Dabei wurde in einem 1. Schritt die vertikale Bohrung B14-164 innerhalb des Baustoffkörpers bis auf eine Teufe von 2,27 m gestoßen. Im Bohrlochverlauf erfasste die Bohrung die Betonierfugen zwischen den einzelnen Betonierlagen. Nach Abschluss der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Baustoffkörper wurde die Bohrung um ca. 1,0 m auf eine Endteufe von 3,28 m vertieft. Die Bohrung durchteufte damit den Übergang vom MgO-Baustoff zum Salinar und erfasste das konturnahe Gebirge.

Die Bohrung B15-165 wurde mit einem Winkel von  $-83^\circ$  und einer Teufe von 2,13 m in den MgO-Baustoff gestoßen. Auch diese Bohrung erfasste im Bohrlochverlauf die Betonierfugen der einzelnen Betonierlagen.

Das Untersuchungsprogramm der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen für die Bohrungen B14-164 und B15-164 wurde für einen 4fach-Doppeldruckkolbenpacker mit einer Prüfraumlänge von 0,12 m und einen 2fach-Druckkolbenpacker für das Bohrlochtiefe geplant. Das Arbeitsprogramm ist in Tabelle 18 und Tabelle 19 zusammengestellt.

Tabelle 18: Arbeitsprogramm zu den Bohrlochpackermessungen im Bauwerk in der Bohrung B14-164 in der Sohle mit trockner Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)	Bemerkung
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[-]
B14-164 (L = 2,27 m; a = 0°; d = 70 mm) Sohle	B14-164_025_G2	kurzer Prüf- raum	4fach-Doppeldruck- kolbenpacker	0,31	Betonierfuge
	B14-164_060_G1			0,66	MgO-Bau- stoff
	B14-164_080_G1			0,86	Betonierfuge
	B14-164_112_G1			1,18	MgO-Bau- stoff
	B14-164_125_G1			1,31	MgO-Bau- stoff
	B14-164_142_G1			1,48	Betonierfuge
	B14-164_160_G1			1,66	MgO-Bau- stoff
	B14-164_035_INT_G1	Ab- schluss- packer	2fach-Druckkolben- packer	1,31	Betonierfuge / MgO-Bau- stoff
B14-164 (L = 3,28 m; a = 0°; d = 70 mm) Sohle	B14-164_265_G1	kurzer Prüf- raum	4fach-Doppeldruck- kolbenpacker	2,71	Vertiefung der Bohrung um ca. 1,00 m auf 3,28 m Teufe
	B14-164_260_G1			2,66	
	B14-164_255_G1			2,61	
	B14-164_249_G1			2,55	
	B14-164_231_G2			2,37	
	B14-164_243_G1			2,49	

Tabelle 19: Arbeitsprogramm zu den Bohrlochpackermessungen im Bauwerk in der Bohrung B15-164 in der Sohle mit trockner Druckluft als Testfluid

Bohrung	Messpunkt	Packer	Packerbeschreibung	Teufe (Mittelpunkt)
[-]	[-]	[-]	[-]	[m]
B15-164 (L = 2,13 m; a = 0,07°; d = 70 mm) Sohle	B15-164_078_G1	kurzer Prüf- raum	4fach-Doppeldruck- kolbenpacker	0,84
	B15-164_108_G1			1,14
	B15-164_145_G1			1,51
	B15_164_034_INT_G1	Ab- schluss- packer	2fach-Druckkolbenpa- cker	1,24
	B15-164_182_INT_G1			1,98

## **7.3.2 Ergebnisse in situ-Permeabilitätsuntersuchungen nach Betonage**

### **7.3.2.1 Strömungstechnische Situation im Salinar nach Betonage des Halbdammes**

Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Salinar wurden im Zeitraum vom 12.01.2022 bis 07.03.2022 entsprechend dem Arbeitsprogramm für die Oberflächenpackermessungen (siehe Tabelle 15), die Bohrungen in die Sohle (Tabelle 16) und die Bohrung in den Stoß (Tabelle 17) durchgeführt.

In der nachfolgenden Ergebnisdarstellung werden die ermittelten Permeabilitäten aus den Jahren 2022 und 2020 in Abhängigkeit vom Konturabstand in Abbildung 92, Abbildung 93 und Abbildung 94 dargestellt. Über die horizontalen Balken wird die Länge des getesteten Intervalls gekennzeichnet. Zur Gewährleistung einer guten Vergleichbarkeit werden die Dimensionen der Ordinatenachsen in den Grafiken beibehalten.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Lösungsgehalte des Kernmaterials aus den Bohrungen (siehe Kapitel 5.7.3.1) müssen die ermittelten Gaspermeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten angesehen werden.

Die Untersuchungen im Bauwerk erfolgten ebenfalls im Zeitraum vom 12.01.2022 bis 07.03.2022 gemäß dem Arbeitsprogramm für die Bohrlochpackermessungen in Tabelle 18 und Tabelle 19. In der Ergebnisdarstellung Abbildung 95 und Abbildung 96 sind die ermittelten Permeabilitätswerte in Abhängigkeit von der Einbauteufe dargestellt. Über die horizontalen Balken wird die Länge des getesteten Intervalls gekennzeichnet. Zur Gewährleistung einer guten Vergleichbarkeit werden die Dimensionen der Ordinatenachsen in den Grafiken beibehalten.

Unter Berücksichtigung der ermittelten Lösungsgehalte des Kernmaterials aus den Bohrungen (siehe Kapitel 7.3.3.1.1) müssen die ermittelten Gaspermeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten angesehen werden.

#### **7.3.2.1.1 OFP-Untersuchungen – Salinar**

Im Jahr 2020 waren 5 in situ-Permeabilitätsuntersuchungen an der Oberfläche des NW- und SE-Stoßes oberhalb des geplanten Halbdammes durchgeführt worden (Kapitel 5.7.2.1). Im Jahr 2022 nach Betonage des Halbdammes erfolgte eine weitere Messkampagne entsprechend dem Arbeitsprogramm in Tabelle 15. Die Abbildung 92 zeigt sowohl die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten der Messkampagne 2020 (rot) und als auch die 2022 ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten (grün) in Abhängigkeit von der Einbauteufe mit Berücksichtigung des Offsets des Mittelwerts der maximalen Rautiefe von 14,5 mm. Die Ergebnisse aller OFP-Untersuchungen sind in Anlage 10.1 zusammengefasst.

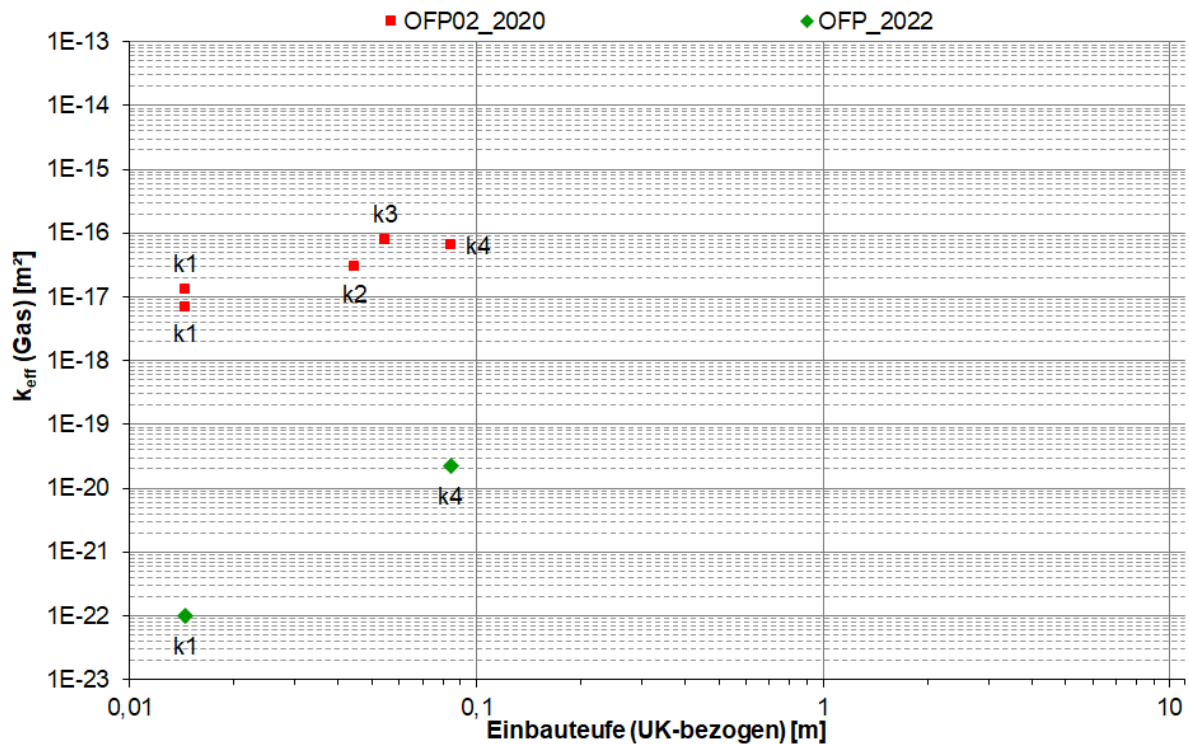


Abbildung 92: Effektive Gaspermeabilität der OFP-Untersuchungen aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe

Im Vergleich der Messkampagnen der Jahre 2020 (rot) und 2022 (grün) zeigt sich, dass die ermittelte effektive Gaspermeabilität jeweils abnimmt (Abbildung 92).

Für 2022 wurde für das Testintervall k1 eine effektive Gaspermeabilität von  $1,0E-22 \text{ m}^2$  (OFP01\_175\_000\_1G1) und für das Testintervall k4 eine Permeabilität von  $2,2E-20 \text{ m}^2$  (OFP02\_175\_007\_1G1) ermittelt. Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Permeabilitäten reduziert sich die Gaspermeabilität für das Testintervall k1 von  $7,0E-18 \text{ m}^2$  bzw.  $1,3E-17 \text{ m}^2$  auf  $1,0E-22 \text{ m}^2$ . Gleiches gilt für das Testintervall k4. Für diesen Messpunkt verringert sich die Permeabilität von  $6,5E-17 \text{ m}^2$  auf  $2,2E-20 \text{ m}^2$ . Innerhalb von ca. zwei Jahren ist die ermittelte Permeabilität für das Testintervall k1 um ca. 5 Zehnerpotenzen und für das Testintervall k4 um ca. 3 Zehnerpotenzen gesunken. Des Weiteren ist erkennbar, dass es im konturnahen Bereich zu stärkeren und im konturfernen Bereich zu geringeren Permeabilitätsänderungen kommt.

Im Ergebnis weist der Vergleich des Verlaufes der Gaspermeabilität für 2020 und 2022 eine Reduzierung des Permeabilitätsniveaus nach.

Diese Reduzierung ist möglicherweise ebenfalls auf die Wechselwirkungen der Steinsalzkontur mit der Grubenatmosphäre zurückzuführen.

Die Luftfeuchtigkeit am Standort beträgt im Mittel für den Zeitraum 04/2019 bis 01/2022  $46,5 \pm 10,8 \%$  ( $21,1 - 77,8 \%$ ;  $N=18.783$ ). Eine kurze Erläuterung zu dem erfassten Grubenklima wird im Kapitel 7.2.3 gegeben. Die Ganglinien für den erfassten Luftdruck, die relative Luftfeuchte und die Temperatur in der Strecke sind in Anlage 9.2.1 dargestellt. Für diese Bedingungen ist über die überwiegende Zeit von einer Luftfeuchte im Grubengebäude unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte des Steinsalzes auszugehen. Es kommt also zur Trocknung des Gebirges. Wie die Ganglinie in Anlage 9.2.2 und der Wertebereich der Luftfeuchte zeigt, gibt es im Verlauf der Betonage Zeiträume, in denen die Luftfeuchte der Grubenatmosphäre geringfügig über der Gleichgewichtsfeuchte von Steinsalz liegt. Für diese Bedingungen ist für die Steinsalzoberfläche und die konturnahe Zone (vermutlich wenige Zentimeter) von der Aufnahme von Wasser (Wasserdampf) aus der Grubenatmosphäre auszugehen.

Möglicherweise kommt es für die Kapillardruckbedingungen im Steinsalz und die Luftfeuchte im Grubengebäude auch unabhängig von der Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte zu Absorption und Kondensationsprozessen von Wasser im Porenraum (Kapillarkondensation). Ergänzende Untersuchungen und Ergebnisse zu diesem Sachverhalt finden sich im Technischen Anhang.

#### **7.3.2.1.2 Bohrloch- und Kombipacker-Untersuchungen im Salinar**

Im Jahr 2020 waren in der Sohle insgesamt 15 und am Stoß insgesamt 16 in situ-Permeabilitätsuntersuchungen durchgeführt worden (Kapitel 5.7.2). Im Jahr 2022 nach Betonage des Halbdamms erfolgte eine weitere Messkampagne entsprechend dem Arbeitsprogramm in Tabelle 16 und Tabelle 17. Die Abbildung 93 und Abbildung 94 zeigen die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit vom Konturabstand mit Berücksichtigung des Offsets des Mittelwerts der maximalen Rauhtiefe von 14,5 mm für die Messungen 2022 und vergleichend die Messungen im Rahmen der Standortcharakterisierung aus dem Jahr 2020.

Die Ergebnisse aller Kombi- und Bohrlochpacker-Untersuchungen sind für die Sohle in Anlage 10.2 und für den Stoß in Anlage 10.3 zusammengefasst.

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Permeabilitäten in der Sohle ist für das Testintervall k1 die Permeabilität von  $2,8E-17 \text{ m}^2$  auf  $3,0E-14$  gestiegen. Gleiches gilt für das Testintervall k7 mit einer Erhöhung von  $1,0E-22 \text{ m}^2$  auf  $3,0E-22 \text{ m}^2$ . Innerhalb von ca. zwei Jahren ist damit die effektive Gaspermeabilität in der Sohle für das Testintervall k1 um ca. 3 Zehnerpotenzen und für das Testintervall k7 um ca. 0,2 Zehnerpotenzen gestiegen. Die zeitliche Entwicklung der Permeabilität im Stoß weicht von der in der Sohle ab.

Die 2020 für den Stoß ermittelte Permeabilität nimmt von  $9,5E-18 \text{ m}^2$  (B03\_165\_-0170\_1G1) für das Testintervall k1 auf  $1,0E-22 \text{ m}^2$  (B03\_165\_0540\_INT\_1G2) für das Testintervall k7 ab.

Für 2022 wurde für den Stoß für das Testintervall k1 eine geringere Permeabilität von  $6,0E-19 \text{ m}^2$  (B03\_165\_-0170\_2G1) und für das Testintervall k7 eine höhere Permeabilität von  $1,6E-21 \text{ m}^2$  (B03\_165\_0540\_INT\_G2) nachgewiesen.

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung ist für das Testintervall k1 die ermittelte Permeabilität von  $9,5E-18 \text{ m}^2$  auf  $6,0E-19 \text{ m}^2$  gesunken. Für das Testintervall k7 ist die ermittelte Permeabilität von  $1,0E-22 \text{ m}^2$  auf  $1,6E-21 \text{ m}^2$  gestiegen.

Im Stoß ist innerhalb von ca. zwei Jahren die effektive Gaspermeabilität für das Testintervall k1 um ca. 1 Zehnerpotenzen gesunken und für das Testintervall k7 um ca. 1 Zehnerpotenz gestiegen.

Während in der Sohlbohrung die Permeabilität erwartungsgemäß zugenommen hat, trifft dies im Falle der Stoßbohrung nicht zu. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für die Sohlbohrungen die Geometrie der ursprünglich aufgefahrenen Strecke erhalten blieb, während die Stoßbohrung nicht nur durch die Feuchte beeinflusst wurde, sondern möglicherweise durch den geänderten Spannungszustand durch die Betonage des Halbdammes. Aufgrund der geringen Datenlage wird hier nur der Sachverhalt dargestellt und auf eine Interpretation verzichtet.

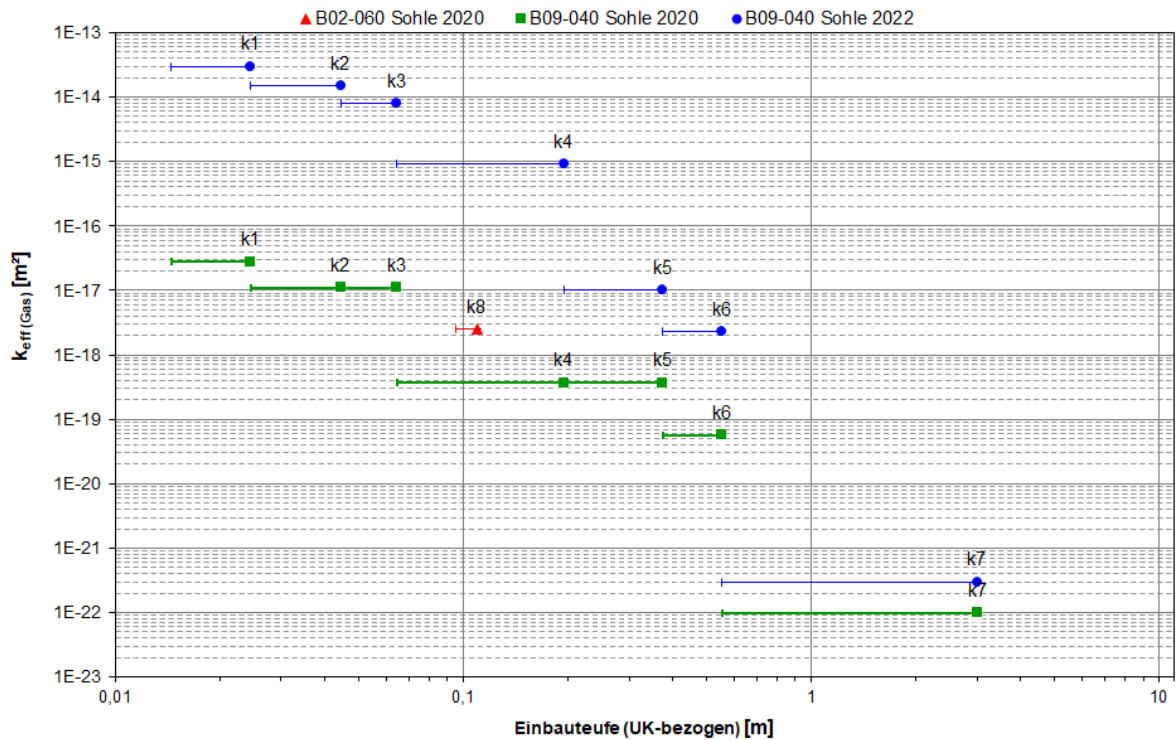


Abbildung 93: Effektive Gaspermeabilität in den Bohrungen B02-060 und B09-040 aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt)

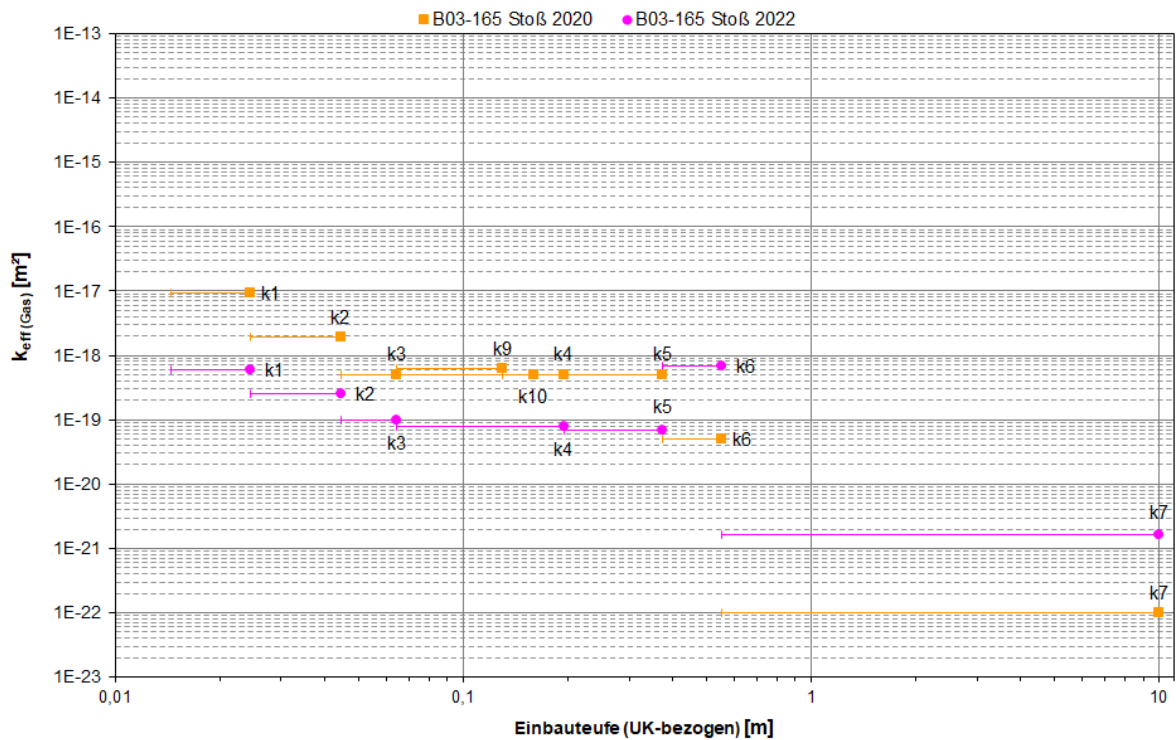


Abbildung 94: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B03-165 aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt)

Unter Berücksichtigung der Kenntnisse zur Porengrößenverteilung und der Porosität wird der Einfluss der Porenraumsättigung auf die Permeabilitätsergebnisse als gering angesehen.

Trotzdem sind die ermittelten Permeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten anzusehen, wobei die Abweichung von der absoluten Permeabilität als gering eingeschätzt wird.

### **7.3.2.2 Strömungstechnische Situation im Baukörper und in der Kontaktzone**

Die Permeabilitätsuntersuchungen im MgO-Baustoff, in der Kontaktzone von MgO-Baustoff und Salinar sowie im angrenzenden Salinar wurden im Zeitraum vom 12.01.2022 bis 07.03.2022 entsprechend dem Arbeitsprogramm (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19) durchgeführt.

Insgesamt wurden in der Bohrung B14-164 14 Tests und in der Bohrung B15-164 5 Tests durchgeführt. Die Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen die ermittelten effektiven Gaspermeabilitäten in Abhängigkeit vom Konturabstand. Die detaillierten Ergebnisse der Bohrlochpackertests sind für die Bohrung B14-164 in Anlage 10.4 und für die Bohrung B15-164 in Anlage 10.5 zusammengefasst.

Für die Bohrung B14-164 wurden für den Teufenbereich bis 2,27 m in situ-Permeabilitäten von  $6,0E-19 \text{ m}^2$  (B14-164\_125\_G1) bis  $3,7E-16 \text{ m}^2$  (B14-164\_025\_G2) ermittelt.

Die strömungstechnische Untersuchung der Fugen zwischen zwei gegossen Schichten aus MgO-Baustoff ergaben in situ-Permeabilitäten von  $4,3E-18 \text{ m}^2$  (B14-164\_080\_G1) bis  $3,7E-16 \text{ m}^2$  (B14-164\_025\_G2). Das geometrische Mittel für die Fugen liegt bei  $2,7E-17 \text{ m}^2$ .

Als Ergebnisse der Untersuchungen der Schichten aus massivem MgO-Baustoff wurden effektive Gaspermeabilitäten von  $6,0E-19 \text{ m}^2$  (B14-164\_125\_G1) bis  $2,0E-17 \text{ m}^2$  (B14-164\_060\_G1) nachgewiesen. Für den MgO-Baustoff wurde ein geometrischer Mittelwert von  $4,0E-18 \text{ m}^2$  berechnet.

In der Bohrung B14-164 im Teufenbereich von 2,27 m bis 3,28 m wurden für den Kontaktbereich bzw. das Salinargebirge Permeabilitäten von  $3,8E-19 \text{ m}^2$  (B14-164\_265\_G1) bis  $2,9E-15 \text{ m}^2$  (B14-164\_243\_G1) ermittelt. Mit zunehmender Teufe nimmt die ermittelte Permeabilität ab. Die Ergebnisse bestätigen nach einer Offenstandzeit des Streckenstummels von mehr als 2,5 Jahren eine höher permeable ALZ. Bei der Beurteilung dieses Ergebnisses muss berücksichtigt werden, dass die Bohrung B14-164 den Bereich einer Unebenheit in der Streckensohle (Höhe ca. 0,2 m) durchstößt (Abbildung 91). Dieser Absatz in der Streckensohle verläuft über die gesamte Streckenbreite. Deshalb wird in der Darstellung der Ergebnisse (Abbildung 95) nicht zwischen Kontaktzone und aufgelockertem Salinar unterschieden, da dieser Absatz möglicherweise mechanisch stärker entfestigt ist und dadurch eine höhere Permeabilität besitzt. Es sei daran erinnert, dass trotz der offenen Standzeit von etwa 2 Jahren kein Nachschnitt der Streckenkontur erfolgte.

Im Ergebnis der Tests in der Bohrung B15-164 wurden für den Baukörper situ-Permeabilitäten von  $7,5E-18 \text{ m}^2$  (B15-164\_078\_G1) bis  $5,9E-18 \text{ m}^2$  (B15-164\_182\_INT\_G1) ermittelt. Das geometrische Mittel liegt bei  $6,6E-18 \text{ m}^2$ .

Ein Vergleich der geometrischen Mittelwerte für den MgO-Baustoff in der Bohrung B14-164 mit  $4,0E-18 \text{ m}^2$  und aus der Bohrung B15-164 mit  $6,6E-18 \text{ m}^2$  zeigt eine gute Übereinstimmung des ermittelten Permeabilitätsniveaus.

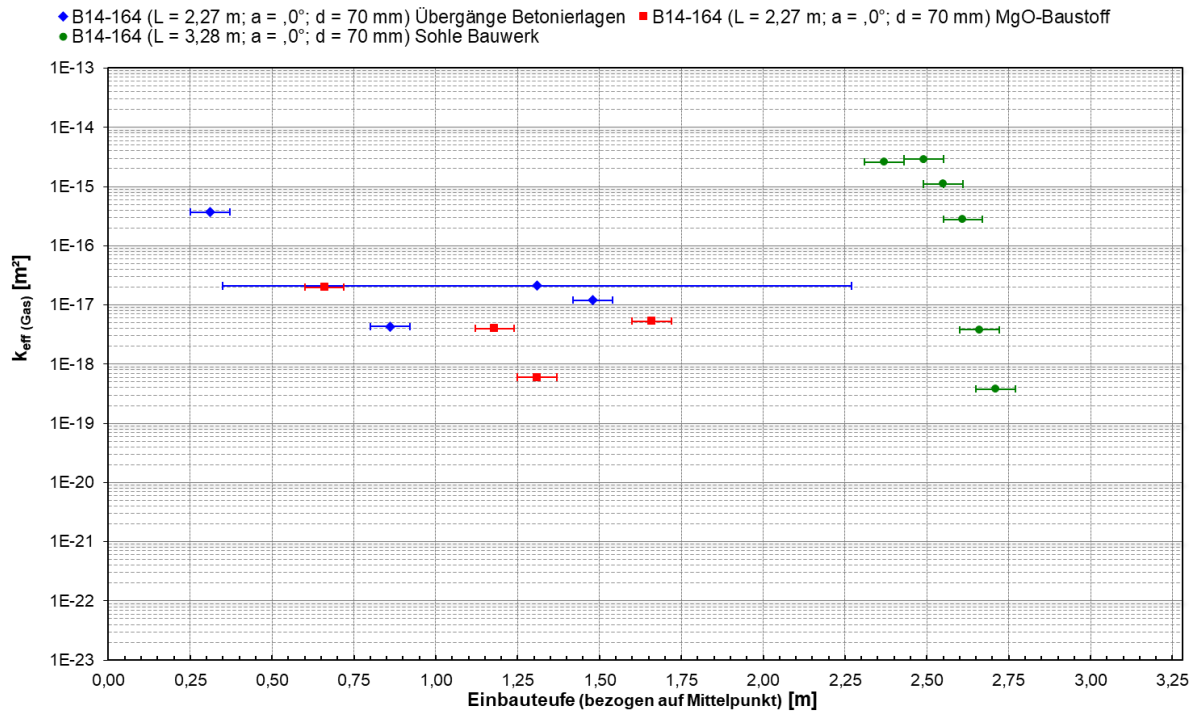


Abbildung 95: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B14-164 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls

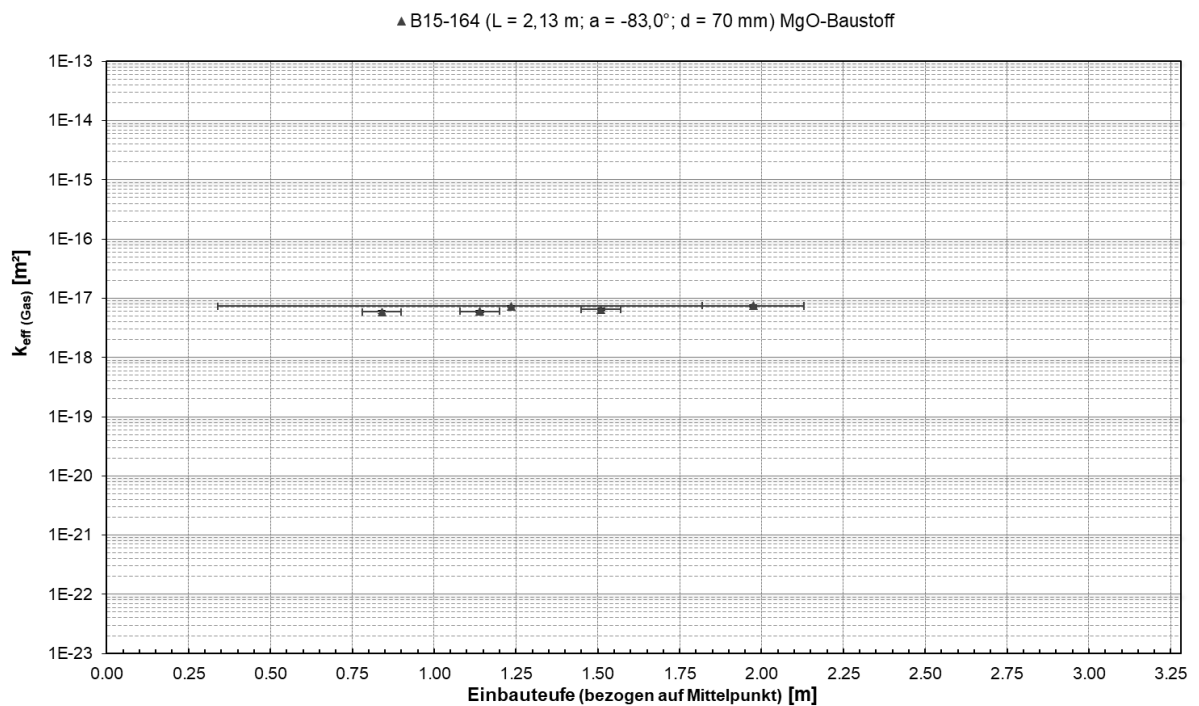


Abbildung 96: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B15-164 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls

Unter Berücksichtigung der ermittelten Lösungsgehalte des Kernmaterials aus den Bohrungen (siehe Kapitel 7.3.3.1.1) müssen die ermittelten Gaspermeabilitäten als effektive Gaspermeabilitäten angesehen werden.

### **7.3.3 Laboruntersuchungen Baustoff**

Ergänzend zu den in situ-Permeabilitätsuntersuchungen in den Bohrungen B14-164 und B15-164 wurden laborative Untersuchungen an Kernproben aus den Bohrungen sowie an Proben aus den baubegleitend gegossenen Probekörpern durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen im Rahmen der begleitenden Qualitätssicherung der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen lag auf der Ermittlung des Lösungsgehaltes, der Reindichte und der Trockendichte, woraus dann die Porosität und die Sättigung bestimmt wurden. Die Gaspermeabilität wurde ausschließlich an Probekörpern aus den baubegleitend gegossenen Proben berechnet. Die Versuchsmethodik für die Ermittlung der genannten Kennwerte ist in Anlage 2.2 dargestellt.

Für die Untersuchungen an dem Kernmaterial wurden Prüfkörper im Bereich der Testintervalle der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen gewonnen, siehe Abbildung 91.

#### **7.3.3.1 Ergebnisse**

##### **7.3.3.1.1 Lösungsgehalt**

Aus dem Kernmaterial der Bohrungen B14-164 und B15-164 wurden aus ausgewählten Teufenbereichen Prüfkörper zur Ermittlung des Lösungsgehaltes entnommen. Die Proben wurden für die einzelnen Betonagelagen sowohl aus dem Bereich der Betonierfugen als auch aus dem massiven Baustoff gewonnen und bei 45 °C getrocknet. Ziel war die Untersuchung eines teufenabhängigen Feuchteprofils im erstellten Baustoffkörper.

Ein Zusammenhang des ermittelten Lösungsgehaltes mit der Lage der Prüfkörper im Bauwerk (Teufenabhängigkeit) oder auch ein Zusammenhang mit den einzelnen Betonagelagen konnte aus den durchgeführten Untersuchungen nicht abgeleitet werden, siehe (Abbildung 97 und Abbildung 98).

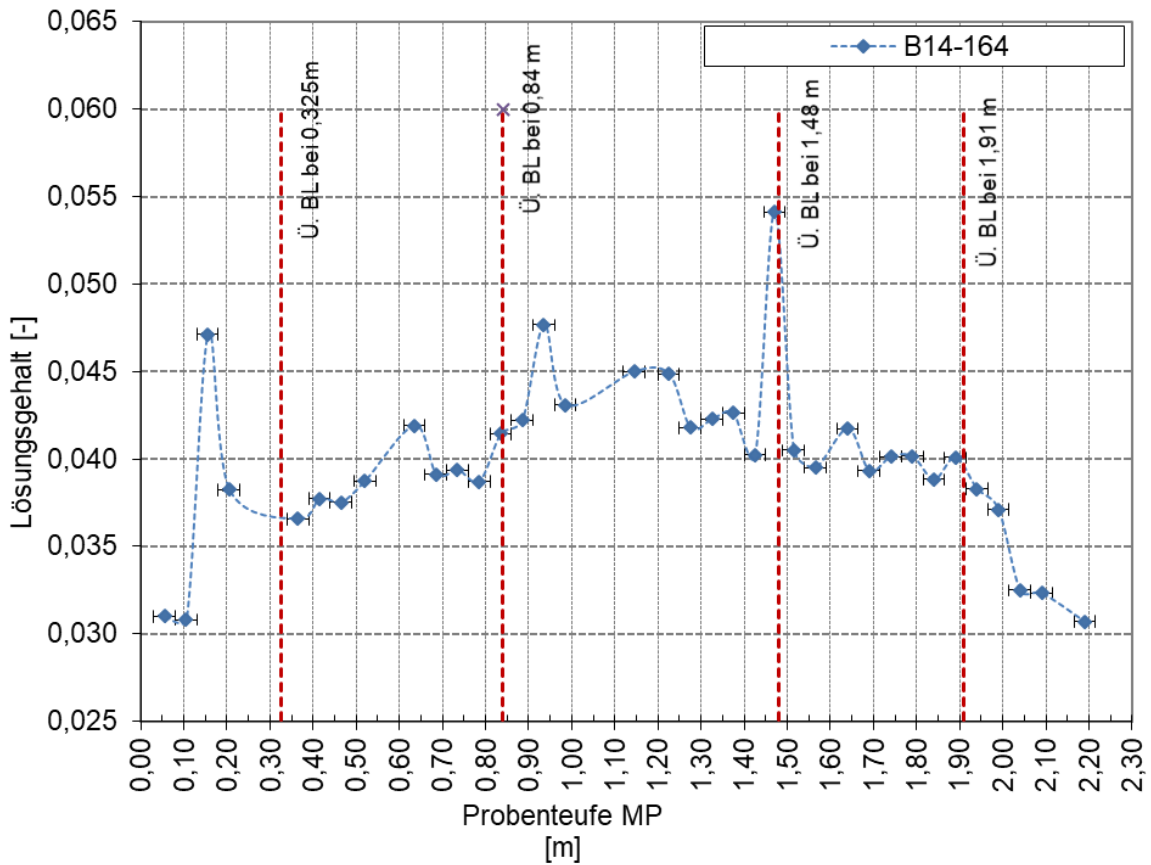


Abbildung 97: Lösungsgehalte nach 45°C Ofentrocknung in Abhängigkeit von Entnahmetiefe für Prüfkörper aus der Bohrung B14-164 unter Berücksichtigung der Position der Übergänge der Betonierlagen (Ü. BL) in rot

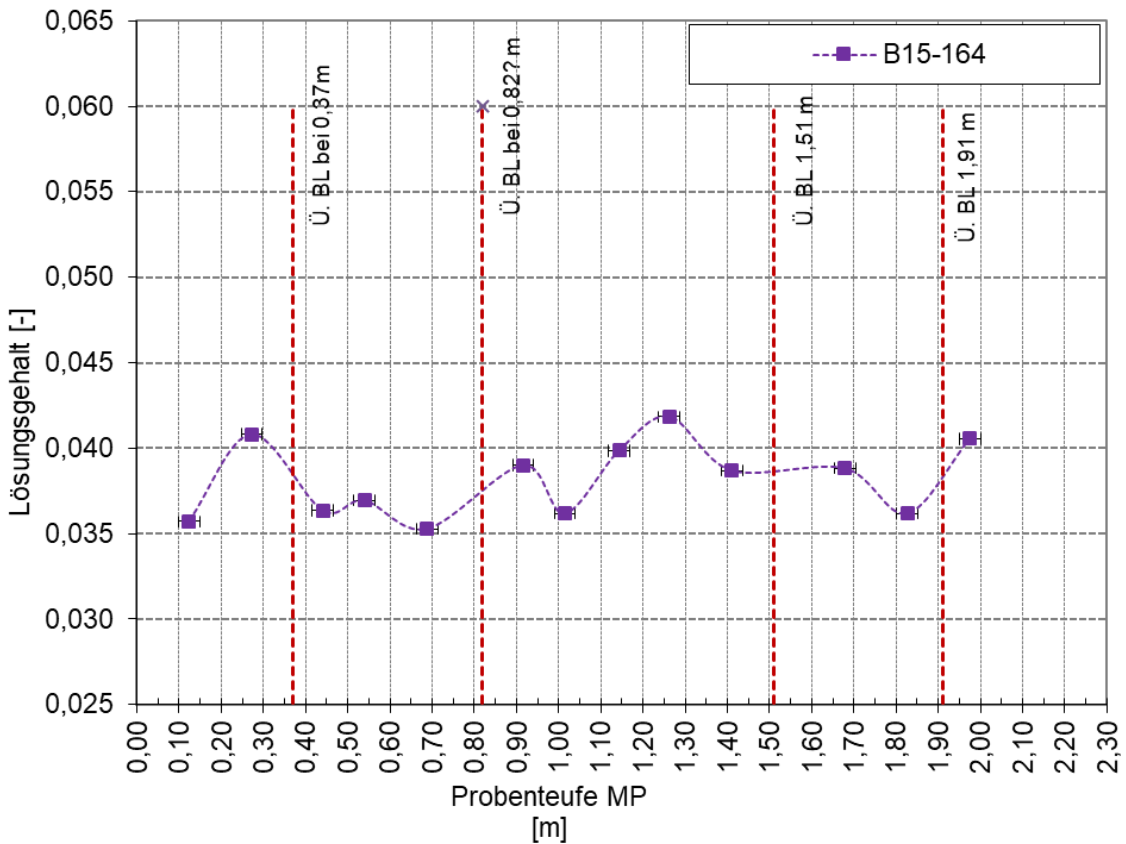


Abbildung 98: Lösungsgehalte nach 45°C Ofentrocknung in Abhängigkeit von Entnahmetiefe für Prüfkörper aus der Bohrung B15-164 unter Berücksichtigung der Position der Übergänge der Betonierlagen (Ü. BL) in rot

Für den Baustoff A1 modifizierte Rezeptur wurde an Kernproben aus den Bohrungen B14-164 und B15-164 im Mittel ein Lösungsgehalt von  $0,039\pm 0,004$  ( $0,031-0,054$ ;  $N= 49$ ) für die Trocknung bei  $45\text{ °C}$  ermittelt.

Für die baubegleitend gegossenen Proben, die einer Trocknung bei  $60\text{ °C}$  unterzogen wurden betrug der Lösungsgehalt  $0,074\pm 0,013$  ( $0,057-0,090$ ;  $N= 10$ ). Die Ergebnisse sind in Anlage 11.1 zusammengefasst.

#### **7.3.3.1.2 Reindichte**

Die Prüfkörper für die Reindichteermittlung wurden bei unterschiedlichen Temperaturen getrocknet. An 14 Baustoffproben des im Bauwerk eingesetzten Baustoffes A1-modifizierte Rezeptur wurde im Anschluss an die Trocknung bei  $45\text{ °C}$  eine Reindichte  $2,118\pm 0,008\text{ g/cm}^3$  ( $2,104-2,129\text{ g/cm}^3$ ;  $N= 14$ ) ermittelt.

Bei den baubegleitend gegossenen Probekörpern, die einer Trocknung bei einer Temperatur von  $60\text{ °C}$  unterzogen wurden, liegt die mittlere Reindichte für den Baustoff A1-modifizierte Rezeptur bei  $2,171\pm 0,026\text{ g/cm}^3$  ( $2,135-2,198\text{ g/cm}^3$ ;  $N=3$ ). Die Ergebnisse sind in Anlage 11.2.1 zusammengefasst.

Zum Vergleich: An Baustoffproben A1-Basisrezeptur, beträgt die mittlere Reindichte bei einer Trocknungstemperatur von  $60\text{ °C}$   $2,110\pm 0,001\text{ g/cm}^3$  ( $2,109-2,111\text{ g/cm}^3$ ;  $N= 2$ ).

#### **7.3.3.1.3 Trockendichte**

Die Trockendichte wurde für unterschiedlichen Trocknungstemperaturen berechnet.

Im Mittel wurde für die 49 Baustoffproben des im Bauwerk eingesetzten Baustoffes im Ergebnis der schonenden Trocknung bei  $45\text{ °C}$  eine mittlere Trockendichte von  $1,801\pm 0,041\text{ g/cm}^3$  ( $1,717-1,888\text{ g/cm}^3$ ;  $N=49$ ) berechnet.

Für die baubegleitend gegossenen Proben mit einer schonenden Trocknung bei  $60\text{ °C}$  wurde für 17 Baustoffproben eine mittlere Trockendichte von  $1,706\pm 0,021\text{ g/cm}^3$  ( $1,681-1,749\text{ g/cm}^3$ ;  $N=17$ ) ermittelt. Die Ergebnisse sind in Anlage 11.2.2 für die untersuchten Baustoffe zusammengefasst.

Zum Vergleich: Für Baustoffproben der in den Vorversuchen eingesetzten A1-Basisrezeptur beträgt die mittlere Trockendichte für die schonende Trocknung bei  $60\text{ °C}$   $1,673\pm 0,018\text{ g/cm}^3$  ( $1,647-1,696\text{ g/cm}^3$ ;  $N=8$ ).

#### **7.3.3.1.4 Totale Porosität aus den Dichten**

Der Einfluss der Trocknungsmethodik wirkt sich wie für die Reindichte und die Trockendichte in gleicher Weise auf die aus den Dichten berechnete totale Porosität aus. Daher erfolgte die Porositätsermittlung für schonend getrocknete Prüfkörper ( $60\text{ °C}$ ,  $45\text{ °C}$ ).

An den 49 Baustoffproben des Kernmaterials des im Bauwerk eingesetzten Baustoffes (modifizierte A1-Rezeptur) wurde für die Trocknung bei  $45\text{ °C}$  eine Porosität von  $0,150\pm 0,020$  ( $0,103-0,190$ ;  $N= 49$ ) berechnet.

Für die bei  $60\text{ °C}$  getrockneten Proben aus den baubegleitend in KG-Rohre abgegossenen Material ergab sich eine Porosität von  $0,212\pm 0,012$  ( $0,188-0,235$ ;  $N=17$ )

Zum Vergleich: Die aus den Dichten berechnete totale Porosität beträgt für die Baustoffproben der A1-Basisrezeptur im Mittel  $0,207\pm 0,009$  ( $0,196-0,219$ ;  $N= 8$ ) für eine Trocknung bei  $60\text{ °C}$ .

Die berechneten Werte der totalen Porosität sind in 0 zusammengefasst und in Abhängigkeit vom Trocknungsverfahren für die unterschiedlichen Baustoffe dargestellt.

#### **7.3.3.1.5 Sättigung**

Der Flüssigkeitsgehalt im Porenraum wird für den eingesetzten Baustoff von dem Verbrauch der Anmachlösung durch den Abbindeprozess der Bindemittelphasen bestimmt. Die für die vorliegende Porosität und den ermittelten Lösungsgehalt abgeschätzte Sättigung stellt damit eine zeitabhängige Größe dar. Theoretisch wird aus der Stöchiometrie der Hydratationsreaktionen und der Kristallisation der Bindemittelmatrix von einem vollständigen Verbrauch der Porenlösung ausgegangen. Dies kann theoretisch zu einem vollständig trockenen Porenraum mit einer Porenraumsättigung von  $S = 0$  führen.

In Abhängigkeit von der angewendeten Trocknungstemperatur und dem initialen Zustand der untersuchten Prüfkörper wurden im Rahmen der Untersuchungen unterschiedliche Sättigungen ermittelt.

An 49 Baustoffproben des im Bauwerk eingesetzten Baustoffes (modifizierte A1-Rezeptur) wurde für die schonende Trocknung bei 45 °C eine Sättigung von  $0,370 \pm 0,072$  (0,215-0,584; N=49) berechnet.

Für eine Trocknungstemperatur von 60 °C liegt die Sättigung des eingesetzten Baustoffes bei  $0,400 \pm 0,030$  (0,345-0,478; N=17).

Zum Vergleich: Für Baustoffproben der A1-Basisrezeptur beträgt die Sättigung bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C  $0,413 \pm 0,047$  (0,360-0,476; N= 8).

Die Ergebnisse sind in Anlage 11.4 zusammengefasst und grafisch dargestellt.

#### **7.3.3.1.6 Effektive Gaspermeabilitäten und Porositäten**

Für Kernmaterial aus den Bohrungen B14-164 und B15-164 liegen keine Permeabilitätswerte aus Laboruntersuchungen vor.

Aus dem im Bauwerk eingesetzten Baustoff (A1-modifizierte Rezeptur) wurden während der Betonage baubegleitend Proben in KG-Rohren abgegossen. Daraus wurden 11 Prüfkörper gewonnen und die effektive Permeabilität für Gas an diesen Prüfkörpern ermittelt. Diese liegt im Bereich von  $9,0E-18$  m<sup>2</sup> bis  $2,4E-13$  m<sup>2</sup> (N=11), siehe Anlage 11.6.

Im Rahmen der instationären Permeabilitätsuntersuchungen an dem Kernmaterial des Baustoffes ergibt sich auch die effektiv am Strömungsprozess beteiligte Porosität.

Für die Probenkörper, die baubegleitend in KG-Rohre abgegossen wurden, wurde eine effektive Porosität von  $0,114 \pm 0,032$  (0,070-0,170; N= 10) ermittelt.

#### **7.3.3.2 Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP)**

An drei baubegleitend gegossenen Proben der Rezeptur, die im Bauwerk zum Einsatz kam, wurde durch die TU-C die Porengrößenverteilung über Quecksilberporosimetrie (maximaler Porendurchmesser ca. 100 µm) ermittelt. Die Untersuchungen erfolgten mit den Geräten Pascal 140 und Pascal 240 der Firma Porotec, siehe dazu Abbildung 99. Details finden sich in Anlage 11.5.2.

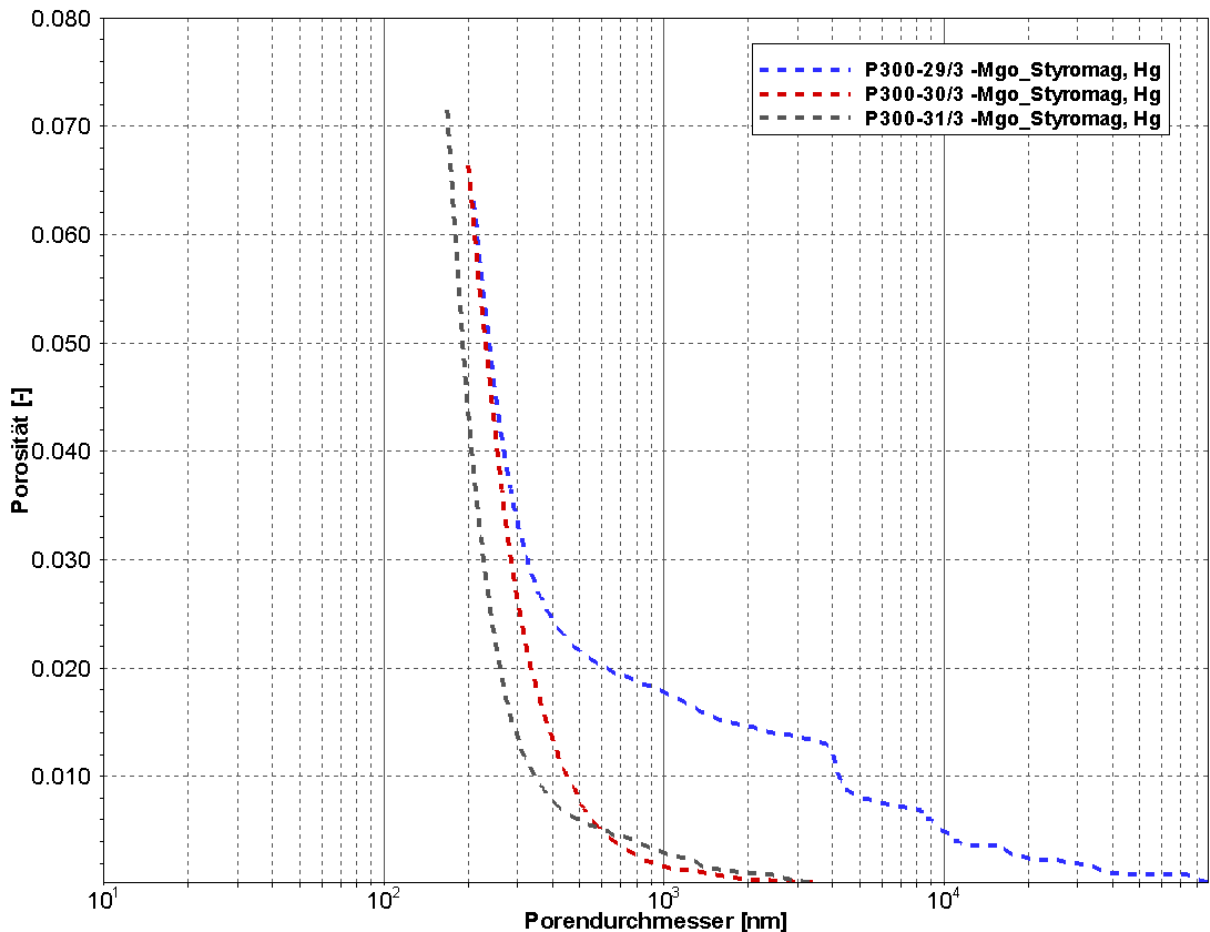


Abbildung 99: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser

Im Rahmen ergänzender Untersuchungen wurden zusätzlich aus Kernproben der A1-Basisrezeptur zylindrische Prüfkörper des Baustoffes präpariert. Für diese Proben wurde in einem ersten Schritt durch das HZDR die Porosität und Porenradienverteilung über CT untersucht. Im Anschluss an die CT-Untersuchungen wurden an denselben Prüfkörpern Quecksilberporosimetrieuntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser vergleichenden Untersuchungen sind im Technischen Anhang ausführlich beschrieben.

Erwähnenswert ist auch, dass, neben den Untersuchungen am Baustoff, auch Proben aus den Bereichen mit starker Schaumbildung durchgeführt wurden. Auch für diese Prüfkörper wurden CT-Aufnahmen erstellt und die Porosität und Porengrößenverteilungen beurteilt – siehe Technischer Anhang.

### 7.3.3.3 Effektive Gaspermeabilität der Kontaktzone

In der vertikal durch den Dammkörper gestoßenen Bohrung B14-164 wurde in der Kontaktzone in situ effektive Gaspermeabilitäten ermittelt. Aus den Bohrungen konnten aus der Kontaktzone keine Kernproben für ergänzende Laboruntersuchungen gewonnen werden.

Auf Grund der Erfahrungen zum Kerngewinn aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge für die Bohrungen B14-164 und B15-164 wurden keine zusätzlichen Bemühungen zum Kerngewinn aus den vorinstallierten KG-Rohren unternommen. Die durch die 9 KG-Rohre vorgegebenen Bohrungsverläufe wurde im Projektverlauf nicht genutzt. Diese stehen weiterhin für künftige in situ-Untersuchungen zur Verfügung.

Für einen Kerngewinn aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge wurden im Bereich der unterschiedlichen bearbeiteten Oberflächen drei Horizontalbohrungen mit einem Durchmesser von 300 mm in den Sohlbereich gestoßen - siehe Abbildung 100. Aus den gewonnenen Kernproben wurden Prüfkörper für die Laboruntersuchungen zur Permeabilität und der Festigkeit präpariert.



Abbildung 100: Lage der Bohrungen Durchmesser 300 mm im Sohlbereich

Wie bereits ausgeführt wurde in diesem Bereich bereits vor der Betonage eine Oberfläche mit unterschiedlichem Grad der Rauheit hergestellt (siehe Kapitel 5.4). Mit Blick auf die Ortsbrust war der linke, südöstliche Bereich der Sohle grob bearbeitet ( $R_a=1,4$  mm), der mittlere Bereich der Sohle wurde mäßig bearbeitet ( $R_a=1,1$  mm) und der rechte, nordwestliche Bereich wurde glatt geschliffen ( $R_a=0,1$  mm).

Einzelne Kerne aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge mit unterschiedlicher Rauheit sind beispielhaft in den folgenden Abbildungen - Abbildung 101 bis Abbildung 103 – dargestellt, siehe auch Kapitel 5.4.2.

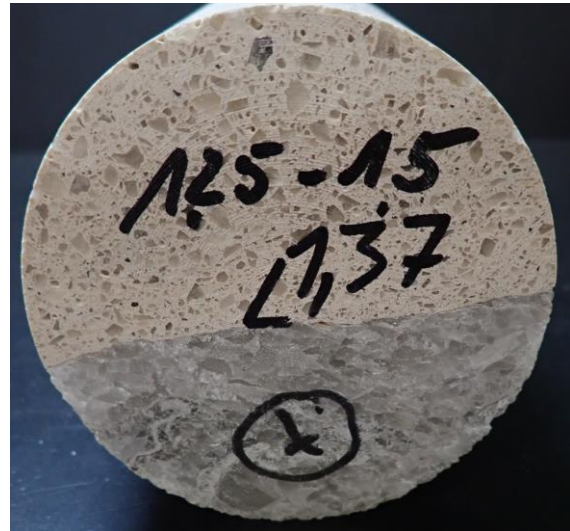


Abbildung 101: P300-47 Bereich linke Sohle - rauh.



Abbildung 102: P300-46 Bereich Mitte Sohle – mäßig bearbeitet

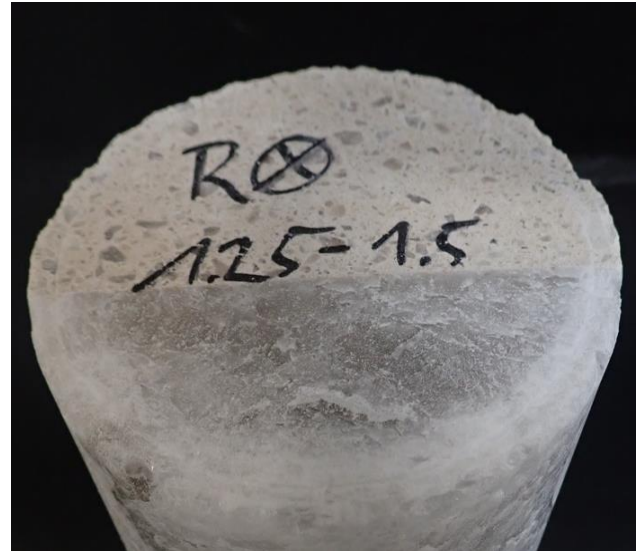


Abbildung 103: P300-48 Bereich rechte Sohle - geschliffen

Für die strömungstechnische Charakterisierung wurden die Kernproben im Labor auf einen Durchmesser von 90 mm durch die TU-C abgedreht. Insgesamt wurden 8 Prüfkörper aus der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge mit unterschiedlicher Rauheit der Kontur im Labor mit Gas durchströmt. Die ermittelte effektive Gaspermeabilität liegt für diese Prüfkörper im Bereich von  $5,0E-15 \text{ m}^2$  bis  $6,5E-12 \text{ m}^2$  ( $N=8$ ). Die Ergebnisse sind in Abbildung 104 probenbezogen dargestellt.

Im Vergleich mit diesen Werten lassen sich die in der Bohrung B14-164 gewonnenen Permeabilitätswerte in der Größenordnung  $1,1E-15 \text{ m}^2$  bis  $2,9E-15 \text{ m}^2$  auch der Kontaktzone zuordnen.

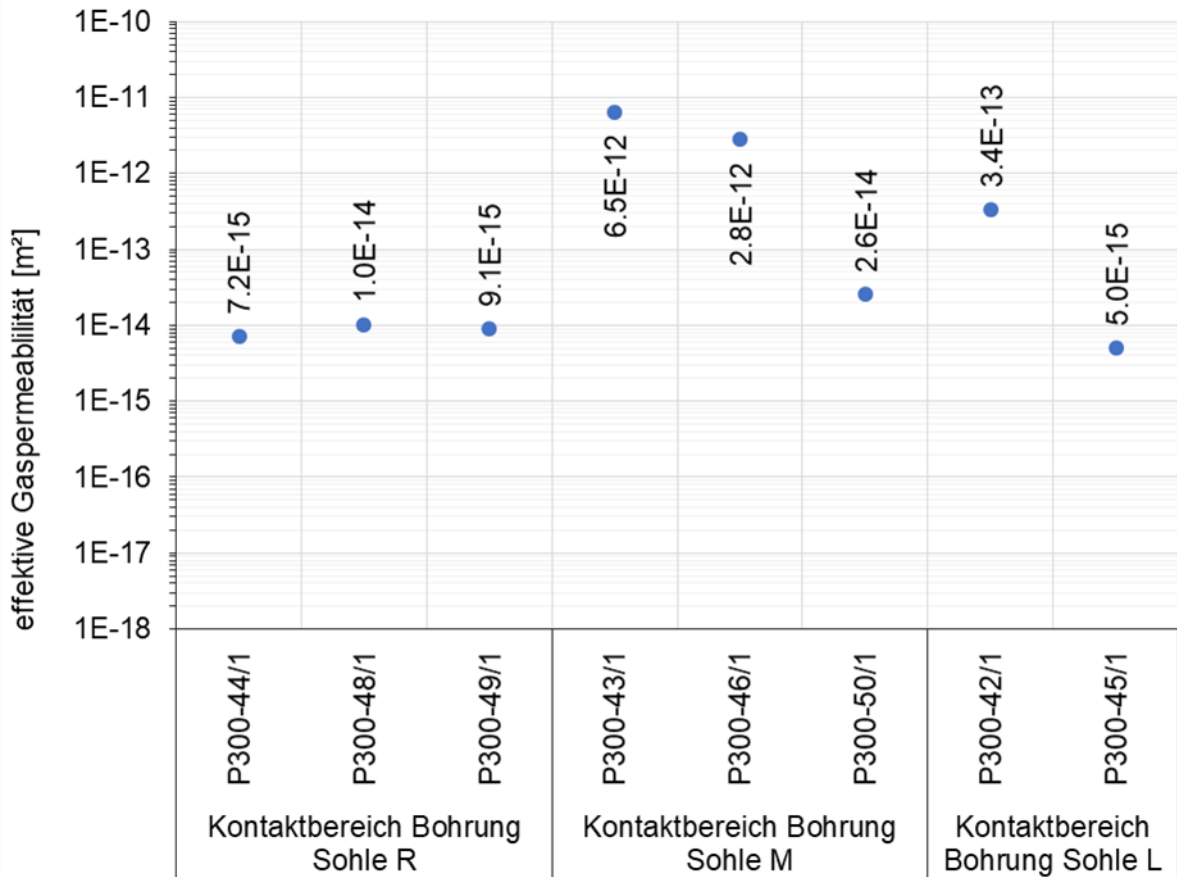


Abbildung 104: An Kernproben ermittelte effektive Gaspermeabilität – Kontaktzone Baustoff/ Gebirge, Sohle, links (L), Mitte (M) und rechts (R)

### 7.3.3.4 CT-Charakterisierung des Kontakts

Für das Kernmaterial der Kontaktzone des Bauwerks wurden zum Ende der Projektlaufzeit CT-Aufnahmen gewonnen – siehe Technischer Anhang.

Die CT-Aufnahmen der Prüfkörper und die augenscheinlichen Beobachtungen an den Kernproben aus dem Sohlbereich des Bauwerkes weisen, neben einer lokalen, sehr festen und wahrscheinlich geringpermeablen Anbindung des Gebirges an die Steinsalzkontur, sichtbare Wegsamkeiten mit Spaltweiten um 1 mm nach – siehe Abbildung 105. Diese Wegsamkeiten im Sohlbereich waren so nicht erwartet worden.

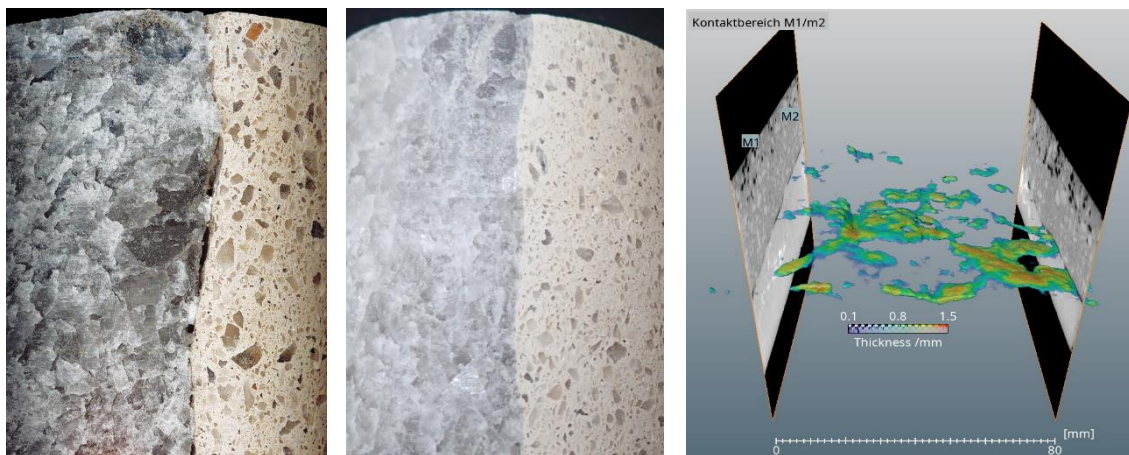


Abbildung 105: Beispiel für die Anbindung im Kontakt MgO-Baustoff/Steinsalzgebirge, links: sichtbare Wegsamkeiten und unzureichende Anbindung, Mitte: augenscheinlich gute Anbindung,

Für diese lokalen Wegsamkeiten sind verschiedene Interpretationen möglich. So kann möglicherweise die Benetzung der Steinsalzoberfläche und der konturnahen Porenstruktur im Steinsalz durch die Baustoffsuspension bzw. die Salzlösung aus der Baustoffsuspension dazu führen. Für die Porosität im konturnahen Steinsalzgebirge  $0,022 \pm 0,018$  (0,002-0,064; N=11, siehe Kapitel 5.7.3.4) ist von einer Größenordnung der Porenraumsättigung von  $0,027 \pm 0,026$  (0,006-0,084; N=11, siehe Kapitel 5.7.3.5) auszugehen. Bei Annahme einer Auflockerungszone mit einer Mächtigkeit von 0,1 m ergibt sich für diese Parameter ein Gasvolumen von ca. 2,1 l pro Quadratmeter Streckensohle. Für ein Dichtsegmente mit einer Höhe von ca. 5 m ist unter dem Einfluss des hydrostatischen Druckes der Baustoffsuspension ungefähr von einer Halbierung des Volumens auszugehen.

In dem ungesättigten Porenraum gelten die Gesetzmäßigkeiten der Zweiphasenströmung. Aufgrund der Grenzflächenspannungen und dem sich für die Porengrößenverteilung ergebenden Kapillardruck ist von einer Benetzung der Porenwandung und einer Aufsättigung des Porenraumes mit Salzlösung aus der Suspension ausgehen. Das initial enthaltene Gas wird durch diesen Prozess verdrängt. Eine mögliche Arbeitshypothese ist, dass sich dieses Gasvolumen im Sohlbereich an der Grenzfläche zwischen Baustoffsuspension und Streckensohle sammelt und nicht oder nur begrenzt entweichen kann. Dieses Gasvolumen könnte eine Ursache für die an den Kernproben nachgewiesenen Wegsamkeiten an der Bauwerkssohle darstellen. Neben diesem Erklärungsansatz wird auch die Ansammlung von Anmachlösung im Kontakt Baustoff/ Gebirge diskutiert.

Aufgrund der großen Bedeutung derartiger Wegsamkeiten für die strömungstechnische Wirkung der Dichtsegmente sollten weitere Untersuchungen zur Klärung der Ursachen und der zugrunde liegenden Prozesse sowie zur Beurteilung des Auftretens entsprechender Wegsamkeiten an den Streckenkonturen durchgeführt werden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sollten Handlungsoptionen zur Vermeidung dieser Wegsamkeiten abgeleitet und getestet werden.

## 8 Testung des Bauwerks mit dem neuen Messsystem

### 8.1 Prozessanalyse und Methodik

Entsprechend den allgemeinen Erläuterungen zum Grundkonzept der strömungstechnischen Testung eines Streckenverschlussbauwerkes im Kapitel 4.1 erfolgt die Testung vorzugsweise über die Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer, die auch als Testkammer bezeichnet wird, mit Gas oder Flüssigkeit. In Abhängigkeit von den Permeabilitätsbedingungen erfolgt die Testung über einen Druckimpuls, mit einem konstanten Volumenstrom oder einem konstanten Fluidruck. Dazu können die Ringkammern in unterschiedlicher Reihenfolge mit Druck beaufschlagt werden.

Im Rahmen des Projektes erfolgte ausschließlich die Druckbeaufschlagung mit trockener Druckluft als Testfluid. Die Testung mit Salzlösung wurde mit dem Ziel, den möglichen Kenntnissgewinn aus der Testung mit Gas auszunutzen, verschoben.

Im Ergebnis der Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer mit einem Druckimpuls kommt es zu einem stark instationären Strömungsprozess<sup>6</sup> aus der Ringkammer in den umgebenden Strömungsraum. Das Abströmen des Gases bewirkt einen Druckabfall in der beaufschlagten Ringkammer. In Abhängigkeit von der Permeabilität des Strömungsraumes zwischen der zentralen und den benachbarten Ringkammern wird in diesen eine Druckreaktion/ ein Druckanstieg hervorgerufen. Die Druckganglinien der zentralen und der benachbarten Ringkammern, die auch als Beobachtungs- oder Kontrollkammern bezeichnet werden, werden mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst.

Durch die Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer werden die Bauwerksintervalle zwischen den Ringkammern getestet. Gleichzeitig kommt es in Folge des möglichen Druckanstieges in den benachbarten Ringkammern ebenfalls zu einem Abstrom des Testfluides aus diesen Kammern in die sich anschließenden Bauwerksabschnitte. Die Druckreaktion in den benachbarten Ringkammern ist damit immer ein Ausdruck der strömungstechnischen Verbindung zur druckbeaufschlagten Ringkammer und der Permeabilitätsbedingungen im weiteren Bauwerksverlauf.

Im Unterschied zu einem Praxisbauwerk mit vollflächiger Verfüllung des Querschnittes mit Dichtbaustoff, ergeben sich für den getesteten Halbdamm geotechnische und strömungstechnische Besonderheiten, die bei der Konzipierung der Testinstallation berücksichtigt wurden und ebenfalls bei der Auswertung der strömungstechnischen Tests berücksichtigt werden müssen.

Die fehlende Firstverfüllung des Bauwerkes führt, im Vergleich zu einem Praxisbauwerk, zu einer abweichenden gebirgsmechanischen Einspannung des gesamten Bauwerkes. Entsprechend den Erläuterungen im Kapitel 7.2.1 besteht zum Zeitpunkt dieser Untersuchungen für den Halbdamm eine mechanische Einspannung von ca. 1,5 MPa im Stoßbereich.

Unter Berücksichtigung der in der Planungsphase vermuteten geringen mechanischen Einspannung des Halbdammes, wurde insbesondere für die Stöße des Halbdammes von einer erhöhten Permeabilität ausgegangen.

Im Rahmen der Bauwerksplanung wurde vermutet, dass es in der Folge zu einem verstärkten Abstrom bzw. einem strömungstechnischen Kurzschluss zur Oberfläche des Bauwerkes kommen wird. Um dies zu detektieren, wurden, zusätzlich zu den drei radial umlaufenden Ringkammern, zwei horizontale Schlauchkammern installiert. Wie aus Abbildung 106 ersichtlich ist, überstreichen diese horizontalen Schlauchkammern HK01 und HK02 den Bauwerksbereich mit den installierten radialen Ringkammern RK01 bis RK03. Da die beiden horizontalen

---

<sup>6</sup> instationär - an jedem diskreten Ortspunkt des beeinflussten Strömungsraumes ändern sich der Gasdruck und die Geschwindigkeit des strömenden Gases

Schlauchkammern HK01 und HK02 nicht über die großvolumigen Kunststoffleitungen, sondern über Edelstahlleitungen mit 4 mm Innendurchmesser angeschlossen wurden (vgl. Kapitel 6.1.4), sind die Messungen in den horizontalen Schlauchkammern HK01 und HK02 besonders sensitiv.

Die horizontale Kammer ist am NW-Stoß zwischen den zwei horizontalen Injektionsleitungen positioniert. Am SE-Stoß ist die horizontale Kammer unterhalb der beiden horizontalen Injektionsleitungen installiert. Damit ermöglichen die beiden horizontalen Schlauchkammern die Erfassung der Strömungsprozesse in den Streckenstoßen in Richtung der Damtoberfläche und bieten gleichzeitig die Möglichkeit, den Einfluss der Injektionsmaßnahmen in den horizontal umlaufenden Injektionsleitungen zu beurteilen.

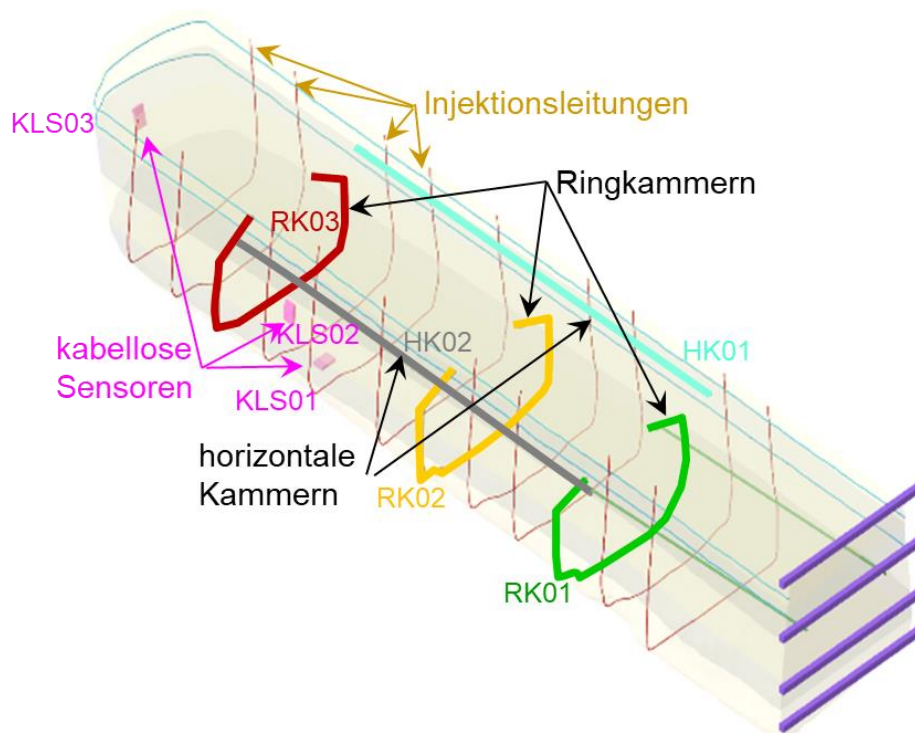


Abbildung 106: Übersicht der Kammer- und Injektionsinstallation im Bauwerk

Für die Testung wird jeweils eine Ringkammer mit Fluiddruck beaufschlagt. Diese ist in diesem Fall die Prüfkammer. Bei der Druckbeaufschlagung wird mit ca. 0,6 MPa Vordruck ein Volumenstrom von ca. 30 Normliter/min eingeregelt. Durch den Volumenstrom kommt es zu der gewünschten Druckerhöhung in der jeweiligen Prüfkammer und der Anschlussleitung. Mit steigendem Druck sinkt der Volumenstrom der Bauaufschlagung bis in die Größenordnung von ca. 10 Normliter/min. Beim Erreichen von ca. 0,41 MPa wird die Zuleitung geschlossen.

Je nach Zuleitungslänge und dem damit verbundenen Volumen wird in der RK01 der gewünschte Prüfdruck von 0,41 MPa nach ca. 1 min und in der RK03 nach ca. 3 min erreicht. Durch Integration des aufgezeichneten Volumenstroms über die Zeit wird das eingeströmte Volumen berechnet (siehe die Erläuterungen zu den zeitabhängigen Effekten in Kapitel 8.3).

Durch die Prüfkammer wird damit ein instationärer Druckimpuls in den angrenzenden Bauwerksbereich eingeleitet, welcher sich auf verschiedenen Strömungspfaden im Bauwerk, im Kontaktbereich und durch das angrenzende Gebirge ausbreitet. Der Strömungsprozess ist abhängig von den lokalen Permeabilitäten zwischen Baustoff und Gebirge und der Ankopplung der Schlauchkammern an den Kontaktbereich.

Gleichzeitig fungieren die anderen, nicht beaufschlagten Kammern als Kontrollkammern, welche durch lokale Zutritte des Strömungsfluides eine mehr oder minder große Druckerhöhung erfassen können.

Damit wird deutlich, dass die Ringkammern eine integrale Beaufschlagung und eine integrale Erfassung von Strömungsprozessen im Kontaktbereich Baustoff – Gebirge bewirken. Aussagen über die in jedem Fall an räumlich diskrete, lokale Wegsamkeiten gebundenen Strömungsprozesse sind nicht möglich.

Die Kammern bewirken immer einen strömungstechnischen Kurzschluss für den zutretenden Volumenstrom über die gesamte Länge bzw. die gesamte Ab- und Anstromfläche der Kammer. Der an eine Kontrollkammer lokal anströmende Druckimpuls wird also über die gesamte Ringkammer verteilt. Die Ringkammern sind ein Äquipotentialvolumen über den Umfang der Strecke.

Zusätzlich zu der großen Instationarität des Strömungsprozesses im Ergebnis der Beaufschlagung der Testkammer mit einem Druckimpuls kommt es durch die Anordnung und strömungstechnische Wirkungsweise der Kammern zu einem räumlich komplexen Strömungsprozess. Für den getesteten Halbdamm ergibt sich durch die horizontalen Kammern eine zusätzliche Komplexität. Für den Einsatz der Testmethodik in Praxisbauwerken spielt dies jedoch keine Rolle. Horizontale Kammern werden in Praxisbauwerken nicht vorgesehen und sind im Nachweiskonzept nicht erforderlich.

Die Instationarität des Strömungsprozesses im Ergebnis der Testung und die komplexen Strömungsbedingungen durch die Lage und Wirkungsweise der einzelnen Kammern, sowie die individuelle Strömungssituation in einem Bauwerk, schließen eine analytische Auswertung eines Bauwerkstestes aus.

Die Interpretation der Druckganglinien erfordert eine modellgestützte Auswertung der durchgeführten Tests. Auf der Grundlage der geometrischen Kenntnisse zum Bauwerk und der Testinstallation, den Kenntnissen zu den thermodynamischen Bedingungen und den ermittelten Druckganglinien für einen Test sind, auf der Grundlage einer modellgestützten Auswertung, Aussagen zur strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes, zu den Strömungsprozessen im Bauwerk und den Permeabilitäten in den einzelnen Abschnitten des Bauwerkes möglich. Eine Erläuterung zur Vorgehensweise bei der Auswertung wird im Kapitel 8.4 gegeben.

Vor dem Hintergrund der Anzahl der durchgeführten Tests und dem großen Kenntniszuwachs aus jeder Testung der Ringkammern, sowie der vielfältigen Beeinflussung der Strömungsprozesse durch die im Kapitel 8.3 dargestellten Prozesse und Einflüsse, erfolgte im Verlauf des Forschungsvorhabens, wie bereits erwähnt, keine vollständige Injektion aller Injektionsleitungen und keine Testung des Bauwerkes mit Salzlösung.

## **8.2 Testprogramm**

Nach der Errichtung und Abkühlung des Bauwerkes wurde eine Vielzahl von strömungstechnischen Tests mit Druckbeaufschlagung der unterschiedlichen Schlauchkammern mit Gas durchgeführt. Die Testung des Bauwerkes begann am 22. September 2021 und endete am 27. Juni 2022. Über den Zeitraum von ca. 9 Monaten wurden insgesamt 54 Tests mit trockener Druckluft als Testfluid durchgeführt. Jeder Test umfasste die Druckbeaufschlagung einer Ring- oder Horizontalkammer und die Erfassung der Druckreaktionen in den anderen Ring- und Horizontalkammern.

Eine Übersicht und vergleichende Gegenüberstellung der Druckganglinien aus allen Druckbeaufschlagungen in den einzelnen Ringkammern und den 2 Horizontalkammern wird in Anlage 12.1 bis Anlage 12.5 gegeben.

Aus den Darstellungen der Druckganglinien für die einzelnen Ringkammern wird deutlich, dass sich das Abstromverhalten aus den druckbeaufschlagten Kammern nur in vergleichsweise geringem Maß verändert hat.

Um die Frage nach der strömungstechnischen Wirkung des Halbdamms zu beantworten (siehe Kapitel 8.7) sind weitere maßgebliche Fragen zu klären:

1. Welchen Einfluss hat die nach oben offene Oberfläche des Bauwerks und der damit mögliche Abstrom nach oben? – Kapitel 8.5.1
2. Welchen Einfluss haben die offenen bzw. unbenutzten Injektionsleitungen? - Kapitel 8.5.2, Anlage 12.7
3. Welchen Einfluss hat die vertikale Erkundungsbohrung B14-164 auf die strömungstechnische Kommunikation zwischen den Ringkammern? - Kapitel 8.5.3, Anlage 12.6
4. Welchen Einfluss haben die Injektionen auf die Druckausbreitung im Kontaktbereich? – Kapitel 8.7.2, Anlage 12.8

Die Testung des Bauwerkes erfolgte in mehreren Etappen. Der Kenntniserwerb aus den einzelnen Untersuchungen und die einzelnen Maßnahmen im Bauwerk bildeten die Grundlage der Fortschreibung der Testplanung.

Die Vorgehensweise bei der Beurteilung und Auswertung der Bauwerkstests wird im Kapitel 8.3 erläutert. Eine Übersicht der wesentlichen Ergebnisse der Bauwerkstests wird im Kapitel 8.5 gegeben.

### **8.3 Zeitabhängigkeit der strömungstechnischen Wirkung**

Das strömungstechnische Verhalten bzw. die strömungstechnische Wirkung des Damms unterliegt einer zeitabhängigen Veränderung. Die zu berücksichtigenden Prozesse werden nachfolgend genannt und kurz erläutert:

#### **1. Abkühlung des abbindenden Baustoffkörpers**

Im Ergebnis der exothermen Abbindereaktion des MgO-Baustoffs kommt es zu einer Erwärmung des gesamten Bauwerkes. In Abhängigkeit von den thermodynamischen Randbedingungen am Standort und der Wärmeleitfähigkeit des Gebirges kühlt sich der Baustoffkörper im Zeitmaßstab von wenigen Monaten - siehe Kapitel 7.2.1 - ab. Beeinflusst von den thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Gebirges und des Baustoffes ist über die Abkühlung im Abbindeverlauf von einer Volumenänderung des Baustoffkörpers und des Gebirges auszugehen. Gleichzeitig können die Temperaturgradienten im Baustoff und im Gebirge und die daraus resultierenden Spannungsgradienten zu thermisch bedingten Rissbildungen führen. Diese thermisch bedingten Auswirkungen können das strömungstechnische Verhalten des Baustoffes, des Kontaktes des Baustoffes zum Gebirge und des Gebirges beeinflussen. Die Volumenänderung in Abhängigkeit von der thermischen Ausdehnung ist dabei auf die Zeitdauer bis zur vollständigen Abkühlung des Bauwerkes und die Einstellung des thermischen Gleichgewichtes zum Gebirge begrenzt. Die möglicherweise entstandenen, thermisch bedingten Rissbildungen behalten jedoch weiterhin Einfluss auf das strömungstechnische Verhalten des Bauwerkes.

#### **2. Abbindevorgang und sekundäre Kristallisationsprozesse**

Die mit dem Abbindevorgang einhergehende Phasenbildung und die langfristige Phasenumbildung während der Kristallisation von MgO-Baustoffen führt zu einem Expansionsverhalten. Die in Abbildung 107 dargestellte zeitabhängige Reduzierung der Volumina der Ringkammern wird als Hinweis auf die Volumenzunahme des Baustoffes bzw. die Abnahme des Volumens der Kammern im Ergebnis der fortschreitenden Kristallisation gesehen.

Die bei jedem Test bestimmten Volumina der Prüfkammern, inklusive der Anschlussrohrleitungen<sup>7</sup> (durchgezogene Linien in Abbildung 107), wurden aus den jeweils gemessenen Gasvolumen für die Druckbeaufschlagung der Impulstests ermittelt.

Dabei ist selbstverständlich zu berücksichtigen, dass es bereits bei der Druckbeaufschlagung zu einem nicht quantifizierbaren Abströmen von Gas aus den Prüfkammern gekommen ist.

Das vom möglichen Abstrom unbeeinflusste Volumen kann über eine Druckbeaufschlagung der Packerschläuche ermittelt werden. Die Packerschläuche füllen im expandierten Zustand das Innere der Schlauchkammern vollständig aus und die Kunststoffanschlussleitungen der Packerschläuche sind nahezu identisch mit der gleichen Länge aufgebaut.

Die gestrichelten Linien in der Abbildung 107 repräsentieren das jeweils von einem Abstrom unbeeinflusste Volumen der Schlauchkammern.

Generell zeigt sich, dass bei den Tests der Prüfkammern etwas höhere Volumina bestimmt werden, was auf den vorgenannten Effekt des instantanen Abstromes bei der Druckbeaufschlagung zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeigt sich bei allen 3 Ringkammern der Trend, dass das Volumen mit der Zeit geringer wird.

Während bei den Ringkammern RK01 und RK03 dieser Trend vergleichsweise klein ist, zeigt sich bei der mittleren Ringkammer RK02 eine deutliche Abnahme des Volumens. Die zeitabhängige Entwicklung des ermittelten Volumens macht deutlich, dass es zu einer Reduzierung dieses Einflusses über die Standzeit des Bauwerkes kommt. Es wird vermutet, dass sich im Abbindeverlauf des Bauwerkes zeitabhängig das Volumen des Porenraumes im unmittelbaren Nahbereich der Ringkammern reduziert, was ebenfalls zu einer Reduzierung des abströmenden Volumens bei der Druckbeaufschlagung führt.

Aus diesen Beobachtungen und Abschätzungen werden folgende Prozesse, trotz gleicher Ursache – der Volumenzunahme des MgO-Baustoffs -, für eine zeitabhängige Reduzierung des Volumens unterschieden, da sie einen unterschiedlich starken Einfluss ausüben:

- zeitabhängige Reduzierung des Volumens der Ringkammern im Ergebnis des Abbindens bzw. der Volumenzunahme des Baustoffes,
- zeitabhängige Reduzierung des umgebenden Porenvolumens im Ergebnis des Abbindens des Baustoffes.

Der im 2. Anstrich genannte zeitabhängige Einfluss wird als wesentlich für die Reduzierung der bestimmten Volumen der Schlauchkammern angesehen. Die Packervolumina, die die Volumina der Ringkammern ohne den Anteil des Abstroms in den angrenzenden Porenraum repräsentieren, verringern sich bei weitem nicht so stark, wie die Volumen mit dem Anteil des Abstroms in den angrenzenden Porenraum. Im weiteren Fortschreiten wird dieser Effekt, gemeinsam mit dem Aufkriechen des Gebirges, zu einer weiteren Reduzierung der Porosität und der daran geknüpften Permeabilität führen.

Erfreulicherweise kann dieser Einfluss der Volumenzunahme des Baustoffs über die Volumenänderung der Ringkammern abgeschätzt werden.

---

<sup>7</sup> Das Volumen der Anschlussleitungen aus Kunststoff ist konstruktionsbedingt ein Bestandteil der Schlauchkammern.

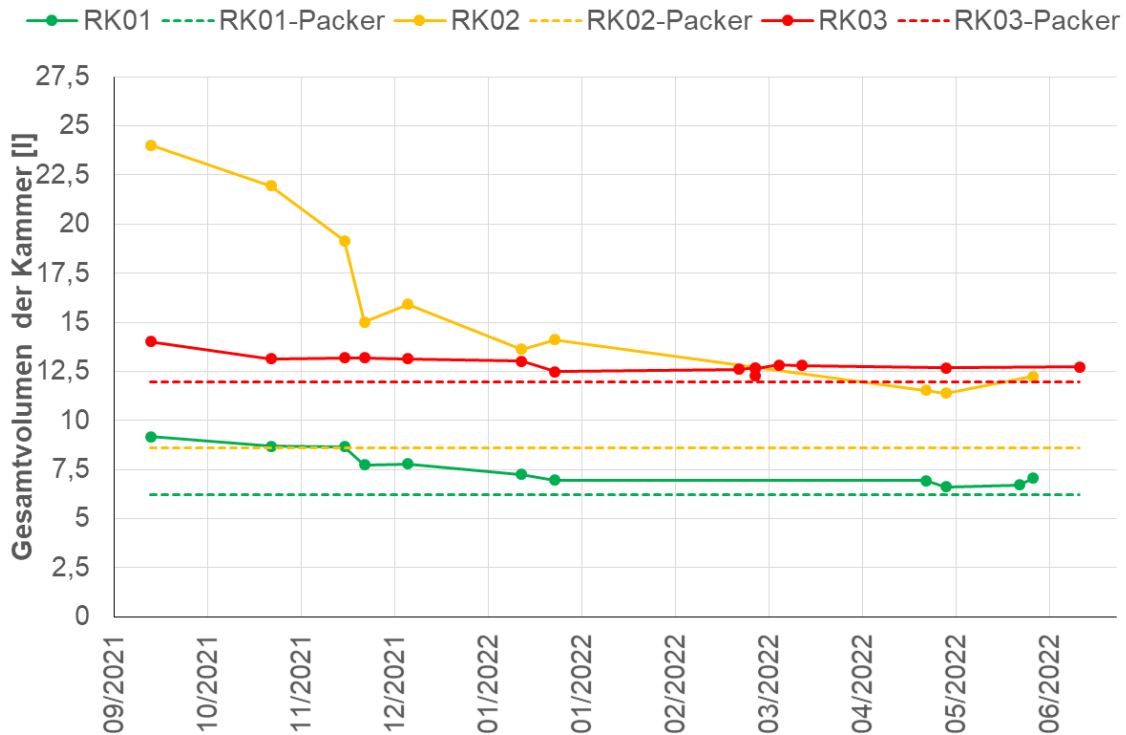


Abbildung 107: Zeitabhängige Änderung der Volumina der Ringkammern

### 3. Konvergenz

Das viskoplastische Verhalten des Salinargebirges führt zeitabhängig zu einer Verformung des umgebenden Gebirges unter der Wirkung der aus der Auffahrung der Strecke resultierenden Spannungsdifferenzen. Im Ergebnis kommt es zeitabhängig zu einer zunehmenden Einspannung des Bauwerkskörpers, wie diese bereits am Bauwerk zu beobachten ist - siehe Erläuterungen im Kapitel 7.2.1, Abbildung 87. Unter dem Einfluss dieses Prozesses ist langfristig von einer vollständigen Einspannung des Halbdammes und dem vollständigen Verschließen aller Wegsamkeiten im Kontakt Baustoff/ Gebirge auszugehen. Über einen großen Zeitraum ist in der Folge eine Reduzierung der integralen Permeabilität der Kontaktzone und damit des gesamten Bauwerkes zu erwarten.

Diese Einspannung des Dichtsegmentes aus kohäsivem Baustoff unter dem spezifischen Verformungsverhalten des Salinargebirges ist wesentlicher Bestandteil des Funktionskonzeptes von Dichtsegmenten aus kohäsiven Materialien. Ohne diesen Wirkmechanismus ist zur Gewährleistung der Funktionssicherheit von kohäsiven Dichtsegmenten die Injektion/ Vergütung des Kontaktes Baustoff/ Gebirge zwingend erforderlich, außer der Baustoff zeigt eine inhärente Volumenzunahme, die die Einspannung des Dichtsegmentes im Gebirge sicherstellt.

### 4. Standortspezifische technische Einflüsse

Die vorstehend genannten Einflussprozesse und Aspekte resultieren im Wesentlichen aus dem spezifischen Verhalten des Dichtbaustoffes, des Gebirges und dem Wechselspiel dieser Prozesse. Neben diesen grundlegenden Prozessen wird die strömungstechnische Wirkung temporär auch durch Einbau und installationstechnische Einflussgrößen bestimmt. Dazu zählen Injektionsleitungen, Erkundungsbohrungen, technologisch bedingte Risse und die Betonierfuge im Baustoffkörper. Die Erfahrungen aus der Testung des Halbdammes - haben folgende zu berücksichtigenden Einflüsse gezeigt:

- strömungstechnischer Einfluss der offenen Oberfläche des Halbdammes,
- strömungstechnischer Anschluss aller Injektionsleitungen zwischen den Ringkammern mit Einfluss auf den Strömungsprozess durch das Volumen der Injektionsleitungen und die Druckentlastung aus dem Bauwerk bis zum Test am 11.01.2022,
- strömungstechnischer Kurzschluss zwischen den Streckenstößen über die horizontalen Injektionsleitungen,
- strömungstechnischer Kurzschluss zwischen den Streckenstößen über die Betonierfuge – siehe Druckganglinien in Anlage 12.4.4 und Anlage 12.5.4,
- strömungstechnischer Einfluss einer Erkundungsbohrung vertikal durch den Baustoffkörper mit strömungstechnischem Anschluss an die Betonierfuge und die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge,
- Injektionen von ausgewählten, radial umlaufenden Injektionsleitungen im Kontakt Baustoff/ Gebirge.

Die genannten, bauwerkspezifischen Aspekte und Besonderheiten.- überlagert/beeinflusst von den grundlegenden Prozessen im Bauwerk - bestimmen zeitabhängig die strömungstechnische Wirkung des Dammbauwerkes und gelten konzeptspezifisch angepasst generell für Dammwerke aus kohäsiven Materialien. Im Verlauf des Projektes haben in erster Linie die im Punkt 4 genannten Aspekte zu der im Kapitel 8.2 genannten Abfolge von Tests des Bauwerkes geführt. Erst die Durchführung und Auswertung dieser Tests haben zu einem Grundverständnis der Strömungsprozesse und zum Verständnis der zu berücksichtigenden Einflüsse geführt. Die Ergebnisse dazu werden im Kapitel 8.5 im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur Auswertung der Tests dargestellt.

#### **8.4 Methodik der Testauswertung**

Die Beurteilung der durchgeführten Bauwerkstests erfolgte nach 2 unterschiedlichen Konzepten:

1. vergleichende Gegenüberstellung der Druckganglinien der unterschiedlichen Tests der einzelnen Etappen – siehe exemplarisch die Darstellungen in Anlage 12.6 und die Ableitung von qualitativen Schlussfolgerungen zur strömungstechnischen Wirkung der durchgeführten Maßnahmen,
2. modellbasierte, numerische Auswertung mit Schlussfolgerungen zur Permeabilität der einzelnen Strömungsräume im Bauwerk.

Das 1. Konzept wurde operativ für die schnelle Gegenüberstellung und vergleichende Beurteilung der durchgeführten Tests angewendet. Aus den Vergleichen wurden Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise bei der Testung abgeleitet.

Eine modellbasierte Auswertung der Bauwerkstests erfolgte nur für ausgewählte Tests.

Eine Übersicht der Methodik der modellgestützten Auswertung und eine Erläuterung zu dem dafür angewendeten Modellkonzept wird in Kapitel 8.6 gegeben.

Neben der Verwendung des Modellkonzeptes für die Anpassung der simulierten an die gemessenen Druckganglinien (Kalibrierung, Parameteridentifikation) kann das Modell ebenfalls für die Prognose der Druckverläufe bei einer gegebenen integralen Permeabilität des Bauwerkes verwendet werden. Diese sogenannte „Vorwärtsrechnung“ ist am Beispiel des Dammbauwerkes mit einer integralen Permeabilität von  $1E-18 \text{ m}^2$  und einer für die Tests angewendet Druckbeaufschlagung in Abbildung 108 dargestellt. Die gewählte Größenordnung des Permeabilitätsniveaus entspricht den Erfahrungen für die Anforderungen an „dichte“ Praxisbauwerke. Das Beispiel der Vorausberechnung an dieser Stelle soll eine Vergleichsmöglichkeit für die Beurteilung der Tests an dem Halbdamm zur Verfügung stellen.

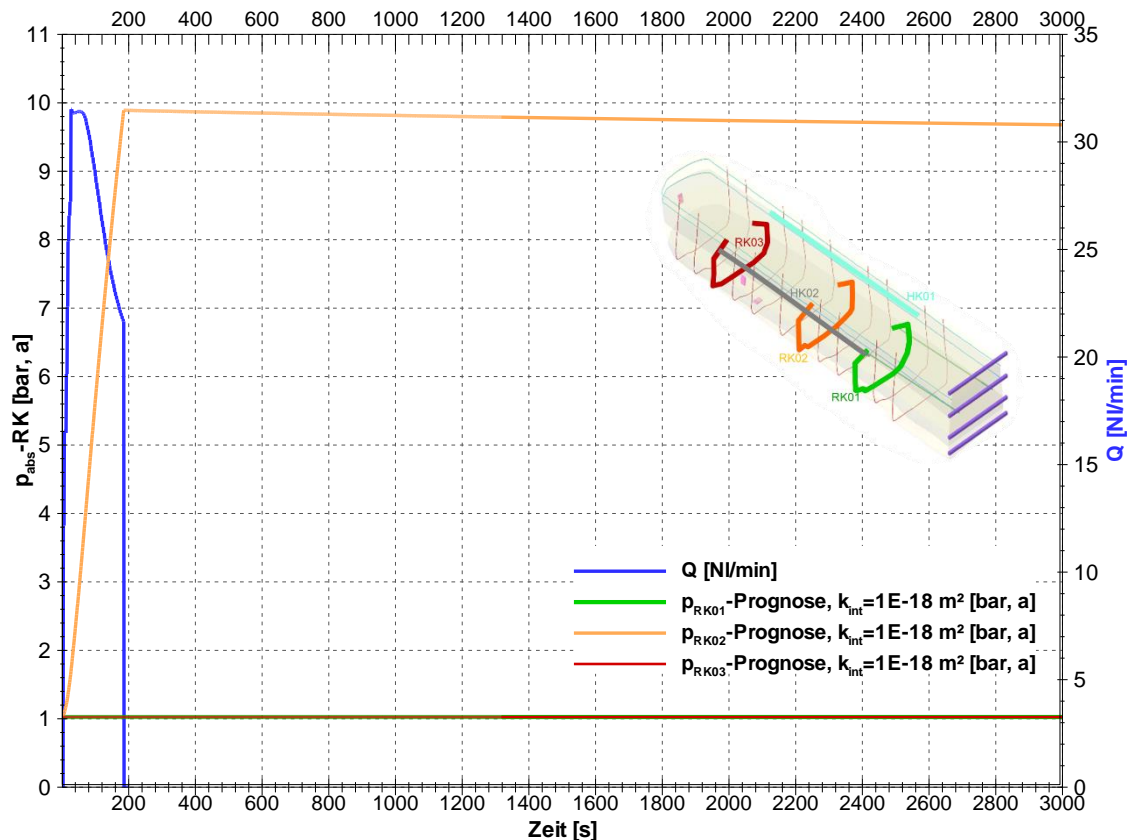


Abbildung 108: Berechnete Druckganglinien für die Annahme einer integralen Permeabilität des Bauwerkes von  $1\text{E-}18\text{ m}^2$

Für die Beurteilung der modellbasierten Testauswertung müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Der im Rahmen des Projektes installierte und getestete Halbdamm wurde nicht mit dem Anspruch einer strömungstechnischen Abdichtung hergestellt. So erfolgte, wie bereits erwähnt, kein Nachschnitt der Streckenkontur. Der Halbdamm diente ausschließlich der Schaffung einer Möglichkeit für die großmaßstäbliche Testung der Methodik für den strömungstechnischen Funktionstest ohne und mit Injektion. Die im Rahmen der Bauwerkstests ermittelten Permeabilitäten als Maß für die strömungstechnische Wirkung des Halbdamms sind daher nicht auf Praxisbauwerke übertragbar.
- Der geometrische Maßstab des Bauwerkes, die Einbindung in die gebirgsmechanischen und thermodynamischen Standortbedingungen stimmen mit den Bedingungen von Praxisbauwerken überein. Daher sind die aus dem Monitoring am und im Bauwerk sowie die im Ergebnis der wiederholten Bauwerkstestung gewonnenen Kenntnisse zur Veränderung als repräsentativ für die ablaufenden Prozesse anzusehen. Die sich ergebenden Zusammenhänge und relativen Prozessparameter sind auf die zu erwartenden Vorgänge in Praxisbauwerken übertragbar.
- Die Entwicklung des Modells für die Auswertung der Bauwerkstests erfordert immer die vorlaufende Ermittlung der Permeabilität des Gebirges in in situ-Permeabilitätsuntersuchungen und des Baustoffes in Laboruntersuchungen. Die strömungstechnische Testung des installierten Bauwerkes bzw. der Bauwerksabschnitte erfasst dann die integrale Wirkung des Kontaktes zwischen Baustoff und Gebirge auf die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes.
- Die Anpassung der mit dem numerischen Modell berechneten Druckganglinien an die gemessenen Druckganglinien erfolgt über die Variation der Geometrie, der Permeabilität und der Porosität des Kontaktbereiches Baustoff/ Gebirge zwischen den drei Ringkammern. Dabei erfolgt die Variation der genannten Parameter ausschließlich in einem plausiblen, auf begründbaren Kenntnissen und Erfahrungen vorgegebenen Wertebereichen.

Mit diesen Erläuterungen soll darauf hingewiesen werden, dass die im Ergebnis der modellbasierten Parameteridentifikation ermittelten Permeabilitäten und Geometrien nicht eindeutig sein müssen. Die daraus ermittelten integralen Parameter für das Bauwerk werden jedoch als plausibel angesehen, da die Gesamtbilanz des für die Druckbeaufschlagung angewendeten Volumens am Ende der Modellrechnung abgebildet wird.

## **8.5 Vorlaufende Testauswertungen**

### **8.5.1 Einfluss der offenen Oberfläche des Bauwerkes – horizontale Kammern HK01, HK02**

Durch die konstruktive Randbedingung, dass der Versuchsdamm nur den halben Querschnitt der Strecke verschliesst, musste der mögliche Einfluss der offenen Oberfläche auf die Ergebnisse der strömungstechnischen Testung des Bauwerkes berücksichtigt werden. Zur Erfassung des möglichen Abstroms von Testfluid über die Streckenstöße zur offenen Oberfläche des Bauwerkes wurden in das Bauwerk die horizontalen Kammern HK01 am NW-Stoß und HK02 am SE-Stoß installiert (Abbildung 106).

Bei 8 Testungen der vorderen Ringkammer RK01 wurden in der HK01 am rechten NW-Stoß kaum messbare Druckanstiege unterhalb von 0,5 kPa nachgewiesen (siehe Anlage 12.1.3). Für die HK02 am SE-Stoß wurden Druckanstiege bis 3 kPa registriert (siehe Anlage 12.1.4).

Bei 8 Testungen der Ringkammer RK02, welche genau in der Mitte der horizontalen Schlauchkammern liegt, wurden in der HK01 am NW-Stoß kaum messbare Druckanstiege bis zu 0,5 kPa nachgewiesen (siehe Anlage 12.2.3).

Die 3. Testung am 25.11.2021 stellt eine Ausnahme dar. Im Verlauf dieses Tests wurde ein deutlich höherer Druckanstieg von ca. 3 kPa erfasst. Inwiefern es sich dabei um ein messtechnisches Artefakt handelt oder tatsächlich eine temporär stärkere strömungstechnische Ankopplung eingetreten ist, kann nicht beurteilt werden.

Am SE-Stoß wurden in der HK02 Druckanstiege bis 10 kPa gemessen (siehe Anlage 12.2.4).

Bei 10 Testungen der hinteren Ringkammer RK03 wurden in der HK01 am NW-Stoß kaum messbare Druckanstiege bis 1,5 kPa nachgewiesen (siehe Anlage 12.3.3). Für die horizontale Kammer HK02 am SE-Stoß wurden Druckanstiege bis 6 kPa gemessen (siehe Anlage 12.3.4).

Grundsätzlich zeigt sich, dass die Horizontalkammer HK01 am NW-Stoß nicht maßgeblich in einem strömungstechnischen Kontakt mit den Ringkammern steht. Im Maximum wurden nur geringe Druckspitzen von ca. 1,5 kPa bei bis zu 410 kPa Prüfdruck (relativ) erfasst. Auch die geringen Druckreaktionen von bis zu 10 kPa für die horizontale Kammer HK02 am SE-Stoß lässt nur auf eine geringe strömungstechnische Ankopplung der horizontalen Ringkammern an die Strömungsprozesse der radial umlaufenden Ringkammern RK01 bis RK03 schließen.

Der Unterschied in den erfassten Druckreaktionen der beiden horizontalen Kammern liegt vermutlich an der unterschiedlichen Position an den Stößen – siehe Abbildung 106 und Anlage 3. Die horizontale Kammer HK01 am NW-Stoß liegt ca. 0,7 m über den Ringkammern und ca. 0,5 m unter der Bauwerksoberfläche. Die horizontale Kammer HK02 am SE-Stoß liegt nur ca. 0,45 m oberhalb der Ringkammern. Gleichzeitig verläuft die Kammer ca. 0,75 m unterhalb der Bauwerksoberfläche.

Auch die horizontalen Schlauchkammern HK01 (siehe Anlage 12.4) und HK02 (siehe Anlage 12.5) wurden getestet. Die Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass ein Abstrom der in die Ringkammern eingeleiteten Druckimpulse über die Oberfläche des Bauwerks vernachlässigbar ist. Dieses Ergebnis ist wichtig für die Bewertung der strömungstechnischen Kommunikation der Ringkammern.

Bemerkenswert ist die strömungstechnische Kommunikation zwischen den horizontalen Schlauchkammern, welche theoretisch über den aufgelockerten Kontaktbereich um das MgO-Bauwerk herum oder durch die horizontal umlaufenden beiden Injektionsleitungen erfolgen kann. Bei der Beaufschlagung der horizontalen Kammer HK01 am NW-Stoß kommt es in der horizontalen Kammer HK02 am SE-Stoß nur zu einer geringen Drucksteigerung von ca. 1,5 kPa (siehe Anlage 12.4.4).

In umgekehrter Richtung, bei der Beaufschlagung der Kammer HK02 am SE-Stoß kommt es in der Kammer HK01 am NW-Stoß zu einer deutlichen Drucksteigerung mit Druckmaxima zwischen 6 kPa und deutlich über 10 kPa - siehe Anlage 12.5.4.

Auffallend ist, dass die beiden Tests nach der Injektion der oberen Injektionsleitung am 22.03.2022 (siehe 2. Kampagne im Kapitel 6.3), nur noch eine deutlich geringere Drucksteigerung um ca. 1 kPa in der Kammer HK01 aufzeigen. Es wird vermutet, dass vor der Injektion<sup>8</sup> der oberen horizontalen Injektionsleitung, diese maßgeblich die strömungstechnische Kommunikation zwischen den beiden horizontalen Kammern beeinflusst hat. Ein strömungstechnischer Einfluss der unteren Injektionsleitung zeigte sich nicht.

## 8.5.2 Einfluss der Injektionsleitungen

Im Kontakt Baustoff/ Gebirge wurden, in regelmäßigen Abständen von 1 m, 9 Injektionsleitungen verlegt - siehe Kapitel 6.1.3 und Anlage 3. Die verwendeten Injektionsleitungen haben einen speziellen Aufbau, der einen Einstrom in die Leitung verhindert, wohingegen der Austrag des Injektionsmaterials möglich ist.

Während den Testungen wurde festgestellt, dass eine Gasdichtheit der Injektionsleitungen in keiner Weise gegeben ist. Dadurch wirken die Injektionsleitungen wie zusätzliche Ringkammern entlang der Bauwerkskontur.

Die Injektionsleitungen wurden an die Bauwerksoberfläche geführt und dort mit Anschlüssen versehen, die mit Baustopfen verschlossen wurden. Bei den Testungen wurde festgestellt, dass alle Injektionsleitungen während den Testungen einen Druck entsprechend des jeweils lokalen Druckgradienten aufbauten.

Da dieser Einfluss zu dem Zeitpunkt bautechnisch nicht zu ändern war, wurde ein sicherer gasdichter Verschluss der Injektionsleitungen vorgenommen, um den Abstrom über die Injektionsleitungen zu verhindern.

Um in den Druckganglinien in der Anlage 11.6 eine Unterscheidung zwischen den mehr oder weniger offenen Injektionsleitungen und den ab dem 21.01.2022 verschlossenen Injektionsleitungen zu ermöglichen, wurde in der Legende das Kürzel „IR offen“ oder „IR zu“ verwendet.

Um die strömungstechnische Anbindung der Injektionsleitungen qualitativ zu bewerten, wurden alle 3 Ringkammern getestet und dabei der Druckaufbau in den davor und dahinter installierten Injektionsleitungen aufgezeichnet (Anlage 12.7). Dafür wurden jeweils die Drucksensoren der beiden horizontalen Kammern verwendet. Daher liegen für diese Untersuchungen keine Daten zum Druckaufbau in den horizontalen Kammern vor.

Es zeigte sich, dass bei jeweils 400 kPa Überdruck bei der Testung innerhalb weniger hundert Sekunden ein Druckmaximum von 12 % bis fast 50 % des Testdrucks in den benachbarten Injektionsschläuchen erreicht wurde. Die Injektionsleitung IR04, neben der Ringkammer RK02, zeigte die stärkste strömungstechnische Kopplung, da fast 50 % des Testdrucks innerhalb von

---

<sup>8</sup> Wie im Kapitel 8.5.1 beschrieben, wurde in der oberen horizontalen Injektionsleitung kaum ein maßgeblicher Injektionserfolg erreicht, sodass bereits die Verfüllung der Leitung maßgeblich für die gemachte Beobachtung ist.

180 s registriert wurden. Das andere Extrem ist die Injektionsleitung IR08 neben der Ringkammer RK03. Für diese Injektionsleitung wurden nur ca. 4 % des Testdrucks innerhalb von ca. 750 s registriert.

Grundsätzlich zeigten diese Beobachtungen, dass alle Injektionsleitungen strömungstechnisch mit dem Kontaktbereich verbunden sind, woraufhin seinerzeit die geplanten Injektionsarbeiten als Erfolgshöflich angesehen wurden.

### **8.5.3 Einfluss der Erkundungsbohrungen B14-164 und B15-164**

Wie in Kapitel 7.3 beschrieben, erfolgte eine strömungstechnische Charakterisierung des Dammbauwerks einschließlich der Betonierfugen und des angrenzenden Salinars. Dazu wurde die Bohrung B14-164 (siehe Abbildung 91) vertikal durch den MgO-Baukörper und die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge bis ca. 0,8 m in das Salinar hineingestoßen.

Damit wurde die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge auf der Sohle zwischen dem 3. und 4. Injektionsring bzw. zwischen den Ringkammern RK01 und RK02 mit der Oberfläche des Bauwerkes bzw. der Grubenatmosphäre verbunden.

Für die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge in der Sohle des Bauwerkes wurde eine Gaspermeabilität von bis zu  $2,9E-15$  m<sup>2</sup> nachgewiesen. Für diese Gegebenheiten musste geprüft werden, inwiefern die Bohrung Einfluss auf die strömungstechnische Testung der Ringkammern nimmt. Die Druckganglinien der dazu durchgeführten Tests sind in Anlage 12.6 dargestellt.

Um in den Druckganglinien in der Anlage 12.6 eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Zuständen zu ermöglichen, wurden in der Legende folgende Kürzel verwendet:

- „m.Bohrung“ mit Bohrung, ohne Durchörterung des Kontaktbereiches,
- „m.KB-Bohrung“ mit Bohrung, mit Durchörterung des Kontaktbereiches,
- „o.KB-Bohrung“ mit abgepackterter KB-Bohrung (Packer bei ca. 2 m Teufe gesetzt, ca. 5 l Bohrlochvolumen zwischen Unterkante Packer und Bohrlochtiefe).

Die Auswertung der Tests erfolgte rein qualitativ durch den Vergleich der erfassten Druckganglinien. Erwartungsgemäß war der Einfluss bei den Testungen der Ringkammern RK01 und RK02 am deutlichsten, da die Bohrung B14-164 genau mittig zwischen diesen beiden Ringkammern positioniert ist.

Bei der Beaufschlagung der RK01 mit ca. 410 kPa Überdruck stellt sich in der Ringkammer RK02, ohne die Bohrung im Kontaktbereich, nach ca. 900 s ein Druck von 33 kPa ein. Mit der offenen Bohrung im Kontaktbereich wird nach 900 s nur noch ein Druck von ca. 20 kPa erreicht. Es ist davon auszugehen, dass ein Teil des Gasvolumens aus dem Druckimpuls durch die offene Bohrung in die Grubenatmosphäre abströmt.

Nach dem Verschließen der Bohrung B14-164 mit einem Packer bei ca. 2 m Teufe, stieg das Druckmaximum in der Kontrollkammer RK02 wieder auf ca. 27 kPa. Dieses Maximum wurde jedoch erst nach ca. 1300 s erreicht. Die zeitliche Verzögerung entsteht, da im abgepackten Bohrloch noch das Restvolumen von ca. 5 l besteht, welches an den Kontaktbereich angeschlossen ist und damit die barometrische Trägheit erhöht.

Anhand der Druckganglinien in der weiter entfernten Kontrollkammer RK03 ist der Unterschied zwischen der offenen und der abgepackten Bohrung nicht eindeutig zu identifizieren.

Bei der Druckbeaufschlagung der Ringkammer RK03 zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei sogar anhand der Druckganglinien in der Prüfkammer RK02 der Einfluss der Bohrung nachweisbar ist. Ohne die Bohrung durch die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge fällt der Druck deutlich langsamer als unter dem Einfluss des Abstroms über die Bohrung. Der Druckfall mit der abgepackten Bohrung ordnet sich zwischen den Druckganglinien der voran genannten Tests ein.

Bei den Testungen der am weitesten entfernten Ringkammer RK03 zeigt sich ein eindeutiger Einfluss der Bohrung in der Kontaktzone. Während die Druckabfallkurven in der Prüfkammer RK03 eher von anderen zeitlichen Effekten beeinflusst werden, zeigt sich in den Kontrollkammern die Drainagewirkung der Bohrung, die die Druckreaktion limitiert.

Auch bei den Testungen der horizontalen Kammer HK02 zeigt sich ein Einfluss der Bohrung, wobei aber nur Datensätze bei offener und abgepackter Bohrung im Kontaktbereich verglichen werden können. Dabei zeigte sich, dass in allen anderen Kammern bei abgepackter Bohrung höhere Drücke erreicht wurden, als bei offener Bohrung. Da die zu vergleichenden Drücke alle unterhalb von 10 kPa lagen und die Druckmaxima nicht innerhalb von ca. 2500 s erreicht wurden, zeigt sich, dass die strömungstechnische Kommunikation zwischen der horizontalen Kammer HK02 und den drei Ringkammern vergleichsweise gering ist.

Andere Daten oder auch Daten zur horizontalen Schlauchkammer HK01 wurden nicht erfasst.

Für die Erkundungsbohrung B15-164, die neben der Bohrung B14-164 über 2,13 m Länge im Baustoff verläuft, konnte kein Einfluss auf die Testungen der Ringkammern identifiziert werden.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Untersuchungen einen deutlichen Einfluss der Bohrung durch die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge in der Sohle des Bauwerkes zeigen. Offensichtlich sind alle Kammern an ein strömungstechnisches „Netzwerk“, verteilt auf den gesamten Kontaktbereich des Bauwerks, angeschlossen. Die Erwartung der hohen strömungstechnischen Bedeutung des Kontaktbereiches lag dem Testkonzept zugrunde und hat sich durch diese Untersuchung erneut bestätigt.

Ein Einfluss der Betonierfugen auf die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes kann aus den vorliegenden Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Die Größenordnung der Permeabilität im Bereich der Betonierfugen ist geringer als in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge. In dieser Situation wurden die Betonierfugen im strömungstechnischen Modell des Standortes für die Auswertung der durchgeführten Tests nicht berücksichtigt.

## **8.6 Modellgestützte Auswertung Bauwerkstest - Auswertemodell**

### **8.6.1 Konzept**

Für die modellgestützte Auswertung der Druckbeaufschlagung des Bauwerkes wurde ein generelles Modell aufgebaut, das für die modellgestützte Auswertung der Druckbeaufschlagungen über die Ringkammern RK02, RK01 und RK03 verwendet wurde. Grundlage der Auswertung der durchgeführten in situ-Tests bilden die Kenntnisse zur Geometrie des Bauwerkes und der installierten Ringkammern, der Volumen der Kammern, der thermodynamischen Bedingungen am Standort, der strömungstechnischen Eigenschaften des verwendeten Gases sowie der in den Tests ermittelten Druckganglinien.

Für die Auswertung der Bauwerkstests wurde ein dreidimensionales Modell mit  $r$ - $\varphi$ - $z$  Geometrie (Zylindergeometrie) aufgebaut. Über die Diskretisierung in der Zylindergeometrie ist es möglich, die strömungswirksamen Flächen im realen Bauwerk auf äquivalente Flächen in der Modellgeometrie zu übertragen. Die Vereinfachung auf ein Modell mit Zylindergeometrie erfolgte mit der Zielstellung einer Vereinfachung des Modellaufbaus bei gleichzeitiger Einhaltung der strömungstechnisch bestimmenden Flächen. Gleichzeitig ermöglicht die Zylindergeometrie eine individuelle Diskretisierung der für den Strömungsprozess bestimmenden Teilräume im Modell.

Der Modellraum wird, in Abhängigkeit vom Aufbau des Verschlussbauwerkes mit der erforderlichen Auflösung in den Raumkoordinaten diskretisiert. In  $r$ -Richtung wird der Radius ausgehend von der Bauwerksachse und in  $z$ -Richtung wird die Länge des Bauwerkes aufgetragen. Über den Winkel  $\varphi$  wird der radiale Aufbau vorgegeben. In Abbildung 109 ist beispielhaft der

Aufbau eines solchen Modells dargestellt. Die unterschiedlichen Farben kennzeichnen Strömungsräume mit unterschiedlichen Permeabilitäten innerhalb des Modells - Baustoffkörper, Auflockerungszone Gebirge, Gebirge, Kontakt Baustoffkörper/ Gebirge. Mit dem durch die IBeWa im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens weiterentwickelten und verifizierten Programmsystem ModOFFP (Version 4.0, Stand von 2016) wird die partielle Differentialgleichung für die instationäre, isotherme Strömung für Gas bzw. für eine Flüssigkeit gelöst.

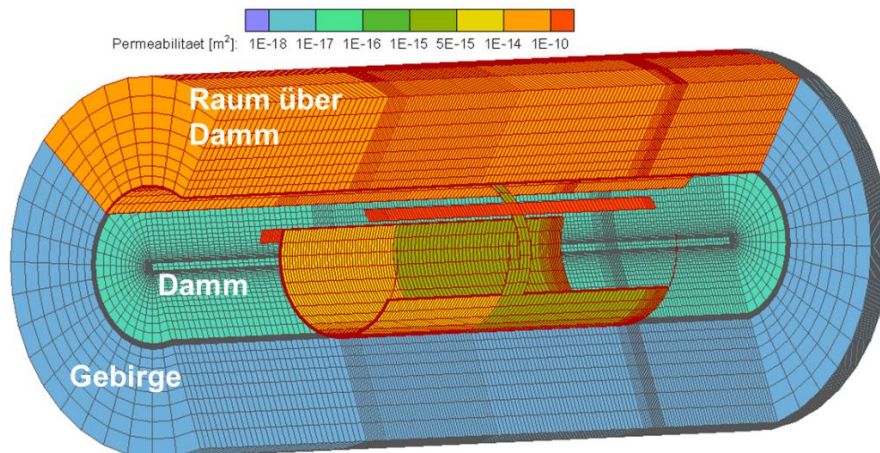


Abbildung 109: Übersichtsdarstellung des numerischen Modells für die Auswertung der in situ-Tests im Bauwerk

Die modellgestützte Auswertung berücksichtigt die Phase der Druckbeaufschlagung und des instationären Strömungsprozesses im gesamten Bauwerk nach Beendigung der Druckbeaufschlagung. Damit ist gewährleistet, dass das in der Druckbeaufschlagung injizierte Fluidvolumen vollständig in Massenbilanz der Berechnungen berücksichtigt wird.

Die Parametrisierung des Modells erfolgt auf der Grundlage von in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Gebirge und Laboruntersuchungen an Kernproben des Dichtmaterials. Auf der Grundlage der Kenntnisse und Erfahrungen aus der Testung von Streckenverschlussbauwerken aus kohäsivem Material, den Ergebnissen von in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Kontakt Baustoff/ Gebirge sowie den Ergebnissen der Kernuntersuchungen aus diesem Bereich kann geschlussfolgert werden, dass in der Anfangsphase die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes durch die Kontaktzone von Baustoff und Gebirge bestimmt wird. Unter Berücksichtigung der Erläuterungen im Kapitel 8.3, ist zeitabhängig von einer Reduzierung der Permeabilität in diesem Kontaktbereich auszugehen. Für die vergleichsweise kurze Standzeit des Halbdammes erfolgte die Anpassung in 1. Linie auf der Grundlage der Variation der Geometrie und Permeabilität im Kontakt Baustoff/ Gebirge.

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.

## 8.6.2 Diskretisierung

Für die modellgestützte Auswertung der durchgeführten Bauwerkstests wurde ein Zylindermmodell mit einem Radius von 3,44 m und einer Länge von 16 m erstellt. Die Diskretisierung der r-,  $\varphi$ - und z-Koordinaten wurde mit  $50 \times 36 \times 200$  vorgegeben. Der Baustoffkörper wurde mit einer äquivalenten Kreisfläche von 6,51 m und dem sich dafür ergebenden Radius von 1,44 m im Modell abgebildet. Die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge wurde mit einem 2 mm starken Kreisring berücksichtigt. Im Bauwerkskörper wurde der Bereich von 1,38 m Radius bis 1,44 m Radius mit 10 Elementen vorgegeben. Die Auflockerungszone im Gebirge wurde bis zu einem Radius von 1,48 m ebenfalls mit 10 Elementen abgebildet.

Die radial umlaufenden Ringkammern wurden ebenfalls als Kreisringsegment im Kontakt Baustoff/ Gebirge in das Modell implementiert. Die Horizontalkammern wurden als Linienelement einer Reihe von Modellelementen im Kontakt Baustoff/ Gebirge vorgegeben.

Die Vorgabe des Volumens der Kammern erfolgt unabhängig vom geometrischen Volumen der Modellelemente in den Kreisringen bzw. den horizontalen Linienelementen. Das verwendete Programmsystem ModOFP ermöglicht die Vorgabe von räumlich diskreten Modellabschnitten mit definierten Volumina. Diese wurden jeweils den Modelläquivalenten der Ringkammern und der Horizontalkammern zugeordnet. Die Abmessungen der Kammern wurden so gewählt, dass die Ab- und Anstromfläche im Kontakt Baustoff/ Gebirge so gering wie möglich ist.

Die Abbildung der einzelnen Strömungsräume – Baustoffkörper, Auflockerungszone Gebirge, Gebirge, Kontakt Baustoffkörper/ Gebirge - im Modell erfolgte über die entsprechende Zuordnung der strömungstechnischen Eigenschaften Permeabilität und Porosität - siehe nachfolgende Tabelle 20.

### 8.6.3 Parameterbelegung

Die Parametrisierung der Strömungsräume im Modell erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Gebirge und den laborativen Untersuchungen an Probenkörpern aus dem Baustoff. Die nachfolgende Tabelle 20 fasst die Parameterangaben für die einzelnen Strömungsräume und die zugrunde liegenden Ergebnisse zusammen.

Tabelle 20: Parameterbelegung der einzelnen Strömungsräume

Strömungsraum	Einheit	MgO-Baustoffkörper	Auflockerungszone Gebirge	ungestörtes Gebirge
Ausgangsparameter				
Messwerte effektive in situ-Gas-permeabilität	[m <sup>2</sup> ]	2,1E-17 (N= 1)	-	-
Stoß	[m <sup>2</sup> ]	-	3,1E-19±2,8E-19 (7,0E-20-6,8E-19; N= 6)	1,6E-21 (N=1)
Sohle			2,1E-15±1,2E-14 (2,3E-18-3,0E-14; N= 6)	3,0E-22 (N=1)
Messwerte effektive Gaspermeabilität Kernproben	[m <sup>2</sup> ]	1,8E-16 (9,0E-18– 2,4E-13; N=11)	-	3,5E-17 (8,1E-18– 3,1E-16; N=8)
totale Porosität aus Messwerten	[-]	45 °C: 0,150±0,020 (0,103-0,190; N=49) 60 °C: 0,212±0,012 (0,188-0,235; N=17)	60 °C 0,022±0,018 (0,002-0,064; N=11)	
effektive Porosität aus Parameteridentifikation instationäre Permeabilitätsversuche		0,114±0,032 (0,070-0,170; N=10)		
Modellparameter (Startparameter)				
Permeabilität	[m <sup>2</sup> ]	2,1E-17	3,1E-19 / 2,1E-15	1,6E-21 / 3,0E-20
strömungswirksame Porosität	[-]	0,114	0,050	0,001

Im Ergebnis der laborativen Permeabilitätsuntersuchungen an Prüfkörpern des Baustoffes und den in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im Gebirge liegen effektive Gaspermeabilitäten<sup>9</sup> vor. In Auswertung der Wassergehaltsuntersuchungen an den abgebundenen Baustoffproben wurde eine Porenraumsättigung von  $0,370 \pm 0,072$  (0,215-0,584; N=49) ermittelt. An Kernproben aus den Bohrungen der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen wurde eine Porenraumsättigung von  $0,027 \pm 0,026$  (0,006-0,084; N=11) nachgewiesen. Ausgehend von diesen Porenraumsättigungen und in Kenntnis der Porengrößenverteilung der beiden Materialien (siehe Kapitel 5.7.3.8 – Salz, Kapitel 7.3.3.2– MgO-Baustoff) wird angenommen, dass die Flüssigkeit im Ergebnis der Kapillarkräfte in den kleinsten Poren gebunden ist. Ein Einfluss auf die Strömungsprozesse in den für die Strömungsprozesse bestimmenden, verbundenen Makroporen der beiden Materialien wird als vernachlässigbar angesehen.

Die sich aus den Bauwerkstests ergebenden Beobachtungen und Schlussfolgerungen zu den schnellen Druckreaktionen in den einzelnen Kammern führten schnell zu der Schlussfolgerung, dass, - wie für andere Streckenverschlussbauwerke aus kohäsivem Material - die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge bestimmend für die strömungstechnische Wirkung des Halbdammes im Untersuchungszustand ist. Mit dieser Kenntnis wurde die Auflockerungszone im Gebirge nicht im Detail abgebildet. Es ist davon auszugehen, dass die Permeabilität im Kontakt Baustoff/ Gebirge um mehrere Größenordnungen über der Permeabilität der Auflockerungszone des Gebirges liegt. Daher wurde auf eine Parameterabstufung in der Auflockerungszone des Gebirges verzichtet. Die strömungstechnische Wirkung der veränderlichen Permeabilität in der Auflockerungszone des Gebirges kann für diese Bedingungen vernachlässigt werden.

## **8.7 Testauswertungen - Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes**

Vorauslaufend ist anzumerken, dass eine vergleichende Beurteilung der zeitabhängigen Veränderung der strömungstechnischen Wirkung des Bauwerkes aus den im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Bauwerkstests (noch) nicht möglich ist. Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen für die Tests durch die gezielt durchgeführten Maßnahmen entsprechend der Aufzählung im Kapitel 8.2 lassen (noch) keine vergleichende Beurteilung zur zeitlichen Entwicklung zu - siehe dazu insbesondere die Erläuterungen im Kapitel 8.3, Punkt 4.

Abschließend zum Vorhaben wurden am 13. und 27. Juni 2022 Bauwerkstests für alle Ringkammern durchgeführt. Diese Tests charakterisieren die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes am Projektende und können als Referenztests für künftige Testwiederholungen zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung herangezogen werden. Als Ausgangspunkt für diese Untersuchungen werden nachfolgend die Tests der 3 Ringkammern und die zugehörigen modellgestützten Auswertungen in einer Übersicht dargestellt.

Für die Darstellung und Diskussion der Tests werden in den Grafiken jeweils die Farben der Ringkammern entsprechend der Darstellung in Abbildung 106 verwendet:

Kammer      gemessen / simuliert

RK01    hellgrün / dunkelgrün

RK02    orange / braun

RK03    rot / rose

HK01    türkis / hellblau

---

<sup>9</sup> Effektive Gaspermeabilität – möglicherweise von der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit beeinflusste Permeabilität

HK02 schwarz / grau

Volumenstrom blau

## **8.7.1 Auswertung der Druckbeaufschlagungen der Ringkammern**

### **8.7.1.1 Ringkammer RK02 mit Erläuterungen zum Auswertemodell**

Die Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer RK02 wird als prominentester Test für die Beurteilung der strömungstechnischen Gegebenheiten im Bauwerk angesehen. Die Druckreaktionen in den davor und dahinter positionierten Ringkammern RK01 und RK03 ermöglichen sehr schnell, bereits auf der Grundlage der qualitativen Beurteilung der Druckganglinien, eine Beurteilung der Strömungsprozesse in den Bauwerksabschnitten zwischen den Kammern.

Aufgrund dieser Aussagekraft wird anhand der Testung der zentralen Ringkammer RK02 am 13. Juni 2022 die Interpretation und Auswertung eines Tests nachfolgend etwas detaillierter dargestellt. In den Erläuterungen zur Testung der Ringkammern RK01 und RK03 in den nachfolgenden Kapiteln 0 und 8.7.1.3 wird ausschließlich auf die Ergebnisse und Interpretationen dieser Tests eingegangen.

Die Druckganglinien in der nachfolgenden Abbildung 110 verdeutlicht, dass es für die Druckbeaufschlagung mit einem Druckimpuls bis in die Höhe von 0,4 MPa (Relativdruck) innerhalb von ca. 200 Sekunden zu einer Druckreaktion in der vorderen Ringkammer (RK01, grüne Ganglinie) und nach ca. 300 Sekunden zu einer sichtbaren Druckreaktion in der hinteren Ringkammer (RK03, rote Ganglinie) kommt. In einem Zeithorizont von ca. 2700 Sekunden ist der Druck der beaufschlagten mittleren Ringkammer (RK02, orange Ganglinie) bis auf einen Restdruck von ca. 0,06 MPa abgefallen. Die schnellen Druckreaktionen in den Ringkammern RK01 und RK03 sind eine qualitative Bestätigung der vorliegenden Kenntnisse zum Vorhandensein von höher permeablen Wegsamkeiten in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge.

Über den Versuchsverlauf wurden die Druckreaktionen in den horizontalen Kammern an den Streckenstößen, oberhalb der Ringkammern, miterfasst. Die Druckganglinien für beide horizontalen Kammern zeigen keine oder nur eine sehr geringe Druckreaktion über den Testverlauf. Als Ursachen für eine geringe oder keine Druckreaktion in den horizontalen Kammern müssen betrachtet werden:

- keine Zuströmung von Gas in die Kammer,
- Zuströmung von Gas in die Kammern und sofortiger Abstrom ohne oder nur mit geringer Druckreaktion in den horizontalen Kammern.

Für den Test der Ringkammer RK02 ist davon auszugehen, dass es nicht zu einem Zustrom von Gas in die horizontalen Kammern gekommen ist. Der Druckanstieg in den Ringkammern RK01 und RK03 sowie die zugehörige Volumenbilanz des für den Test aufgebrauchten Gesamtgasvolumens schließen ein Überströmen von Gas in die horizontalen Kammern und ein schnelles Abströmen aus diesen Kammern aus. Diese Beobachtung und Beurteilung gilt für alle durchgeführten Bauwerkstests. Daher ist davon auszugehen, dass der Strömungsprozess unmittelbar nach der Erstellung des Halbdammes maßgeblich an die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge in der Sohle des Bauwerkes gebunden ist. Wegsamkeiten in den Streckenstößen können unter Berücksichtigung der Druckreaktionen in den horizontalen Kammern weitgehend ausgeschlossen werden - siehe Kapitel 8.5.1

Dieser Befund wird bestätigt durch das Ergebnis der laborativen Untersuchungen zur Permeabilität von Kernproben aus dem Sohlbereich des Bauwerkes. Für die 8 Kernproben aus der Kontaktzone Bauwerk/ Gebirge wurde ein Wertebereich der Permeabilitäten von  $5,0E-15 \text{ m}^2$  bis  $6,5E-12 \text{ m}^2$  (Kapitel 7.3.3.3 und Abbildung 104) ermittelt.

Für die modellgestützte Auswertung der Druckbeaufschlagung des Bauwerkes über die zentrale Ringkammer RK02 wurde das in Kapitel 8.6 beschriebene Modell aufgebaut und für die Auswertung genutzt. Über die Variation der Permeabilität, der Porosität und der Querschnittsfläche der Kontaktzone in der Sohle des Bauwerkes erfolgte eine Anpassung der simulierten Druckganglinien an die gemessenen Druckganglinien.

Für die Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer RK02 wurde die in Abbildung 110 dargestellte Anpassung der gemessenen und berechneten Druckganglinien über eine Permeabilität der Kontaktzone von  $9,7E-15 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK01 und RK02 sowie einer Permeabilität der Kontaktzone von  $4,5E-15 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK02 und der RK03 erreicht.

Auf der Grundlage der Geometrie des Bauwerkes - Tabelle 1 und Abbildung 3 im Kapitel 5.3, der Parameterbelegung für die Strömungsräume Gebirge/Auflockerungszone und massiver Baustoffkörper entsprechend Tabelle 20, wurde für das Bauwerk im Ergebnis der Parametervariation eine integrale Permeabilität von  $2,3E-16 \text{ m}^2$  abgeschätzt.

Der Stand der modellbasierten Nachrechnung (Parameteridentifikation) des Tests zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Druckganglinien. Es kann gezeigt werden, dass mit dem angewendeten Modellkonzept und dem erstellten Modell eine repräsentative Nachrechnung der strömungstechnischen Vorgänge im Verlauf einer Testung und die Identifikation der Permeabilität des Kontaktes Baustoff/ Gebirge möglich ist.

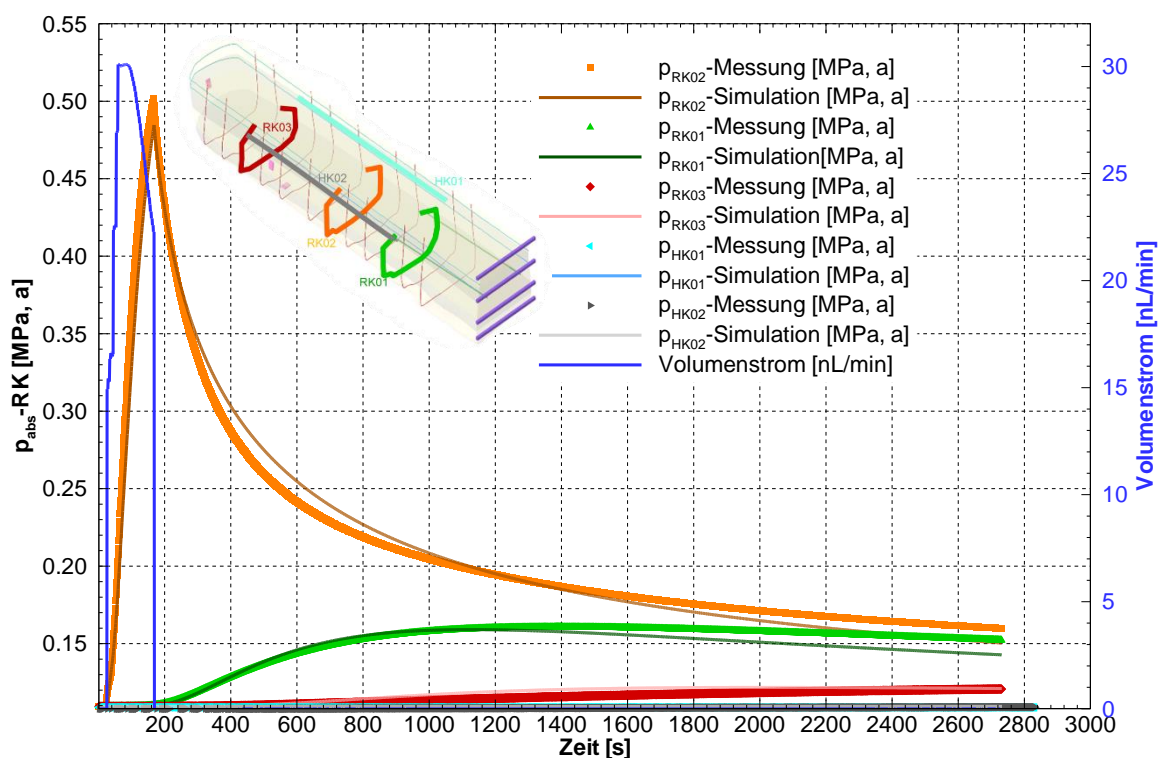


Abbildung 110: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK02, 13.06.2022

Die Umströmung des Bauwerkes über die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge entspricht grundsätzlich den Erfahrungen, die bereits für andere Dichtbauwerke aus kohäsiven Materialien gewonnen wurden – MgO-Dammbauwerke CARLA [5], Salzbetonbauwerk im Steinsalz [6], [7], MgO-Damm Bleicherode. Unerwartet ist der Strömungsprozess über die Sohle des Bauwerkes und die dort nachgewiesenen Wegsamkeiten. Die bisherigen Vorstellungen und das Verständnis zum Strömungsprozess im Kontakt Baustoff/ Gebirge eines Dichtsegmentes sind von einer Dominanz der Kontaktzone in der Firste und im oberen Bereich der Stöße ausgegangen.

Langfristig ist unter dem Einfluss der Konvergenz des Gebirges von einer Reduzierung dieser Wegsamkeiten und einer Reduzierung der integralen Permeabilität des Bauwerkes auszugehen.

Vorsorglich soll nochmals angemerkt werden, dass die hier gewonnenen quantitativen Ergebnisse zur Permeabilität im Kontakt Baustoff/ Gebirge für die spezifischen Bedingungen des Halbdammes gelten. Eine Übertragung auf die strömungstechnische Situation in anderen MgO-basierten Bauwerken ist nicht möglich.

#### **8.7.1.2 Ringkammer RK01**

Die Ringkammer RK01 wurde am 13. Juni 2022 mit einem maximalen Druck von ca. 0,4 MPa (Relativdruck) beaufschlagt. Die gemessenen Druckganglinien sind in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Abbildung 111 dargestellt.

Innerhalb von ca. 200 Sekunden nach dem Aufbringen des Druckimpulses beginnt der Druck in der zentralen Ringkammer RK02 anzusteigen. Mit deutlicher zeitlicher Verzögerung setzten eine geringe Druckreaktion und ein langsamer Anstieg des Druckes in der Ringkammer RK03 ein. In einem Zeithorizont von ca. 2800 Sekunden ist der Druck der beaufschlagten ersten Ringkammer RK01 auf einen Restdruck von ca. 0,04 MPa (Realtivdruck) abgefallen.

Der Druckverlauf und die Versuchsdauer des Tests über die Ringkammer RK01 sind vergleichbar den Ganglinien für den Test der zentralen Ringkammer RK02 – siehe Abbildung 110.

Für die Druckbeaufschlagung und Auswertung der Testung des Bauwerkes über die Ringkammer RK01 gelten die zur Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer RK02 im Kapitel 8.7.1.1 gegebenen Erläuterungen.

Für die modellgestützte Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien wurde das in Kapitel 8.6 beschriebene Auswertemodell genutzt. In Abbildung 111 sind die gemessenen und berechneten Ganglinien im Ergebnis der Anpassung in Abhängigkeit von der Messdauer dargestellt.

Für die Druckbeaufschlagung der Ringkammer RK01 wurde die in Abbildung 111 dargestellte Anpassung der gemessenen und berechneten Druckganglinien über eine Permeabilität der Kontaktzone von  $6,6E-15 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK01 und RK02 sowie einer Permeabilität der Kontaktzone von  $2,0E-15 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK02 und der RK03 erreicht.

Im Ergebnis der Auswertung der Druckbeaufschlagung der Ringkammer RK01 kann, im Vergleich zu den Permeabilitäten für den Test in der zentralen Ringkammer RK02, von einer etwas geringeren Permeabilität in der Kontaktzone der Sohle im Bereich der Ringkammer RK01 ausgegangen werden.

Auf der Grundlage der Geometrie des Bauwerkes - Tabelle 1 und Abbildung 3 im Kapitel 5.3, der initialen Parameterbelegung für die Strömungsräume Gebirge/Auflockerungszone und massiver Baustoffkörper entsprechend Tabelle 20, wurde im Ergebnis der Parametervariation für das Bauwerk eine integrale Permeabilität von  $1,1E-16 \text{ m}^2$  abgeschätzt.

Der Stand der modellbasierten Nachrechnung (Parameteridentifikation) des Tests zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Druckganglinien. Es kann gezeigt werden, dass mit dem angewendeten Modellkonzept und dem erstellten Modell eine repräsentative Nachrechnung der strömungstechnischen Vorgänge im Verlauf einer Testung und die Identifikation der Permeabilität des Kontaktes Baustoff/ Gebirge möglich ist.

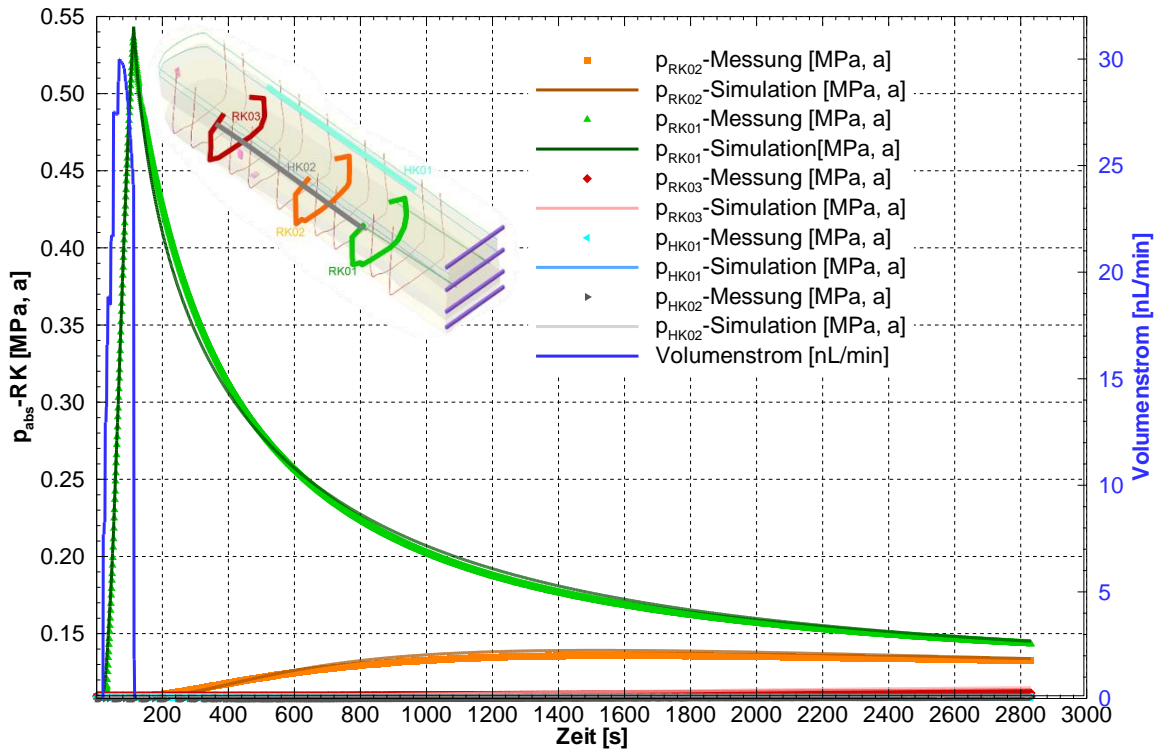


Abbildung 111: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK01, 13.06.2022

### 8.7.1.3 Ringkammer RK03

Die Ringkammer RK03 wurde am 27. Juni 2022 mit einem maximalen Druck von ca. 0,42 MPa (Relativdruck) beaufschlagt. Die gemessenen Druckganglinien sind in Abhängigkeit von der Versuchsdauer in Abbildung 112 dargestellt.

Wie für die Tests der anderen Ringkammern beginnt innerhalb von ca. 200 Sekunden nach dem Aufbringen des Druckimpulses der Druck in der zentralen Ringkammer RK02 anzusteigen. Mit deutlicher zeitlicher Verzögerung setzten eine geringe Druckreaktion und ein langsamer Anstieg des Druckes in der Ringkammer RK01 ein.

Der Druckverlauf des Tests über die Ringkammer RK03 ist vergleichbar den Ganglinien für die Tests der Ringkammern RK01 und RK02 – siehe Abbildung 110 und Abbildung 111. Aufgrund des größeren räumlichen Abstandes zwischen der zentralen Ringkammer RK02 und der Ringkammer RK03 kommt es zu einem langsameren Druckabfall. In einem Zeithorizont von ca. 5600 Sekunden (ungefähr doppelte Zeitdauer im Vergleich zur Testung der Ringkammern RK01 und RK02) ist der Druck der beaufschlagten Ringkammer RK03 auf einen Restdruck von ca. 0,06 MPa (Realtivdruck) abgefallen.

Für die Druckbeaufschlagung und Auswertung der Testung des Bauwerkes über die Ringkammer RK03 gelten die zur Druckbeaufschlagung der zentralen Ringkammer RK02 im Kapitel 8.7.1.1 gegebenen Erläuterungen.

Für die modellgestützte Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien wurde das in Kapitel 8.6 beschriebene Auswertemodell genutzt. In Abbildung 112 sind die gemessenen und berechneten Ganglinien im Ergebnis der Anpassung in Abhängigkeit von der Messdauer dargestellt.

Für die Druckbeaufschlagung der Ringkammer RK03 wurde die in Abbildung 112 dargestellte Anpassung der gemessenen und berechneten Druckganglinien über eine Permeabilität der

Kontaktzone von  $1,1E-14 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK01 und RK02 sowie einer Permeabilität der Kontaktzone von  $6,2E-15 \text{ m}^2$  zwischen den Ringkammern RK02 und der RK03 erreicht.

Im Ergebnis der Auswertung der Druckbeaufschlagung der Ringkammer RK02 kann, im Vergleich zu den Permeabilitäten für den Test in der zentralen Ringkammer RK02, von einer etwas höheren Permeabilität in der Kontaktzone der Sohle im Bereich der Ringkammer RK03 ausgegangen werden.

Auf der Grundlage der Geometrie des Bauwerkes - Tabelle 1 und Abbildung 3 im Kapitel 5.3, der initialen Parameterbelegung für die Strömungsräume Gebirge/Auflockerungszone und massiver Baustoffkörper entsprechend Tabelle 20, wurde im Ergebnis der Parametervariation für das Bauwerk eine integrale Permeabilität von  $3,0E-16 \text{ m}^2$  abgeschätzt.

Der Stand der modellbasierten Nachrechnung (Parameteridentifikation) des Tests zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung der berechneten und der gemessenen Druckganglinien. Es kann gezeigt werden, dass mit dem angewendeten Modellkonzept und dem erstellten Modell eine repräsentative Nachrechnung der strömungstechnischen Vorgänge im Verlauf einer Testung und die Identifikation der Permeabilität des Kontaktes Baustoff/ Gebirge möglich ist.

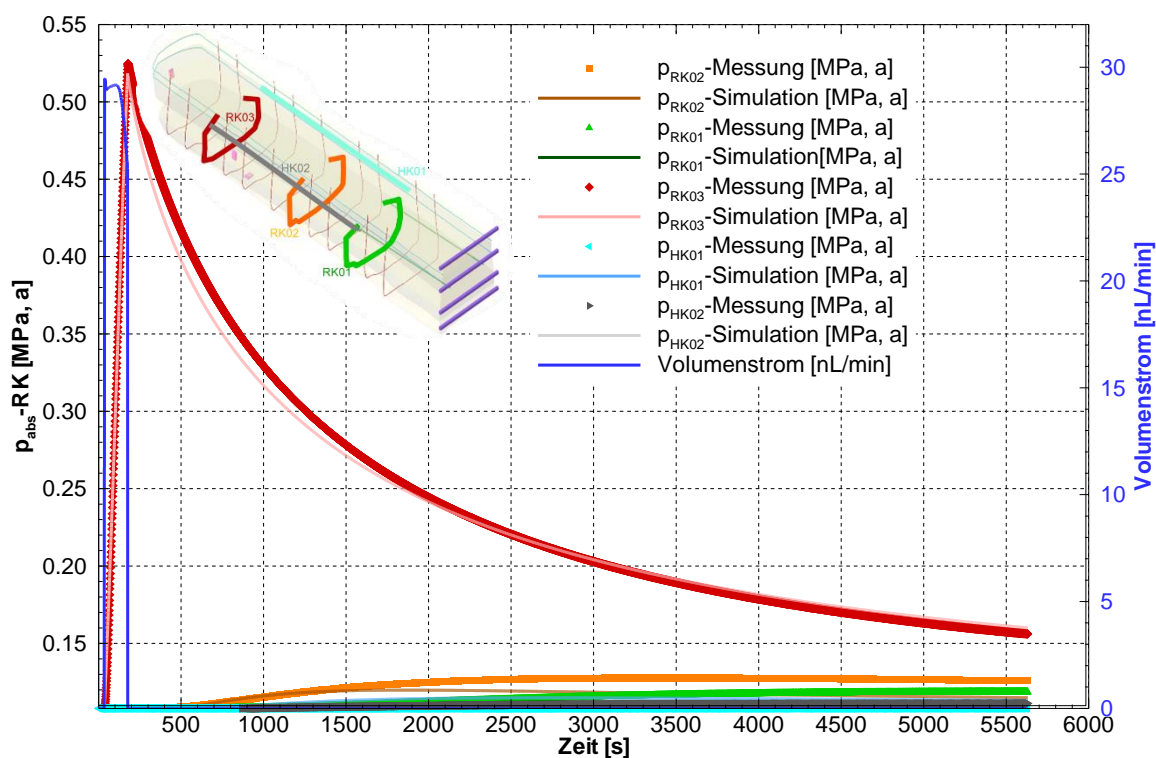


Abbildung 112: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK03, 27.06.2022

### 8.7.2 Einfluss der Injektionen

In der Anlage 12.8 sind ausgewählte Tests zur Untersuchung der strömungstechnischen Wirkung der durchgeführten Injektionen (siehe Kapitel 6.3) dargestellt.

Da die Injektionen nur im vorderen und im hinteren Bauwerksbereich durchgeführt wurden, beschränkten sich die Tests auf die Ringkammern RK01 und RK03.

Die Injektionen der ersten beiden Kampagnen am 17.03.2022 und am 22.03.2022 erfolgten an der hintersten 9. Injektionsleitung bzw. am 9. Injektionsring (siehe Kapitel 6.3). Durch die Lage im Bauwerk war zu erwarten, dass die Druckganglinien der naheliegenden 3. Ringkammer RK03 einen deutlichen Einfluss zeigen würden. Dies kann bei einem qualitativen Vergleich

der Druckganglinien in der Grafik Anlage 12.8.2 nicht bestätigt werden. Offensichtlich spielt der hintere Teil des Bauwerks keine Rolle für den Abstrom eines Druckimpulses aus der 3. Ringkammer RK03.

Auch die Injektion der oberen horizontalen Injektionsleitung (siehe 2. Kampagne am 22.03.2022, Kapitel 6.3) zeigte bei der Testung am 05.04.2022 keine quantifizierbare Wirkung für die Strömungsprozesse bei der Testung der Ringkammer RK03.

Die Injektionen der letzten beiden Kampagnen am 03.06.2022 und am 09.06.2022 mit der MFBBa-Suspension erfolgten für die 1., 3. und 4. Injektionsleitung. Wie im Kapitel 6.3 beschrieben, konnte kein Injektionserfolg erzielt werden. Lediglich in den 1. und dem 3. Injektionsring wurde jeweils etwas  $MgCl_2$ -Lösung eingepresst und die Leitungen lösungserfüllt belassen.

Wie in der Anlage 12.8.1 ersichtlich, kann für die Testungen am 18.05.2022 und die Testung am 13.06.2022 kein deutlicher Unterschied für den Druckverlauf des Tests der Ringkammer RK01 festgestellt werden, obwohl die Ringkammer RK01 zwischen der 1. und 3. Injektionsleitung liegt. In den Kontrollkammern des Tests - Ringkammern RK02 und RK03 - kommt es zu einem leicht verzögerten Druckanstieg, welcher aber im Maximum nahezu das gleiche Niveau erreicht. Dies kann als ein Hinweis auf eine geringere Permeabilität entlang des Strömungsweges zwischen der Ringkammer RK01 und Ringkammer RK02 gesehen werden, was auf die Wirkung der eingepressten Salzlösung zurückzuführen ist.

Zusammenfassend bestätigen die ausgewählten und diskutierten Tests die qualitative Einschätzung, dass kein maßgeblicher Injektionserfolg mit der angewendeten Injektionstechnik erreicht wurde. Als mögliche Ursachen für den scheinbar geringen Einfluss der Injektion auf die Druckreaktionen der nachfolgenden Bauwerkstests werden folgende Punkte gesehen und nachstehend diskutiert:

- unzureichende Ankopplung der Injektionsleitungen an die Kontaktzone Baustoff/ Gebirge für den Abstrom von Suspensionen  
Die Erfahrungen und Beobachtungen der Bauwerkstests haben gezeigt, dass alle Injektionsleitungen auf die Druckbeaufschlagung der Ringkammern reagieren. Dies lässt auf eine gute strömungstechnische Ankopplung an die vorliegenden Wegsamkeiten in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge schließen - siehe dazu Erläuterungen in Kapitel 8.5.2
- unzureichende Öffnung der Wegsamkeiten in den Injektionsleitungen für den Austritt der Suspension bei dem angewendeten Injektionsdruck  
Für die Injektionen wurden Drücke bis 7 MPa angewendet. Möglicherweise ist dieses Druckniveau unzureichend für die effektive Öffnung der Injektionsleitungen. Dies müsste in weiteren Injektionsversuchen unter Verwendung von geeigneten Injektionspumpen und die nachfolgende Bauwerkstestung untersucht werden.
- Blockierung der Injektionsschläuche durch Filtratbildung aus dem Feststoffgehalt der Suspensionen  
Die Injektion unter Verwendung der Suspension auf der Basis des Styromag-MgO, Partikelgröße mit  $d_{95} \approx 130 \mu m$ , im Bereich der Ringkammern RK03 hat einen Eintrag von ca. 1,8 l Suspension bei einem maximalen Injektionsdruck von 1,8 MPa nachgewiesen – siehe Kapitel 6.3.  
Die Injektion der MFBBa-Suspension, Partikelgröße  $d_{95} \approx 20 \mu m$ , konnte für den Injektionsdruck bis 7,0 MPa keinen Eintrag der Injektionssuspension nachweisen – siehe Kapitel 6.3.  
Die Erfahrungen aus den beiden Injektionen mit sehr unterschiedlichen Partikelgrößen geben keinen Hinweis auf eine Filterkuchenbildung, die den Injektionsprozess beeinflusst haben könnte.
- Einfluss der Porenraumsättigung und der daraus resultierenden effektiven Phasenpermeabilität auf die Injektion

Der zu injizierende Strömungsraum in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge ist initial als trocken zu beurteilen. Für diese Ausgangsbedingungen kann von einer maximalen effektiven Gaspermeabilität ausgegangen werden. Die Erfahrungen zu den Druckreaktionen in den Injektionsleitungen bestätigen dies - siehe Kapitel 8.5.2. Für die initialen Sättigungsbedingungen ist die effektive Permeabilität für Flüssigkeit/ Suspension als minimal anzusehen. Erst mit der fortschreitenden Aufsättigung und der Ausbildung einer kohärenten Flüssigkeitsphase im Porenraum kommt es zu einer Erhöhung der effektiven Phasenpermeabilität für die Strömung der Flüssigkeit/ Suspension. Möglicherweise ist die vorlaufende Anströmung der Injektionsleitungen mit Salzlösung, hinsichtlich Salzlösungsvolumen und zeitlichem Vorlauf, unzureichend für eine ausreichende Benetzung des zu injizierenden Porenraumes. Eine erfolgreiche Injektion würde eine Aufsättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit voraussetzen. Für das spezifische Verhalten des MgO-Baustoffes wurde dies zurückgestellt. Eine Anströmung des Injektionsraumes mit Salzlösung würde mit großer Wahrscheinlichkeit sekundäre Reaktionsprozesse des Baustoffes mit Einfluss auf die Permeabilität hervorrufen, die die Injektionswirkung überlagern. Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurde ein solcher Prozess gezielt vermieden. Zur Klärung des Einflusses der Flüssigkeit auf die Sekundärreaktionen des Bauwerkes und die gegebenenfalls erforderliche Injektion der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge bedarf es weiterer Untersuchungen.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Projektes STROEFUN III war die Entwicklung eines Konzeptes für die gegenständliche großtechnische Testung der strömungstechnischen Wirkung von installierten, sicherheitsrelevanten Streckenverschlussbauwerken. Das Ergebnis der Testung ermöglicht die Beurteilung der strömungstechnischen Funktionsfähigkeit des Bauwerkes.

Das für das Testkonzept entwickelte Messsystem wurde in einem als Halbdamm konzipierten Streckenverschlussbauwerk mit einem Dichtsegment aus MgO-Beton im Steinsalz-Abbaufeld der Grube Teutschenthal installiert und erfolgreich angewendet.

Das Testkonzept basiert auf folgenden Schwerpunkten:

- Installation von drei Ringkammern im Bauwerksverlauf mit standortbezogen wählbaren Abständen zwischen den Kammern  
Die Ringkammern ermöglichen die Druckbeaufschlagung bzw. Erfassung der Druckreaktion im Verlauf der strömungstechnischen Testung des Bauwerkes bzw. von Abschnitten des Bauwerkes.  
Das Funktionsprinzip der Ringkammern ermöglicht ein operatives Verschließen der Ringkammern bei Injektionsmaßnahmen und ein erneutes Öffnen für die erneute Testung.
- Variable, strömungstechnische Testung des Bauwerkes über jede Ringkammer mit Gas- oder Flüssigkeitsdruck im stationären oder instationären Druckregime
- Anschluss der Ringkammern über im Bauwerk vorinstallierte Druckleitungen zur Druckbeaufschlagung und Steuerung
- Rückbau der Druckleitungen zur Steuerung der Ringkammern und qualitätsgerechte Verfüllung der verbleibenden Bohrlöcher nach Abschluss der Testung (Technischer Anhang)
- Modellgestützte Auswertung der im Ergebnis der Bauwerkstestung gewonnenen Daten und ergänzenden Informationen zur in situ-Permeabilität einzelner Strömungsräume und
- Bestimmung der integralen Permeabilität des Bauwerkes aus den geometrischen Daten der einzelnen Strömungsräume und der für sie identifizierten Permeabilitätswerte

Das Konzept konzentriert sich auf die Testung der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge als bestimmenden Strömungsraum für die Dichtwirkung von Streckenverschlussbauwerken aus hydraulisch abbindenden Dichtmaterialien.

Das entwickelte und erfolgreich angewendete Testkonzept ermöglicht die individuelle strömungstechnische Testung von in situ errichteten Bauwerken bzw. Bauwerksabschnitten. Die daraus mögliche Beurteilung der strömungstechnischen Wirkung ist ein wesentlicher Baustein für die gegenständliche Bewertung der Funktionsfähigkeit eines Streckenverschlussbauwerkes im Rahmen der Nachweisführung. Die im Ergebnis der Testung verbleibenden Installationen sind so angeordnet, dass sie keinen Einfluss auf die weitere Funktion des Bauwerkes nehmen.

Darüber hinaus wurden im Verlauf des Forschungsvorhabens umfangreiche Kenntnisse zu folgenden Aspekten gewonnen:

- Konzipierung, Planung und Realisierung des Einbaus eines Streckenverschlussbauwerkes mit einer Länge von 15 m und einem Volumen von ca. 102 m<sup>3</sup>,
- Qualitätsüberwachung der Komponenten für den MgO-Baustoff mit dem besonderen Schwerpunkt: Prüfung und Durchsetzung der Anforderungen an marktverfügbaren MgO,
- Anpassung der Baustoffrezeptur an die am Markt verfügbaren Baustoffkomponenten und an die verfügbare Misch- und Fördertechnik, was zu einer Modifikation der A1 Basisrezeptur führte
- betontechnologischen Vorgehensweise bei der Betonage des Bauwerkes,

- begleitende Qualitätsüberwachung bei der Herstellung des Bauwerkes,
- Durchführung und Auswertung von ergänzenden Tests am Bauwerk zur Ermittlung der bestimmenden Einflussprozesse für die strömungstechnische Wirkung,
- Planung und bereichsweise Umsetzung eines Injektionskonzeptes für den Halbdamm  
Auswahl, Parametrisierung, Anwendung von 2 partikelgestützten Injektionsmörteln (Suspension auf der Basis von Styromag-MgO und MFBBa) und eines Epoxidharzes (EpoJet LV) für die nachträgliche Vergütung der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge in Kombination mit der strömungstechnischen Testung des Bauwerkes (s. a. Technischer Anhang),
- Charakterisierung der Porosität und Porengrößenverteilung in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge und der Partikelgrößenverteilung in den Injektionsmitteln zur Ableitung eines begründeten Injektionsregimes (s. a. Technischer Anhang),
- Vertiefte Charakterisierung des Porenraums der beteiligten Strömungsräume und Ableitung der Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen (Technischer Anhang).

Weiterhin erfolgten ergänzende mechanische und hydraulische Untersuchungen an im Labor hergestellten und am Halbdamm gewonnenen Probekörpern aus Kompositbaustoff (siehe Technischer Anhang und Dissertation Julius Bauermeister "Untersuchung der Scherfestigkeit an Kompositproben aus Sorelbeton und Steinsalz"). Numerische Simulationen zur Temperaturentwicklung im Baukörper aus MgO-Beton und am Standort infolge der Abbindewärme des Baustoffs lieferten wichtige Hinweise zum Entstehen von Betonierfugen (Technischer Anhang).

Im Ergebnis des Forschungsvorhabens liegen für den Standort des errichteten Halbdammes umfangreiche Kenntnisse zur Geologie, zur Parametrisierung des Bauwerkes und des umgebenden Gebirges sowie zu den thermodynamischen Bedingungen vor.

Der im Rahmen des Vorhabens erstellte Halbdamm erlaubt aufgrund seiner Zugänglichkeit und der Standortbedingungen eine Vielzahl an Untersuchungen, die an anderen Dämmen, die aus A1 bestehen, nicht ohne erheblichen Mehraufwand durchgeführt werden können oder aus genehmigungsrechtlichen Gründen gar nicht möglich sind.

Aus dem Forschungsvorhaben und den anstehenden Fragestellungen für Praxisbauwerke ergeben sich folgende Schwerpunkte für weiterführende Untersuchungen an dem Dammbauwerk:

- Fortsetzung der zeitabhängigen strömungstechnischen Testung des Bauwerkes zur Erfassung der strömungstechnischen Dichtwirkung des Bauwerkes unter dem Einfluss der am Standort wirksamen Konvergenz<sup>10</sup> des Steinsalzgebirges
- Klärung der Ursachen für die Entstehung von vernetzten Wegsamkeiten in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge in der Sohle des Bauwerkes und Ableitung von Handlungsoptionen zur Vermeidung der Entstehung solcher Wegsamkeiten
- Erkundung der Parameterverteilung - u.a. Permeabilität, Porosität, Porenraumsättigung, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit, mineralogische Zusammensetzung - und der zeitabhängigen Veränderung im Bauwerk als Grundlage der Bauwerksbeschreibung
- Prozessanalyse zum Transport von Feuchtigkeit im Bauwerkskörper zur Beurteilung der zeitabhängig zu erwartenden Wechselwirkungen mit der Grubenatmosphäre und den Auswirkungen auf das geochemisch/mineralogische Langzeitverhalten des MgO-Baustoffes,

---

<sup>10</sup> Für diesen Zweck wurden Konvergenzstellen nachinstalliert.

- Fortsetzung der Injektionstests zur nachträglichen Vergütung/Abdichtung der nachgewiesenen Wegsamkeiten in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge
- Druckbeaufschlagung und strömungstechnische Testung des Bauwerkes mit Salzlösung zur Erfassung des Bauwerksverhaltens unter dem Einfluss der Wechselwirkungen zwischen MgO-Baustoff und Salzlösung.

In jedem Fall ist davon auszugehen, dass langfristig der Abbindeprozess des Baustoffes und die Wechselwirkungen mit der Grubenatmosphäre sowie die daraus resultierenden Kristallisationsprozesse das Volumen des Baustoffkörpers und die Permeabilität beeinflussen. Dies betrifft sowohl den Porenraum und die daran gebundene Permeabilität im Baustoff, in der Kontaktzone Baustoff/ Gebirge und die Ringkammern im Bauwerk.

Die Testung mit Salzlösung setzt einen fortschreitenden Aufsättigungsprozess des getesteten Strömungsraumes mit Salzlösung voraus. Gleichzeitig ist von sehr langsamen, stark zeitabhängigen Wechselwirkungen zwischen der Testlösung und dem MgO-Baustoff auszugehen, die eine Beeinflussung der Druckganglinien der Tests erwarten lassen. Die Möglichkeit der Testung des Bauwerkes mit Salzlösung sollte unbedingt genutzt werden. Sowohl aus strömungstechnischer, geotechnischer und prozesstheoretischer Sicht bestehen die Chance und die Gelegenheit für einen wichtigen Erkenntnisgewinn für die Beurteilung von Praxisbauwerken. Die vorhandene Testinstallation ermöglicht die Durchführung dieser Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt. Die dabei zukünftig gewinnbaren Kenntnisse zur Injektion, zum Einfluss der Injektion auf die Permeabilität im Kontakt Baustoff/ Gebirge und zum Einfluss von Salzlösung auf die strömungstechnische Wirkung des Bauwerkes sind, aus Sicht der Bearbeiter, von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis der Strömungsprozesse und die Beeinflussung der Strömungsprozesse in MgO-basierten Verschlussbauwerken.

Als ein weiterer Aspekt, der vertiefter Untersuchung bedarf, erwies sich die Übertragbarkeit von an Laborversuchen der MgO-Baustoffsuspension gewonnenen Ergebnissen auf verfügbare, baustellentaugliche, ggf. großtechnische Misch-, Pump- und Fördertechnik. Insbesondere ist die Frage zu beantworten, welche Qualitätssicherungsparameter eines MgO-Baustoffs maßgeblich sind, den Erfolg einer solchen Übertragung zu bewerten bzw. zu gewährleisten, dass die Laborversuche für die Suspensions- und die Festkörpereigenschaften des MgO-Baustoffs auf der Baustelle repräsentativ sind.

## 10 Verzeichnisse

### 10.1 Quellen/Literatur

- [1] Weber, J.; Wilsnack, Th.; Langefeld, O.; Bollingerfehr, W.; Grafe, F.; Hesse, A.; Lack, D.; Müller-Hoeppe, N. (2016): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke im Steinsalz und deren flüssigkeitsgestützte Abdichtung. Phase I (Konzeption von Funktionsnachweis und Abdichtungsmethoden, Testung und Auswahl von Behandlungsfluiden (FKZ 02E11253).
- [2] BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder, radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010
- [3] BMUV (2020): Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndLSiAnfV), Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I Seite 2094)
- [4] Heydorn, M.; Teichmann, L.; Meyer, T.: Schachanlage ASSE II – Anwendungsversuch Pilotströmungsbarriere PSB A1, Bergbau 4, 2016, 165-171
- [5] 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.
- [6] Mauke, R.; Stahlmann, J.; Mohlfeld, M. (2012): In situ-Verification of a Drift Seal System in Rock Salt - Operating Experience and Preliminary Results. 7th Conference on the Mechanical Behavior of Salt – SaltMech7. Paris, France.
- [7] IBeWa (2014): ERAM, in situ-Versuch „Abdichtbauwerk im Steinsalz“ – Planung und Durchführung von Messungen zur Bestimmung von Permeabilitäten – In situ-Permeabilitätsmessung in einer alten Strecke (nach dem Nachschnitt). Endbericht (DBE: 9M/23241023/05AHB03/GH/BZ/0115/00).
- [8] Wenkel, S; Bauermeister, J; Langefeld, O (2018): Strömungstechnischer Funktionsnachweis für Verschlussbauwerke und flüssigkeitsgestützte Abdichtung des Kontaktbereiches. Phase II: Vertiefung Kenntnisstand Kontaktbereich & Injektionsmittel. Förderkennzeichen: 02E11597. Clausthal- Zellerfeld.
- [9] Freyer, D.: Sorel cement as a geotechnical barrier in salt formations, 2nd International workshop on Actinide brine chemistry in a salt based repository, 7<sup>th</sup>- 8<sup>th</sup> November 2011
- [10] Müller-Hoeppe, N. ; Buhmann, D.; Czaikowski, O.; Engelhardt, H.J.; Herbert, H.-J.; Lerch, C.; Linkamp, M.; Wieczorek, K.; Xie, M. (2012): Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbeurteilung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2
- [11] Xie, M.; Herbert, H.-J. (2012): Geochemical Analysis of the Sealing System, Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Braunschweig
- [12] Vogler, N.; Gluth, G.; Oppat, K.; Kühne, H.-C. (2017): Charakterisierung von Bauteiloberflächen – Rautiefenbestimmung mittels konventioneller und laserbasierter Verfahren, Bauingenieur 92.
- [13] salzwiki (2023): <https://www.salzwiki.de/index.php/Deliqueszenzfeuchte>, abgerufen am 30.01.2023, letzte Aktualisierung: 02.07.2012
- [14] Müller-Hoeppe, N.; Engelhardt, H.-J. (2019): Tischvorlage. STROEFUN. BGE TECHNOLOGY, Peine.
- [15] TU-BA-Freiberg (2017): Stellungnahme zum möglichen Einfluss von Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung eines Ausgangsstoffes bei der Herstellung auf die Baustoffeigenschaften von Sorelbeton A1. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie.
- [16] Engelhardt, H.- J. (2009): Sorelbeton A1. Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften. Hg. v. DBE Tec.
- [17] DBE-TECHNOLOGY GmbH (2010): Sorelbeton A1 – Rezepturzusammensetzung und Materialeigenschaften (Arbeitsbericht), Peine, Dok.-ID. 11504376, ULV-Nr.: 480097.
- [18] GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG, (2005): Grube Teutschenthal – 100 Jahre Kali- und Versatzbergbau
- [19] Penndorf, H. (2019): Streckenübersicht im Staßfurth Steinsalz in Teutschenthal. Glückauf- Vermessung.

- [20] Luckner, L.; Schestakow, W.M. (1986): Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich. Leipzig: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie.
- [21] 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.
- [22] Förster, S. (1970): Dichtheitsprüfung des Jüngeren Steinsalzes im Schacht Burggraf. Bergakademie Freiberg, Sektion Geotechnik und Bergbau, Lehrstuhl für Tiefbohrtechnik und Erdölgewinnung.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Weber, J.R.; Wallner, m. (1998): Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- [27] Sachs, L. (1973): Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Aufl., ISBN 0-387-6443-5.
- [28] Philipp, N. (2006): Einführung in die Probleme des Physikalischen Praktikums. Fachhochschule Lausitz Senftenberg, Einführungsheft, 6. Auflage.
- [29] TU-BA-Freiberg (2020): Abschlussbericht zum Vorhaben MgO-SEAL: „MgO-Spritzbeton: Verhalten bei Angriff von MgCl<sub>2</sub>-Lösung“ vom 29.02.2020, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau.
- [30] DIN 66133 (1993): "Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion", Juni 1993
- [31] Herold G. (1999): Korrosion zementgebundener Werkstoffe in mineralsauren Wässern, Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe Heft 36, Universität Karlsruhe, Dissertation.
- [32] Klopfer, H. (1974): Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen Wiesbaden.
- [33] Liesgang D. (1991): Zur Korrosionssicherheit des einbetonierten Bewehrungsstahls in Abhängigkeit von der Permeabilität des Betons; Dissertation.
- [34] Sosoro m. (1995): Modell zur Vorhersage des Eindringverhaltens von organischen Flüssigkeiten in Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag GmbH, 3-410-65.
- [35] Eberhardt W. (1995): Zusammenhänge zwischen Struktur und Dichtheit von Beton, Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Dissertation.
- [36] Arifin, Y. F. (2008): Thermo-Hydro-Mechanical Behavior of Compacted Bentonite-Sand Mixtures: An Experimental Study. Dissertation. Bauhaus-University Weimar.
- [37] MAPEI Austria GmbH (2011): Datenblatt Epojet LV. Technische Daten. Hg. v. MAPEI.
- [38] 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.
- [39] Stormont, J.C. (1997a): Conduct and interpretation of gas permeability measurements in rock salt. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34, No 3-4, paper No. 303.
- [40] Würth (2023): Außenputzgewebe. Hg. v. Adolf Würth GmbH & Co. KG. Künzelsau. Online verfügbar unter <https://eshop.wuerth.de/Aussenputzgewebe-GWB-AUSSENPUTZ-145G-10X10-BLAU-100M/0519530020.sku/de/DE/EUR/>, zuletzt aktualisiert am 24.12.2022, abgerufen am 26.01.2023

## 10.2 Abkürzungen

ALZ	Auflockerungszone
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
CP	constant pressure test
CR	constant rate test
CT	Computertomografie
DDK-VFP	4fach-Doppeldruckkolbenpacker
DK	Druckkammer
DK-OFP	Druckkolben-Oberflächenpacker
DK-ZFP	2fach-Druckkolbenpacker
ES-KP	Edelstahl-Kombipacker
HKxx	Horizontalkammer (xx = Zählvariable)
IL	Intervalllänge
IR	Injektionsring
IS	Injektionsschlauch
IT	Impulstest
KAB	Konturabstand
KG	Kanalgrund- (Kanalgrundrohr – KG-Rohr)
KK	Kontrollkammer
KLS	kabelloser Sensor
KP	Kombinationspacker
KR	Kontrollraum
m. KB	mit Kontaktzone Baustoff/ Gebirge
m.	mit
MFBBa	Kurzbezeichnung für Injektionsbaustoff MFBBa-17/3/30 auf MgO-Basis
MgO	Magnesiumoxid
MIP	Mercury intrusion porosimetry
MP	Mittelpunkt
NE	Nordosten
NW	Nordwesten
o. KB	ohne Kontaktzone Baustoff/ Gebirge
OFP	Oberflächenpacker
OK	Oberkante
PR	Prüfraum
RKxx	Ringkammer (xx = Zählvariable)
SE	Südosten
STABW	Standardabweichung
SW	Südwesten
TAZ	Trichterauslaufzeit
TU-C	TU-Clausthal
Tx	Test x (x = Zählvariable)
UK	Unterkante

### 10.3 Formelzeichen, Variablen und Indizes

$\gamma$	Grenzflächenspannung ( $\gamma_{\text{Hg-Luft}}(25\text{ °C})= 480\text{ mN/m}$ )	[N/m]
$C_C$	Gesamtkonzentration gelöste Komponenten	[g/L]
$d$	Probendurchmesser	[mm]
$k_{\text{Ph, abs}}$	absolute Permeabilität der Fluidphase	[m <sup>2</sup> ]
$k_{\text{Ph, eff}}$	effektive Permeabilität der Fluidphase	[m <sup>2</sup> ]
$k_{\text{Ph, rel}}$	relative Permeabilität der Fluidphase	[-]
$l$	Probenlänge	[mm]
$m_{\text{F, korr}}$	Masse Feststoff, trocken, korrigiert	[g]
$m_{\text{F, f}}$	Masse Feststoff, feucht	[g]
$m_{\text{F, tr}}$	Masse Feststoff, trocken	[g]
$m_L$	Masse Lösung	[g]
$m_W$	Masse Wasser	[g]
$N$	Anzahl Messpunkte	[-]
$n_t$	totale Porosität	[-]
$p_a$	Aufreißdruck	[Pa]
$p_A$	Ausgangsdruck	[Pa]
$p_{\text{cap}}$	Kapillardruck	[Pa]
$p_E$	Eingangsdruck	[Pa]
$p_F$	Fluiddruck	[Pa]
$p_{i, B}$	Druck berechnet	[Pa]
$p_{i, M}$	Druck gemessen	[Pa]
$p_M$	Manteldruck	[Pa]
$p_r$	Ruhedruck	[Pa]
$r$	Porenradius	[m]
$S$	Sättigung des Porenraumes	[-]
$S_G$	Gassättigung	[-]
$S_{G, R}$	Restgassättigung	[-]
$S_L$	Lösungssättigung	[-]
$S_{L, R}$	Restlösungssättigung	[-]
$w_L$	Lösungsgehalt	[-]
$X$	Wertebereich $S_{\text{Ph}}$ ( $0 \leq X \leq 1$ )	[-]
$y$	$f(x_1 \dots x_k)$	[-]
$\delta$	Kontaktwinkel ( $\delta_{\text{Hg-Luft}}(25\text{ °C})= 140^\circ$ )	[°]
$\eta$	dynamische Viskosität	[Pas]
$\rho$	Dichte des Sorelbetons	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_d$	Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	Dichte Lösung	[g/L]
$\rho_s$	Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_{\text{az}}$	Aufreißfestigkeit	[MPa]
$\varepsilon$	Fehler der x-Werte	[-]

## 10.4 Abbildungen

Abbildung 1: Schematische Darstellung Vertikalschnitt durch Dichtsegment mit Details zur Kontaktzone Baustoff/ Gebirge [1].....	10
Abbildung 2: Konzeptionelles Ringkammerdesign [1] .....	13
Abbildung 3: Positionierung des Halbdamms in der Versuchsstrecke (links) / Blick in Richtung Ortsbrust überlagert mit Dreiecksvermaschung (rechts).....	16
Abbildung 4: Seitenansicht des Hohlraumes.....	17
Abbildung 5: Links: Ermittlung der Rauheit am Stoß, rechts: Detailbild .....	18
Abbildung 6: Links: Filterung des gemessenen Profils Nr. 2, rechts: Auswertung mit den bestimmten Rauheitsparametern .....	19
Abbildung 7: Draufsicht auf Bereich 1 .....	20
Abbildung 8: Draufsicht auf Bereich 2.....	20
Abbildung 9: Draufsicht auf Bereich 3.....	20
Abbildung 10: Schräge Sicht auf Bereich 1 .....	20
Abbildung 11: Schräge Sicht auf Bereich 2.....	20
Abbildung 12: Schräge Sicht auf Bereich 3.....	20
Abbildung 13: Messprofile parallel und senkrecht zur Streckenverlauf.....	21
Abbildung 14: Position der Bohrungen (Nr. 9 verdeckt) und der OFP-Messstellen (siehe Nr. 6 und 4 (nur stoßnah)) am NW-Stoß im 3D-Modell des Hohlraums mit Legende .....	22
Abbildung 15: Position der OFP-Messungen am NW-Stoß (siehe OFP01-155, OFP02-175, B03-165) .....	24
Abbildung 16: Mittels Schleifrahmen geschliffene Oberfläche.....	25
Abbildung 17: Positionierung des OFP auf der geschliffenen Oberfläche am Stoß.....	26
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Oberflächenpackermessungen in unterschiedlichen Schleiftiefen (das Offset von 14,5 mm ist in der Darstellung nicht berücksichtigt). .....	26
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Kombi-Packers in unterschiedlichen Schleiftiefen	27
Abbildung 20: Effektive Gaspermeabilität der OFP-Untersuchungen in Abhängigkeit von der Einbauteufe.....	29
Abbildung 21: Effektive Gaspermeabilität in den Bohrungen B02-060 und B09-40 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt) .....	31
Abbildung 22: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B03-165 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt) .	31

Abbildung 23: Effektive Permeabilität für Gas, ermittelt an Kernproben aus den Bohrungen in das Steinsalz mit Angabe der Einspannung während der Versuchsdauer.....	34
Abbildung 24: An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200 µm .....	35
Abbildung 25: Montagebühne .....	38
Abbildung 26: Schalungsträger.....	39
Abbildung 27: Holzschalung mit Mannloch .....	39
Abbildung 28: Plattendruckaufnehmer (rechts) mit kabelloser Datenübertragungseinheit (KLS), die Lage des Temperatursensors ist rot markiert .....	39
Abbildung 29: Empfangsstationen KLS (rechts am Stoß montiert).....	40
Abbildung 30: KLS-Einbaubereich nach dem Schleifen .....	41
Abbildung 31: KLS-Druckaufnehmer vor dem Einbau der Vergussschalung.....	41
Abbildung 32: Freigelegter Druckaufnehmer nach Verguss und Bearbeitung .....	41
Abbildung 33: Hinterfülltes Druckkissen.....	41
Abbildung 34: KLS-01 auf der Sohle und KLS-02 am SE-Stoß zwischen den vertikalen Injektionsringen.....	42
Abbildung 35: 6° Neigung des KLS-02 am SE-Stoß .....	42
Abbildung 36: 19° Neigung des KLS-03 am hinteren Stoß.....	42
Abbildung 37: Befestigung der Injektionsleitungen am NW-Stoß .....	43
Abbildung 38: Horizontale Injektionsleitungen .....	43
Abbildung 39: Anschluss der horizontalen Injektionsleitungen an der Schalttafel .....	43
Abbildung 40: Vertikale und horizontale Injektionsleitungen .....	44
Abbildung 41: Anschluss der vertikalen Injektionsleitungen .....	44
Abbildung 42: Horizontale Ringkammer HK01 zwischen den horizontalen Injektionsleitungen .....	45
Abbildung 43: Kontakt der Ringkammer an der geglätteten Kontur.....	46
Abbildung 44: Befestigung des Anschlussstückes am gespannten Draht .....	46
Abbildung 45: Fertig montierte vertikale Ringkammer RK03 (noch ohne Anschlussrohre)....	47
Abbildung 46: Befestigung der Kunststoffrohre im Bauwerksbereich .....	48
Abbildung 47: Rohranschlüsse an der Schalung.....	48
Abbildung 48: Rohrfixierung am Spanndraht (Rohr noch ungeschliffen) .....	48
Abbildung 49: Rohranschlüsse an den Ringkammern .....	48
Abbildung 50: Dichtheitstest Anschlussrohre RK01 .....	49
Abbildung 51: Dichtheitstest Anschlussrohre RK02 .....	49
Abbildung 52: Dichtheitstest Anschlussrohre RK03 .....	50

Abbildung 53: Lage der Sensoren im Messquerschnitt .....	51
Abbildung 54: Lage der Temperatursensoren T01 und T02 auf der Sohle .....	51
Abbildung 55: Einbau des Temperatursensors T01 .....	52
Abbildung 56: Befestigung der Temperatursensoren auf der Sohle .....	52
Abbildung 57: Positionen der Temperatursensoren in der Mitte des Baustoffs (perspektivisch verzerrte Darstellung).....	52
Abbildung 58: Lage des Temperatursensor T06 im rechten Stoß (RK02 im Hintergrund) .....	53
Abbildung 59: Eingebaute Armierungsmatten nahe der geplanten Halbdamtoberfläche (links) und an der Schalung (rechts) .....	54
Abbildung 60: Übersicht über die eingesetzte Mischtechnik .....	56
Abbildung 61: Befüllung des Zwangsmischers Filamos m 750 H mit Steinsalz .....	56
Abbildung 62: Auslaufen des Materials vom Zwangsmischer in die Betonpumpe S5 EV/CM .....	56
Abbildung 63: Beprobung einer Bandanlage am 21.01.2020 .....	58
Abbildung 64: Bigbagbeprobung am 05.11.2020 .....	59
Abbildung 65: Beispielbilder quasiadiabatisches Kalorimeter.....	61
Abbildung 66: Temperaturverläufe der baubegleitenden Temperaturmessungen im quasiadiabatischen Kalorimeter .....	61
Abbildung 67: Schematische Darstellung der Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen .....	62
Abbildung 68: Übersicht über die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit.....	63
Abbildung 69: Rissbildung an der Oberfläche zu Beginn der Spätschicht am 27.07.2021 16:36 Uhr.....	64
Abbildung 70: Schaumansammlung an dem tiefsten Punkt des Betonagelevels .....	64
Abbildung 71: Ein Schaumagglomerat.....	64
Abbildung 72: Stand der Betonage am Ende der Spätschicht am 27.07.2021 22:53 Uhr.....	65
Abbildung 73: I-Träger der Schalung .....	66
Abbildung 74: Mittige Durchbiegung des 3. I-Trägers .....	66
Abbildung 75: Risse im Mörtel an der Verlagerung eines I-Trägers am Stoß .....	66
Abbildung 76: Oberflächenrisse an der Schalung .....	67
Abbildung 77: Keine weiteren Oberflächenrisse entlang des Dammbauwerkes.....	67
Abbildung 78: Schichtübergänge an der Stirnfläche des Bauwerks .....	68
Abbildung 79: Temperaturverläufe der Temperaturmessungen welche im Zusammenhang mit dem STROEFUN III-Projekt in-situ und im Labor durchgeführt wurden.....	69
Abbildung 80: Lage der Erkundungsbohrung B14-164 (links) und Kernmaterial aus dem Bereich der Betonierfugen (rechts).....	70
Abbildung 81: Verlauf des 9. vertikalen Injektionsrings .....	71
Abbildung 82: a) Damm mit den Bohrlöchern für die Geoelektrik, unten links, und Bohrlochradar, unten rechts. Beide Bohrlöcher wurden im Salzgestein unterhalb	

des Dammbauwerks abgeteuft, b) Schutzkiste des Datenrekorders der Mikroseismik imc Cronos Flex mit Kabelanschlüssen zu den Schwingungsmessern, c) auf dem Damm verschraubter Beschleunigungsaufnehmer Hersteller PCB, Modell 356B18, d) Bohrlochradarantenne Fa. Geoscanners, Modell BA1000 mit 1000 MHz mit Kabel, e) Geoelektrik Steuereinheit Fa. ABEM Terrameter LS, f) Messrad für die Bohrlochradarmessung.....	76
Abbildung 83: Lageskizze der Mikroseismik-Sensoren, links die Ortsbrust, rechts die Schalung	77
Abbildung 84: Seismogramm eines Bruchvorgangs.....	78
Abbildung 85: Zwei Zeiträume mit Arbeiten am Damm .....	78
Abbildung 86: Ortungsergebnisse Seismik im Koordinatensystem der Glückauf Vermessung .....	79
Abbildung 87: Aufgezeichnete Daten der kabellosen Plattendrucksensoren (inkl. der Temperaturdaten in den Sendergehäusen).....	82
Abbildung 88: Zeitlicher Verlauf der Temperaturentwicklung im Baukörper (T03 bis T05), an der Kontur (T02), im angrenzenden Salinar (T01 und T06) sowie im Salinar der Firste (T06) und in der Luft nahe der Bauwerksoberfläche (T07) .....	85
Abbildung 89: Gegenüberstellung der Messungen und der Prognoseberechnungen an den Temperatursensoren T03, T04 und T05 simuliert mit dem Parametersatz des Sorelbeton der A1-Basisrezeptur [17] .....	86
Abbildung 90: Gemessener und berechneter Verlauf der adiabatischen Temperaturentwicklung in Abhängigkeit der Zeit (links A1-Basisrezeptur, rechts Anpassung an die modifizierte A1-Rezeptur). Die farbig hinterlegten Flächen charakterisieren den vergleichbaren Erhärtungszustand der modifizierten A1-Rezeptur (blau) und der A1-Basisrezeptur (orange).....	86
Abbildung 91: Lage der Bohrungen B14-164 und B15-164 mit Angabe der Testintervalle ....	90
Abbildung 92: Effektive Gaspermeabilität der OFP-Untersuchungen aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe .....	93
Abbildung 93: Effektive Gaspermeabilität in den Bohrungen B02-060 und B09-040 aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt).....	95
Abbildung 94: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B03-165 aus den Jahren 2020 und 2022 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls (das durch den Anschliff verursachte Offset von 14,5 mm ist berücksichtigt).....	95
Abbildung 95: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B14-164 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls	97
Abbildung 96: Effektive Gaspermeabilität in der Bohrung B15-164 in Abhängigkeit von der Einbauteufe – horizontale Balken entsprechen der Länge des Prüfraumintervalls	97

Abbildung 97: Lösungsgehalte nach 45°C Ofentrocknung in Abhängigkeit von Entnahmeteufe für Prüfkörper aus der Bohrung B14-164 unter Berücksichtigung der Position der Übergänge der Betonierlagen (Ü. BL) in rot .....	99
Abbildung 98: Lösungsgehalte nach 45°C Ofentrocknung in Abhängigkeit von Entnahmeteufe für Prüfkörper aus der Bohrung B15-164 unter Berücksichtigung der Position der Übergänge der Betonierlagen (Ü. BL) in rot .....	99
Abbildung 99: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser.....	102
Abbildung 100: Lage der Bohrungen Durchmesser 300 mm im Sohlbereich.....	103
Abbildung 101: P300-47 Bereich linke Sohle - rauh.....	104
Abbildung 102: P300-46 Bereich Mitte Sohle – mäßig bearbeitet .....	104
Abbildung 103: P300-48 Bereich rechte Sohle - geschliffen.....	105
Abbildung 104: An Kernproben ermittelte effektive Gaspermeabilität – Kontaktzone Baustoff/ Gebirge, Sohle, links (L), Mitte (M) und rechts (R).....	106
Abbildung 105: Beispiel für die Anbindung im Kontakt MgO-Baustoff/Steinsalzgebirge, links: sichtbare Wegsamkeiten und unzureichende Anbindung, Mitte: augenscheinlich gute Anbindung, rechts: Darstellung des Porenraumes im Kontakt im Ergebnis einer CT-Aufnahme (HZDR, Herr Dr. J. Kulenkampff, 25.08.2022).....	106
Abbildung 106: Übersicht der Kammer- und Injektionsinstallation im Bauwerk .....	109
Abbildung 107: Zeitabhängige Änderung der Volumina der Ringkammern .....	113
Abbildung 108: Berechnete Druckganglinien für die Annahme einer integralen Permeabilität des Bauwerkes von $1E-18 \text{ m}^2$ .....	115
Abbildung 109: Übersichtsdarstellung des numerischen Modells für die Auswertung der in situ-Tests im Bauwerk.....	120
Abbildung 110: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK02, 13.06.2022	124
Abbildung 111: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK01, 13.06.2022	126
Abbildung 112: Gemessene und simulierte Druckganglinien der Testung RK03, 27.06.2022	127
Abbildung 113 Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [20].....	150
Abbildung 114: Schematische Darstellung der Gas- bzw. Lösungsströmung (Vierfachpacker).....	152
Abbildung 115: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Impulstestes mit einem Vierfachpacker .....	152
Abbildung 116: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Tests mit konstantem Druck (CP) mit einem Vierfachpacker .....	153
Abbildung 117: Schematischer Versuchsaufbau.....	155
Abbildung 118: Messausrüstung eines Bohrlochpackertests (hier beim Dichtigkeitstest). 155	

Abbildung 119:	Testauswertung - Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung	157
Abbildung 120:	Prinzipskizze der Ausrüstung (links) und Foto des Oberflächenpacker beim in situ Test (rechts) .....	158
Abbildung 121:	Testauswertung: räumliche Diskretisierung und Druckausbreitung im Simulationsmodell (links) und gemessene und berechnete Druckganglinien für drei Tests (rechts) .....	162
Abbildung 122:	Prinzipskizze der Ausrüstung (links) und Foto des Kombinationspackers beim in situ Test (rechts).....	163
Abbildung 123:	Testauswertung – Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung	164
Abbildung 124:	Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [36].....	175
Abbildung 125:	Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus.....	176
Abbildung 126:	Schematische Darstellung des numerischen Modells.....	177
Abbildung 127:	Foto Zweikammerversuchsapparatur für Gas.....	177
Abbildung 128:	Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen).....	177
Abbildung 129:	Verteilungsdichte/Verteilungssumme der Partikelgröße zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Anmischen der angerührten Styromag-Suspension. ....	201
Abbildung 130:	Am Baustoff und Gebirge ermittelter Lösungsgehalt für unterschiedliche Trocknungstemperatur .....	216
Abbildung 131:	Am Baustoff und Gebirge ermittelte Reindichte für unterschiedliche Trocknungstemperatur.....	217
Abbildung 132	Am Baustoff und Gebirge ermittelte Trockendichte.....	218
Abbildung 133:	Aus den Dichten berechnete totale Porosität für unterschiedliches Material	219
Abbildung 134:	Aus dem Lösungsgehalt und der totalen Porosität berechnete Sättigung	220
Abbildung 135:	An 4 Steinsalzproben mit MIP ermittelter Porenvolumenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und vergleichend unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne den Porenvolumenanteil der Poren >200 µm.....	221
Abbildung 136:	An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200 µm .....	222
Abbildung 137:	An Steinsalzproben ermittelte Porositäten durch MIP (Poren >200 µm vernachlässigt) und durch CT .....	223
Abbildung 138:	An Steinsalzproben ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen	223

Abbildung 139: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser.....	224
Abbildung 140: An Baustoffproben (A1-modifizierte Rezeptur) ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen .....	225

## 10.5 Tabellen

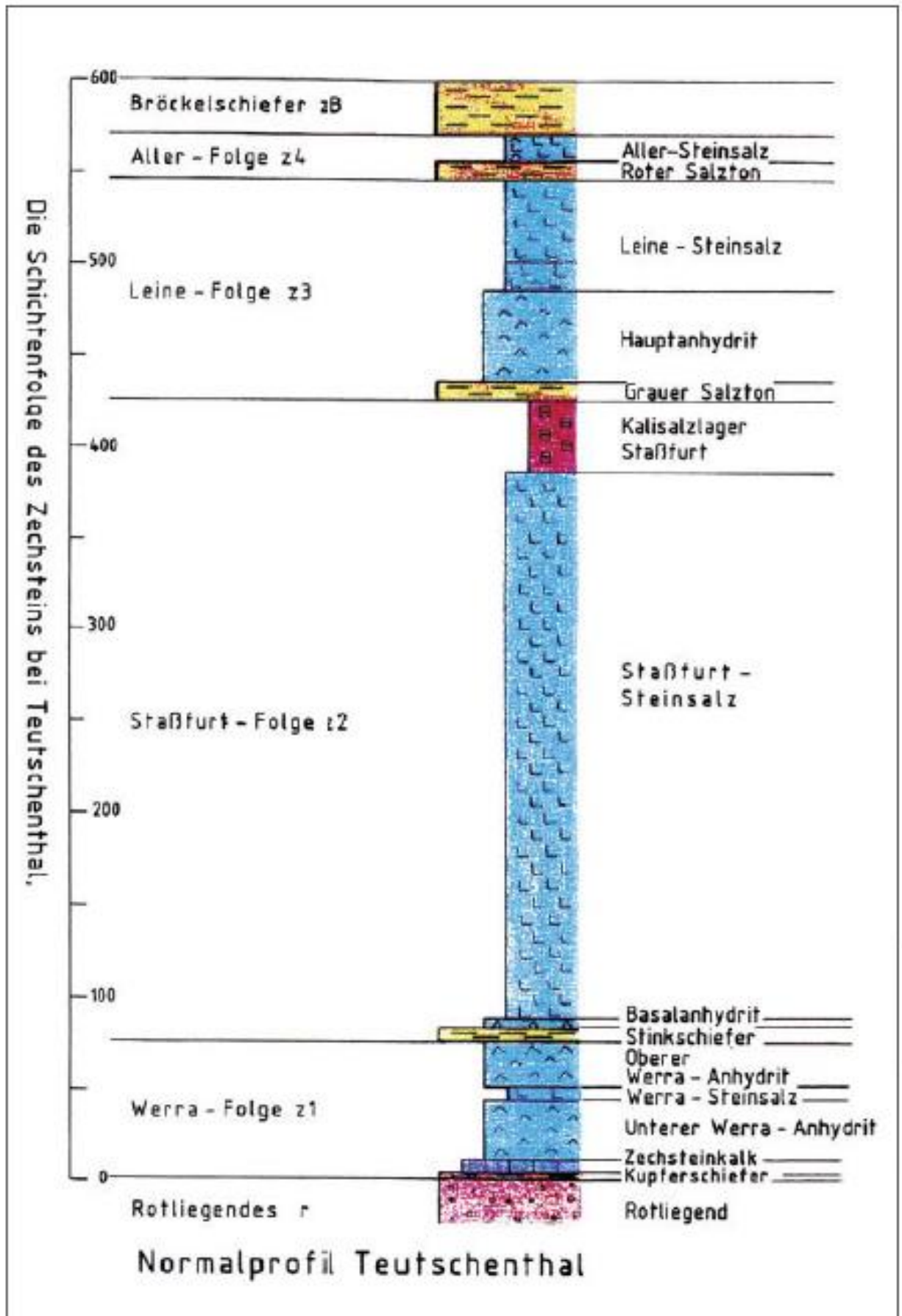
Tabelle 1: Geometrische Daten des Halbdamms (Ist-Werte).....	16
Tabelle 2: Mittlere Rauheitsparameter der Stöße und deren Standardabweichung .....	19
Tabelle 3: Mittlere Rauheitsparameter der bearbeiteten Sohlbereiche (1,5 m von der späteren Stirnfläche des Halbdamms entfernt).....	22
Tabelle 4: In situ-Spannungsmessungen in Bohrloch B10-200.....	23
Tabelle 5: Arbeitsprogramm zu den Oberflächenpackermessungen 2020 mittels Druckkolben-Oberflächenpacker mit trockener Druckluft als Testfluid.....	25
Tabelle 6: Arbeitsprogramm der Kombi- und Bohrlochpackertests in den Bohrungen B02_060 und B09_040 in der Sohle mit trockener Druckluft als Testfluid.....	27
Tabelle 7: Arbeitsprogramm zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B03_165 im Stoß mit trockener Druckluft als Testfluid .....	28
Tabelle 8: Position der KG-Rohre in Bezug auf die Stirnseite des Halbdamms.....	54
Tabelle 9: Übersicht und Zusammensetzung der Ausgangsstoffe der modifizierten A1-Rezeptur pro Charge (Mischerfüllung) .....	55
Tabelle 10: Überblick über die wichtigsten Daten der Betonage .....	57
Tabelle 11: Zusammensetzung des Styromag-Injektionsmittels .....	71
Tabelle 12: Übersicht Volumina.....	72
Tabelle 13: Ortungsergebnisse Seismik .....	79
Tabelle 14: Vergleich der gemessenen und simulierten Maximaltemperaturen.....	87
Tabelle 15: Arbeitsprogramm zu den Oberflächenpackermessungen 2022 mittels Druckkolben-Oberflächenpacker mit trockener Druckluft als Testfluid.....	88
Tabelle 16: Arbeitsprogramm der Kombi- und Bohrlochpackertests in den Bohrungen B02_060 und B09_040 in der Sohle (identisches Arbeitsprogramm für Untersuchungen 2020 und Wiederholung 2022) mit trockener Druckluft als Testfluid .....	89
Tabelle 17: Arbeitsprogramm zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B03_165 im Stoß (identisches Arbeitsprogramm für Untersuchungen 2020 und Wiederholung 2022) mit trockener Druckluft als Testfluid.....	89
Tabelle 18: Arbeitsprogramm zu den Bohrlochpackermessungen im Bauwerk in der Bohrung B14-164 in der Sohle mit trockener Druckluft als Testfluid.....	91
Tabelle 19: Arbeitsprogramm zu den Bohrlochpackermessungen im Bauwerk in der Bohrung B15-164 in der Sohle mit trockener Druckluft als Testfluid.....	91
Tabelle 20: Parameterbelegung der einzelnen Strömungsräume .....	121
Tabelle 21: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe.....	174

Tabelle 22:	Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 8.....	193
Tabelle 23:	Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 6.....	193
Tabelle 24:	Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (1) .....	194
Tabelle 25:	Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (2) .....	194
Tabelle 26:	Ergebnisübersicht der ermittelten Lösungsgehalte mit Angabe der Trocknungstemperatur .....	216
Tabelle 27:	Ergebnisübersicht der ermittelten Reindichten .....	217
Tabelle 28:	Ergebnisse der Trockendichteberechnung .....	218
Tabelle 29:	Ergebnisse der Porositätsberechnung aus Messwerten der Dichtemessung	219
Tabelle 30:	Ergebnisübersicht der berechneten Sättigung.....	220
Tabelle 31:	Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Steinsalz ohne Poren >200 µm .....	222
Tabelle 32:	Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben A1 modifizierte Rezeptur.....	224

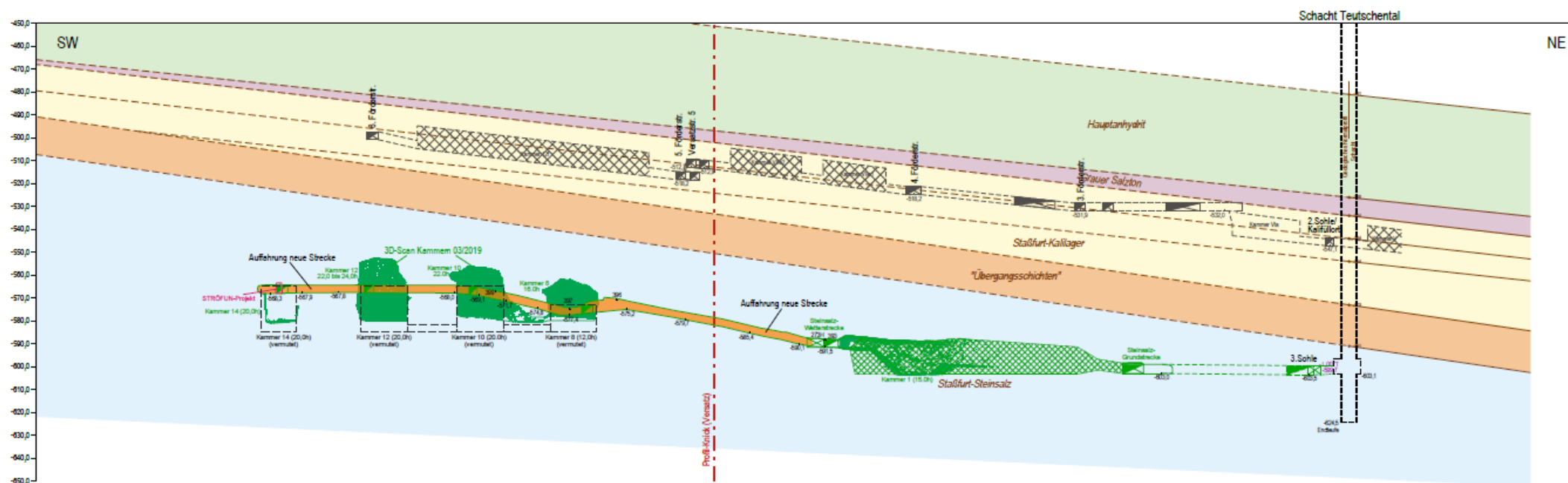
## **Anlagen**

Anlage 1 Standort – Geologie und bergbauliche Situation

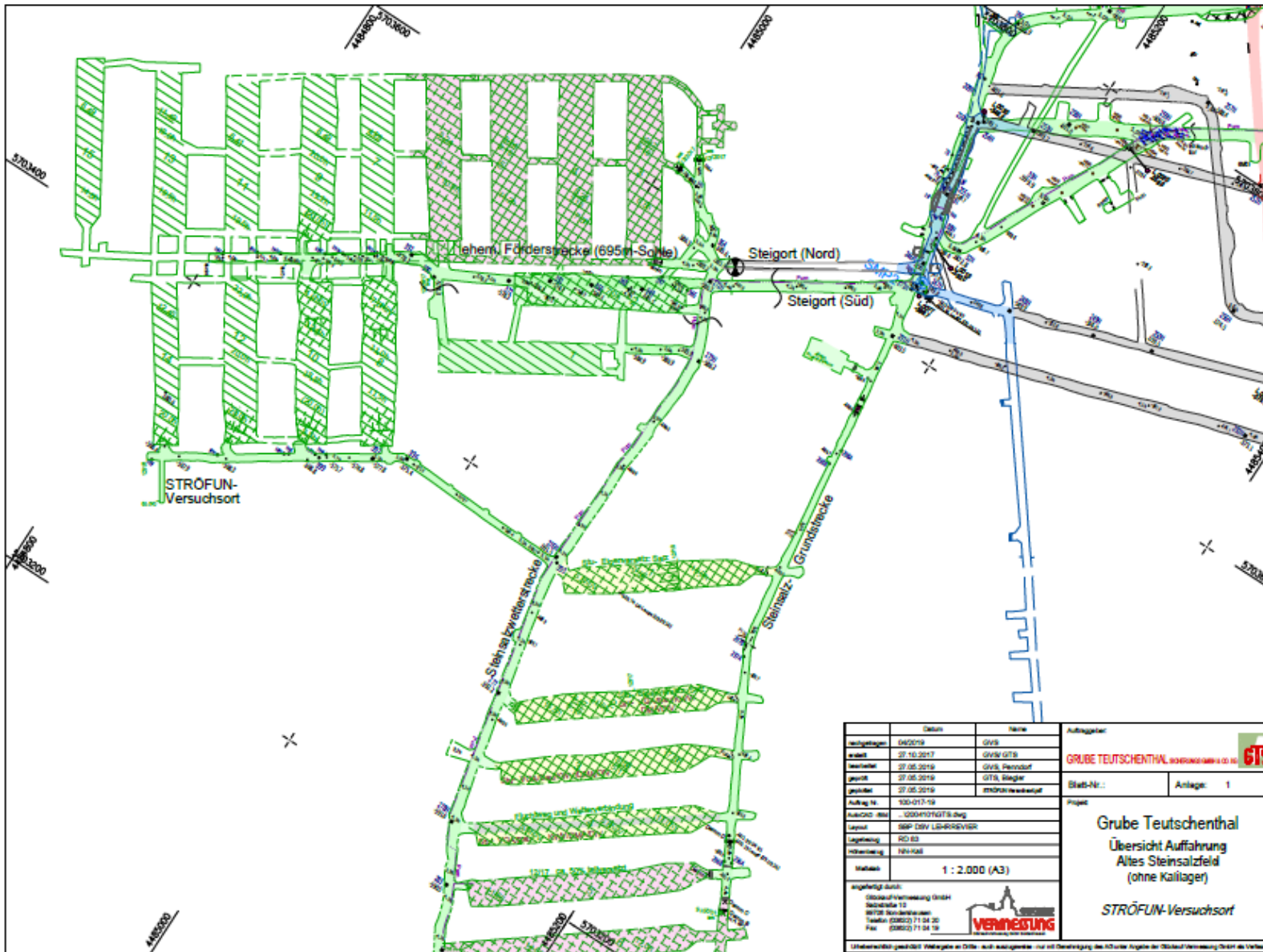
Anlage 1.1 Schichtenfolge des Zechsteins bei Teutschenthal [18]



# Anlage 1.2 Querschnitt des geologischen Profils des Standorts [18]



### Anlage 1.3 Übersicht der Auffahrungen am Standort [19]



## Anlage 2 Methodik zur Bestimmung hydraulischer Kennwerte

### Anlage 2.1 In situ-Permeabilitätsuntersuchungen - Methodik

#### Anlage 2.1.1 Ausgangsbedingungen für strömungstechnische Untersuchungen

Der Strömungsprozess einer flüssigen oder gasförmigen Phase<sup>(11,12)</sup>(Fluid) in einem Porenraum wird bestimmt:

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

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

- absolute Permeabilität  $k_{abs}$  bei einer Flüssigkeitssättigung im Porenraum von  $S_L=0$  (absolute Gaspermeabilität  $k_{G, abs}$ ) oder  $S_L=1$  (absolute Flüssigkeitspermeabilität  $k_{L, abs}$ )<sup>(13)</sup>,
- effektive Gas- und Flüssigkeitspermeabilität  $k_{G, eff}$  bzw.  $k_{L, eff}$  im Porenraum in Abhängigkeit von der Flüssigkeitssättigung  $0 < S_L < 1$  und
- relative Permeabilität  $k_{G, rel}$  bzw.  $k_{L, rel}$ .

Die relative Permeabilität beschreibt den Zusammenhang von effektiver Phasenpermeabilität und Flüssigkeitssättigung und wird durch folgende Gleichung beschrieben:

- 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<sup>(14)</sup> 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 <sup>2</sup> ]
$k_{Ph, abs}$	- absolute Permeabilität der Fluidphase	[m <sup>2</sup> ]
$k_{Ph, abs}$	- volumetrische Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit	[-], [Vol.-%]
X	- Wertebereich $S_{Ph}$ ( $0 \leq X \leq 1$ )	[-]

<sup>(11)</sup> mit anderen Fluiden nicht mischbares Fluid – Wasser, Öl, Gas

<sup>(12)</sup> theoretisch  $k_{G, abs} = k_{L, abs}$ ; praktisch durch vielfältige Einflüsse  $k_{G, abs} \neq k_{L, abs}$

<sup>(13)</sup> theoretisch  $k_{G, abs} = k_{L, abs}$ ; praktisch durch vielfältige Einflüsse  $k_{G, abs} \neq k_{L, abs}$

<sup>(14)</sup> i. d. R. in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit betrachtet, da die Flüssigkeit als die benetzende Phase angesehen wird

Die Abbildung 113 zeigt schematisch den Zusammenhang von relativer Permeabilität der Fluidphasen und der Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit [20].

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.

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

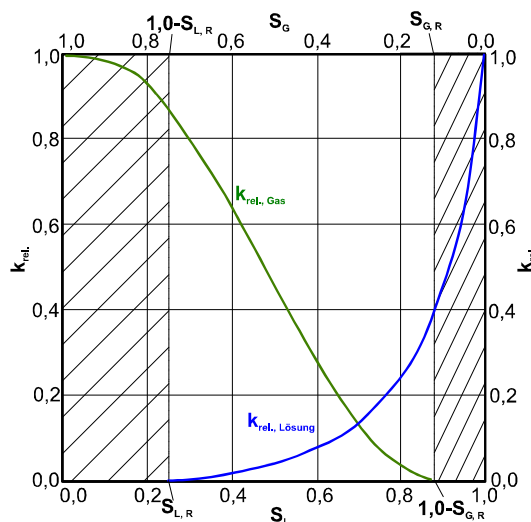


Abbildung 113 Permeabilität in Abhängigkeit von der Sättigung des Porenraumes mit aquatischer Salzlösung nach [20]

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

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

## Anlage 2.1.2 Beschreibung der Testmethode - in situ-Permeabilitätsuntersuchungen

In situ-Permeabilitätstests stellen in situ durchgeführte, strömungstechnische Versuche dar, bei denen ein instationärer Strömungsprozess im Porenraum des zu untersuchenden Gebirges angeregt und in seinem zeitlichen 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. [21], [22], [23], [24], [5], [25], [26]).

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).

Für die in situ-Ermittlung der Permeabilität von Gebirgsformationen und Bauwerken kommen folgende Versuchsmethoden zum Einsatz:

- Bohrlochpackertests
- Oberflächenpackertests
- kombinierte Bohrloch-Oberflächenpacker-Tests

### **Anlage 2.1.3 Bohrlochpackertests**

#### **Anlage 2.1.3.1 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 114). Die Versuchsausrüstung wird in Anlage 2.1.3.3 näher erläutert.

Die in situ-Permeabilitätstests in einem Testintervall werden zweistufig durchgeführt. Dabei wird in einem ersten Impulstest das Permeabilitätsniveau für das untersuchte Testintervall ermittelt (Vorversuch). Beim Nachweis eines schnellen Druckabfalls 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 angemessenen 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 114). In Abhängigkeit von der Permeabilität des Gebirges und einer nicht auszu-schließenden sekundären Auflockerungszone um die Messbohrung kommt es zu Druckreaktionen in den Kontrollräumen und in der Folge zu sich überlagernden Strömungsprozessen (Interferenz). Abbildung 115 und Abbildung 116 zeigen Beispiele für gemessene Druckverläufe und die rechnerische Anpassung bei Impuls- und konstanten Drucktests.

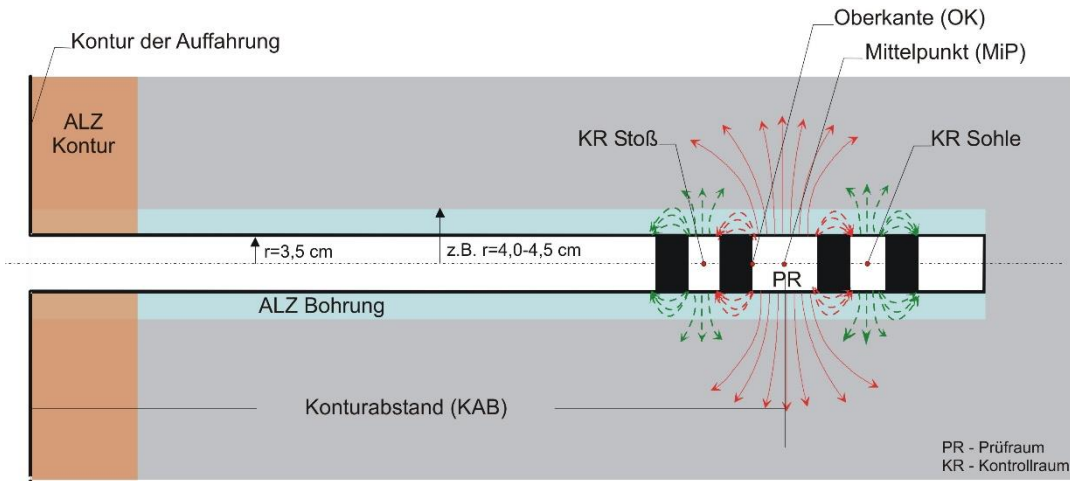


Abbildung 114: Schematische Darstellung der Gas- bzw. Lösungsströmung (Vierfachpacker)

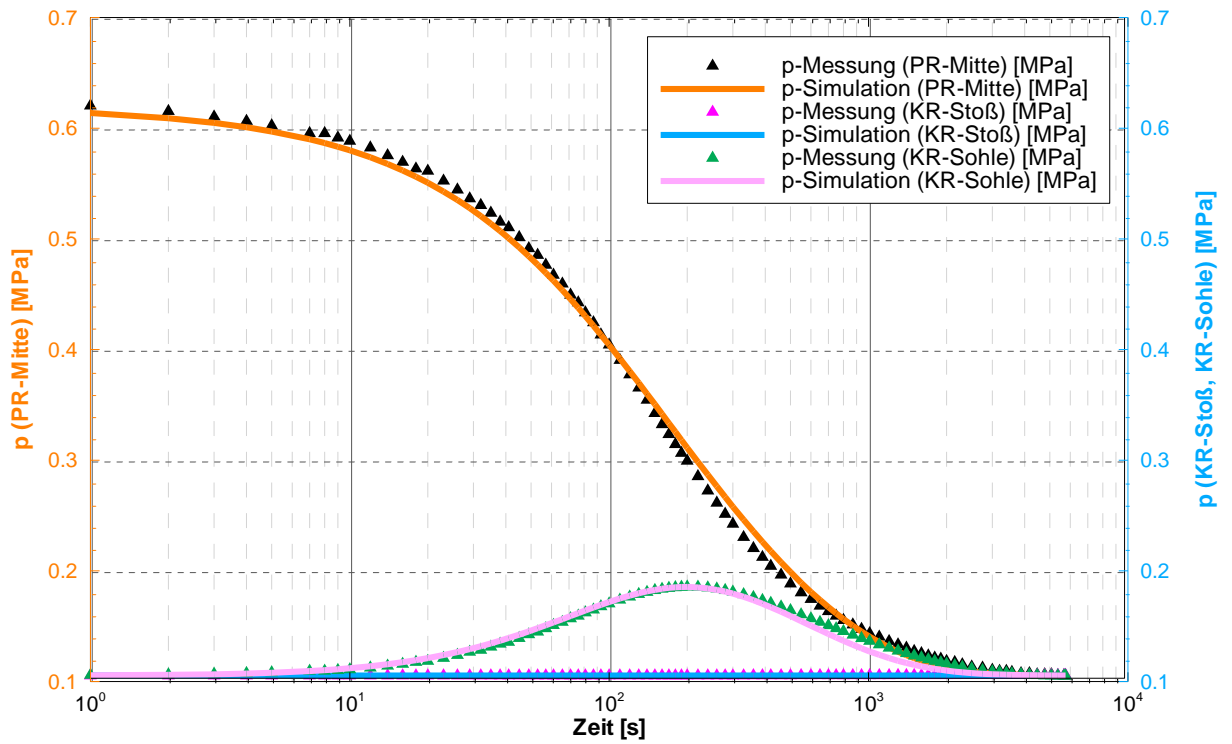


Abbildung 115: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Impulstestes mit einem Vierfachpacker

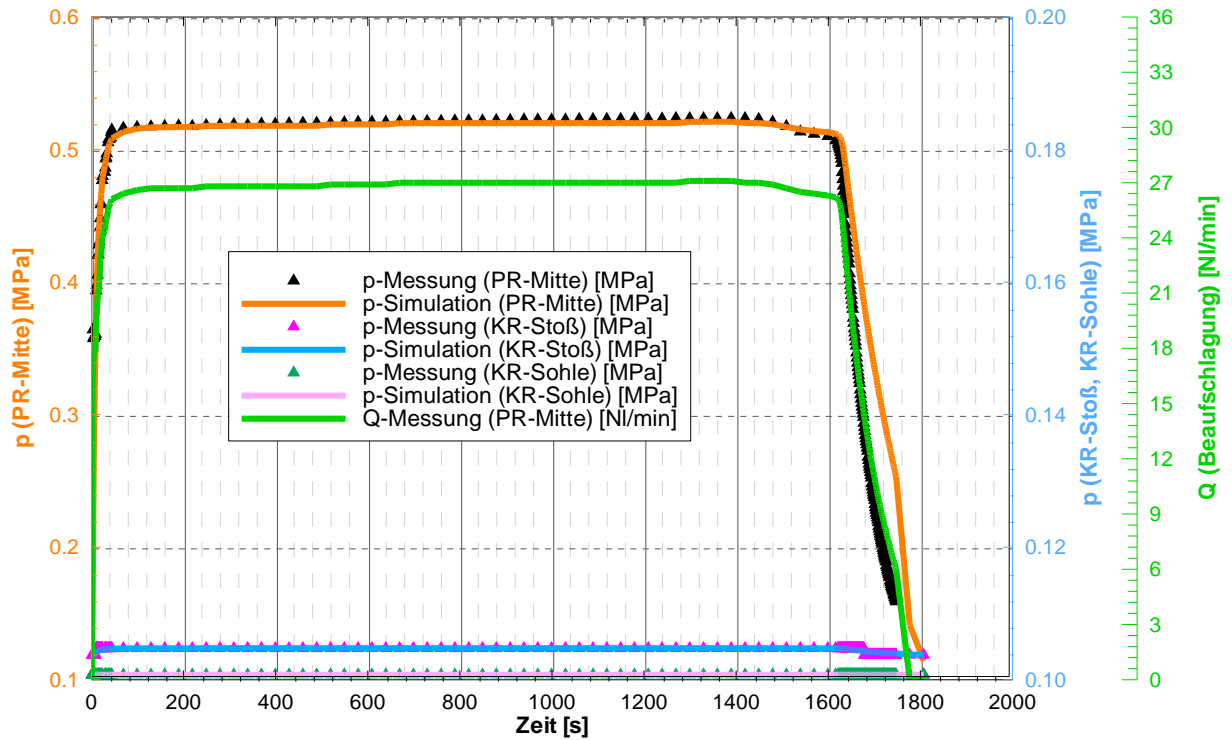


Abbildung 116: Beispiel für die erfassten Messparameter und die Versuchsauswertung eines Tests mit konstantem Druck (CP) mit einem Vierfachpacker

### Anlage 2.1.3.2 Versuchsdurchführung

Ausgehend von der Beschreibung des Messverfahrens und der Versuchseinrichtung in Anlage 2.1.3.1 und Anlage 2.1.3.3 werden die einzelnen Schritte der im Projekt angewendeten, unterschiedlichen Versuchsregime für die Ermittlung der Gaspermeabilität 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 Packersetzdruckes und der Temperatur,
- modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Standort und zum Testverlauf.

#### Test mit konstantem Druck (Gas) – constant pressure test

Die Tests mit konstantem Druck werden in folgenden Teilschritten realisiert:

- Einbau der Versuchsanordnung am Messpunkt, ggf. Sicherung der Packergarnitur im Bohrloch (Einfachpacker),
- hydraulisches Setzen der Packer; Beobachtungsphase zur Gewährleistung eines vollständigen Setzens der Packer,
- Druckbeaufschlagung des Prüfdruckes mit einem konstanten Druck (aus einer externen Druckluftflasche),
- zeitabhängige Messung des Prüfdruckes und ggf. der Druckreaktion in den Kontrollräumen sowie des Druckes in der Druckluftflasche zur Ermittlung des Gasvolumenstromes, des Luftdruckes, des Packerdruckes und der Temperatur,
- modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Standort und zum Messverlauf.

#### Impulstest (Flüssigkeit)

Die Impulstests für die Lösungspermeabilitätsbestimmung werden in folgenden Teilschritten durchgeführt:

- Einbau der Packerapparatur im Stahlrohr und Drucktest (Nachweis der Dichtheit der Versuchsausrüstung),
- wenn nicht natürlich gegeben, ist das Auffüllen des Bohrloches mit Flüssigkeit (Ermittlung dynamische Viskosität im Vorfeld notwendig) erforderlich → Sättigung des Porenraumes mit Flüssigkeit,
- Einbau der Packerapparatur am Messpunkt, ggf. mechanische Sicherung der Packerapparatur im Bohrloch (z.B. Beaufschlagung der Bohrung),
- hydraulisches Setzen der Packer; Beobachtungsphase zur Gewährleistung eines vollständigen Setzens der Packer,
- Evakuieren der Flüssigkeit in den Kammern und den Leitungen des Packers mit Vakuumpumpe (Entfernung von Restgas),
- Druckimpuls auf die Prüfkammer der Packerapparatur, mittels Flüssigkeitspumpe,
- zeitabhängige Messung des Prüfdruckes und ggf. der Druckreaktion in den Kontrollräumen sowie des Luftdruckes, des Packerdruckes und der Temperatur,
- Messwiederholung bis zur Reproduzierbarkeit der Druckabfallrate (insbesondere bei primär ungesättigten Bedingungen und/oder chemischen Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und porösem Medium),
- modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Messpunkt und zum Messverlauf.

#### Anlage 2.1.3.3 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 Bohrlochtieftes ausgestattet.

Für Permeabilitätsuntersuchungen 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 Bohrlochtieftes) beaufschlagt. Die Länge des Prüfintervalls ist variabel und richtet sich nach der Entfernung des ersten Packersegmentes vom Bohrlochtieftes. Bei dem beschriebenen Versuchsaufbau ist in jedem Fall eine Sicherung der Packergarnitur durch ein Widerlager am Bohrlochansatz (Überwurfjoch und Gebirgsanker) erforderlich.

Die Bohrlochpacker werden über Edelstahl-druckleitungen (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 117 und Abbildung 118 zeigen den schematischen Versuchsaufbau und die Messausrüstung.

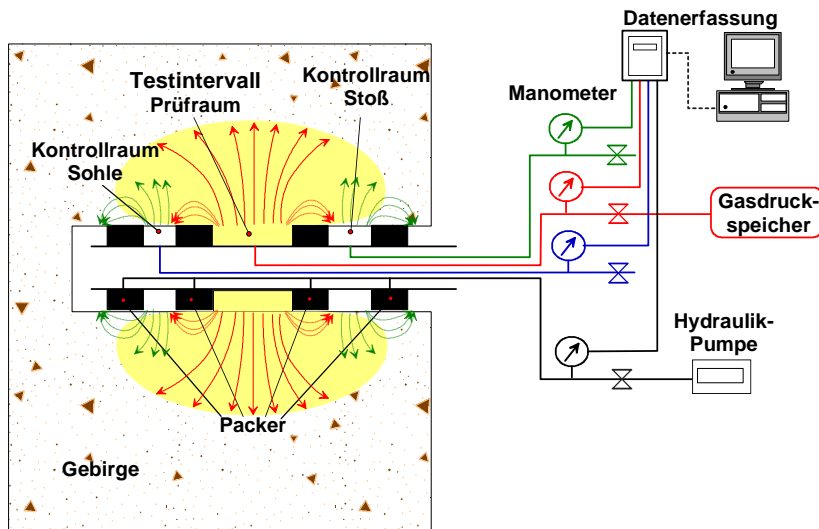


Abbildung 117: Schematischer Versuchsaufbau

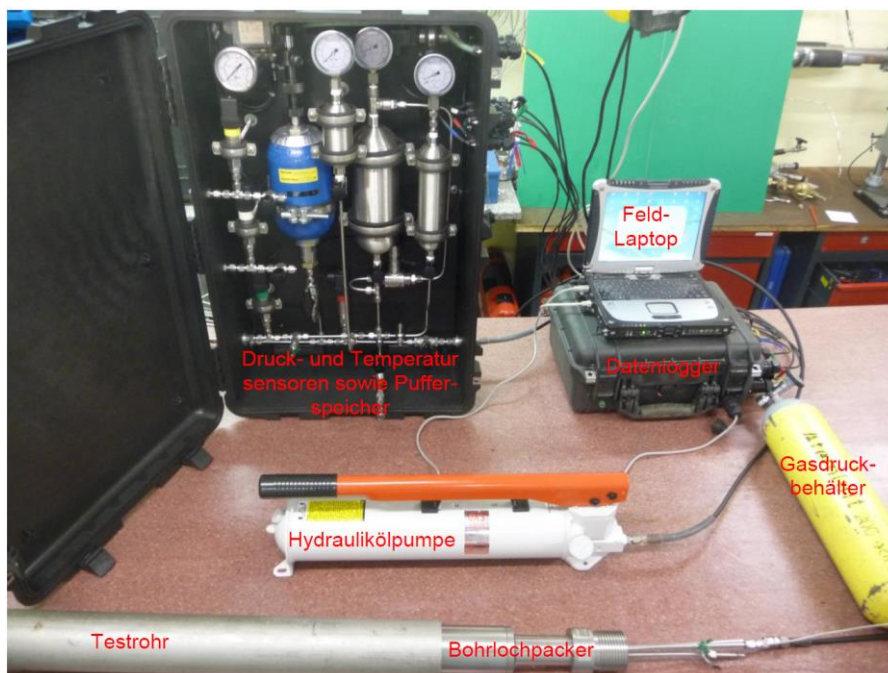


Abbildung 118: Messausrüstung eines Bohrlochpackertests (hier beim Dichtetest)

Die Durchführbarkeit der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen ist abhängig von der Tiefe der Testintervalle, der Qualität der Messbohrung (insbesondere der Bohrlochkontur – siehe Anlage 2.1.6) 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 (Dichtheitstest) mit einer Testdauer von 8 h bis 20 h für Gas unterzogen. Dabei wird zur Detektion von Undichtigkeiten bei Bedarf mit Tetrafluor-ethan 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.

Die in situ-Permeabilitätsuntersuchungen können generell für unterschiedliche Gase und Flüssigkeiten (z.B. wässrige Salzlösungen) durchgeführt werden. Die dabei eingesetzte Messapparatur unterscheidet sich bei Impulstests und Tests mit konstantem Prüfdruck nur geringfügig voneinander (externe 20 MPa Druckluftquelle bei CP).

#### **Anlage 2.1.3.4      Auswertung**

Für die Ermittlung der Permeabilität wird für jeden Versuch ein zweidimensionales Modell mit  $r$ - $\phi$ - $z$  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 119). 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.

In Abbildung 119 ist beispielhaft für einen 4-fach Packertest das Modell zur Abbildung der radialsymmetrischen Fluidströmung mit der Diskretisierung und der berechneten räumlichen Druckverteilung dargestellt.

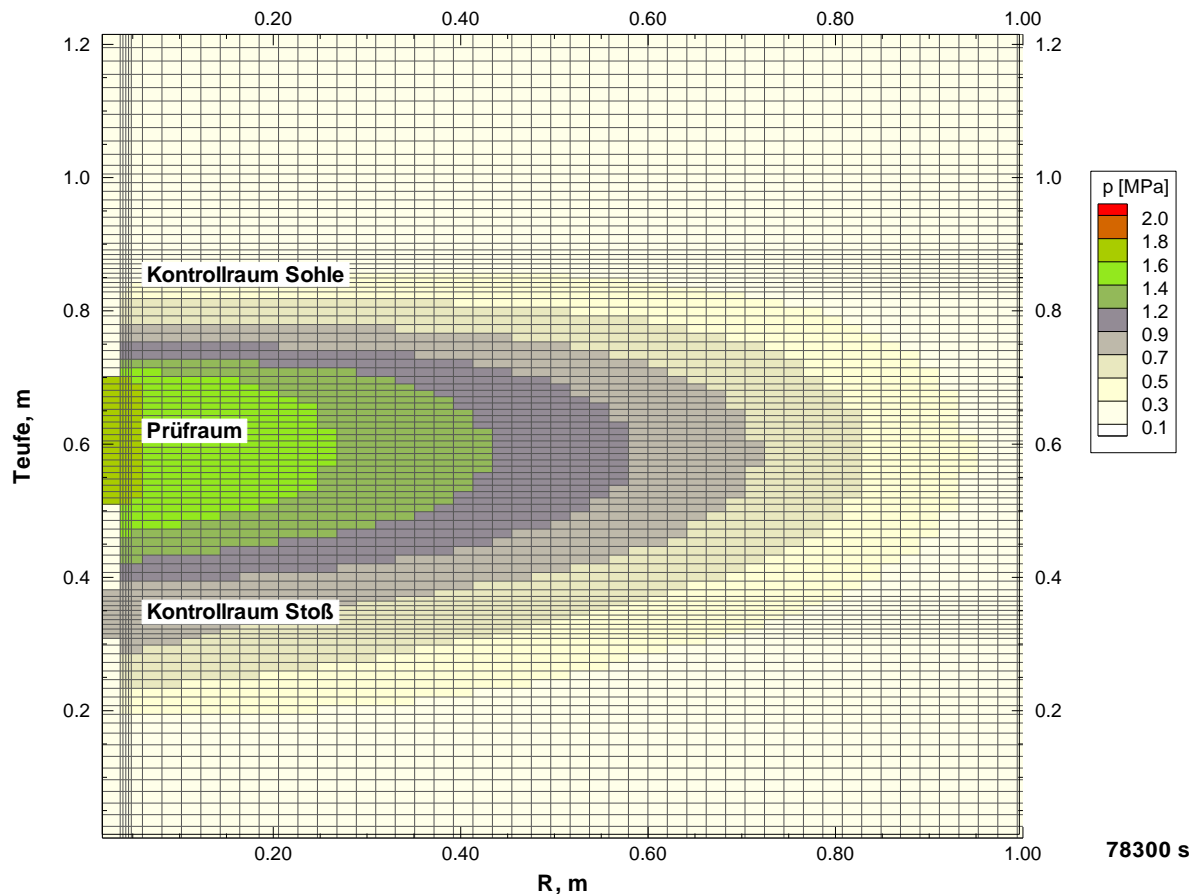


Abbildung 119: Testauswertung - Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung

## Anlage 2.1.4 Oberflächenpackertests

### Anlage 2.1.4.1 Konzept des Oberflächenpackers

Der Oberflächenpacker ist so konstruiert, dass ein Hohlvolumen, der Prüf- oder Druckraum (DR), an der Gesteinsoberfläche so abgedichtet wird, dass der Gasstrom von diesem Volumen zur unabgedichteten Gesteinsfläche verläuft. Abbildung 120 zeigt die Prinzipskizze und ein Foto des Oberflächenpackers. Zur Erzielung der Abdichtung wird der Packer mit Hilfe eines Jochs und eines Hydraulikstempels an die Gebirgsoberfläche gepresst. Zur Beurteilung und Bilanzierung des Strömungsprozesses ist um den Druckraum ein ringförmiger Kontrollraum (KR) angeordnet. Beide Volumina sind mit Drucksensoren ausgerüstet. Die weitere Ausrüstung der Packeranordnung besteht aus:

- Kompressor oder Vakuumpumpe mit Gasbehälter zur Druckbeaufschlagung,
- Datenlogger,
- Computer,
- Verbindungsschläuche und Absperrrichtung.

Der Oberflächenpacker kann sowohl für Tests mit Vakuum als auch für Überdruck angewendet werden. Die Beschaffenheit der Gebirgsoberfläche erfordert, auch bei schonender bergmännischer Herstellung, eine Glättung der Oberfläche vor dem Test zur Gewährleistung der Packerdichtheit. Die Glättung wird durch geringes Anschleifen der Kontur um wenige Millimeter erreicht. Mit der entwickelten Ausrüstung können Tests sowohl mit Unterdruck als auch mit Überdruck bis zu 10 bar durchgeführt werden. Aufgrund der für die Kontur in der Regel anzunehmenden geringen Gebirgsspannung werden Prüfdrücke von < 5 bar angewendet.

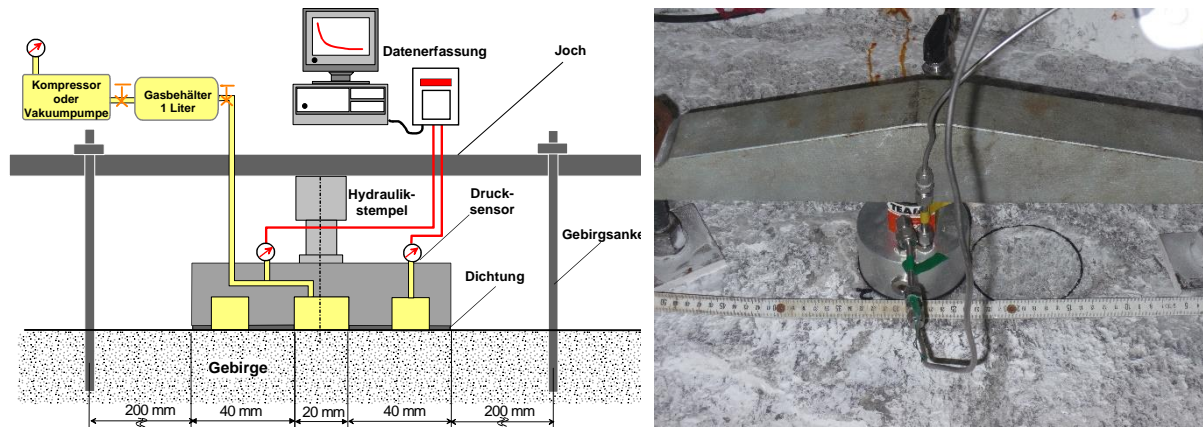


Abbildung 120: Prinzipskizze der Ausrüstung (links) und Foto des Oberflächenpacker beim in situ Test (rechts)

#### Anlage 2.1.4.2 Versuchsdurchführung

Bei den Oberflächenpackertests handelt es sich, wie bei den Bohrlochpackertests, um instationäre in situ-Strömungsversuche. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die Oberfläche eines Konturbereiches (in axialer Richtung) angeströmt wird. Prinzipiell lassen sich zwei unterschiedliche Arten von Oberflächenpackertests unterscheiden:

- mittels Baustoffoberflächenpacker und
- mittels mobilem Oberflächenpacker.

Da Baustoffoberflächenpackertests spezielle Zielstellungen haben und für den Bericht nicht von Bedeutung sind, wird im Folgenden nur auf Tests mit mobilem Oberflächenpacker eingegangen.

Zur Gewährleistung des Dichtsitzes der Packergummis muss, auf Grund der Rauigkeit der Kontur des zu testenden Gebirgsbereiches, der Messpunkt vor der Messung mittels eines Schleifgerätes vorbereitet werden. Hierzu wird die Gebirgskontur angeschliffen, so dass bei minimaler Schleiftiefe eine glatte, ebene Kontur entsteht. Über die Variation der Schleiftiefe besteht die Möglichkeit die Permeabilität im konturnahen Gebirgsbereich (von ca. 0 m bis ca. 0,05 m) schrittweise zu untersuchen.

Ausgehend von der Beschreibung des Messverfahrens in Anlage 2.1.4.1 werden die einzelnen Arbeitsschritte, wie sie für Tests mit mobilen Oberflächenpacker Anwendung finden, nachfolgend kurz erläutert.

Die Tests mit mobilen Oberflächenpacker werden in folgenden Teilschritten durchgeführt:

- Einbau der Packerapparatur in Testjoch und Drucktest (Nachweis der Dichtheit der Versuchsausrüstung),
- Vorbereitung des Messpunktes mittels Schleifgerät (Konturglättung bzw. Herstellung der gewünschten Messpunkttiefe),
- unmittelbar nachfolgender Anbau der Packergarnitur am vorbereiteten Konturbereich, mechanische Sicherung der Packergarnitur am Messpunkt durch ein Testjoch als mechanisches Widerlager,
- hydraulisches Setzen des Packers; Beobachtungsphase zur Gewährleistung eines vollständigen Setzens der Packerelemente,
- Zuschalten eines Druckflüssigkeitsspeichers zur Pufferung des Packersetzdruckes,

- Beaufschlagung der Prüfkammer der Packerausrüstung mit einem Druckimpuls oder einem konstanten Druck,
- zeitabhängige Messung des Prüfdruckes und ggf. der Druckreaktion in den Kontrollräumen sowie des Luftdruckes, des Packerdruckes und der Temperatur am Versuchsort,
- modellgestützte Auswertung der gemessenen Druckverläufe unter Berücksichtigung der Kenntnisse zum Messort, zur Versuchskonfiguration, zum Strömungsfluid und zum Messverlauf

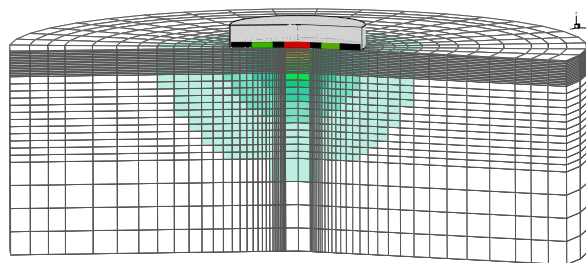
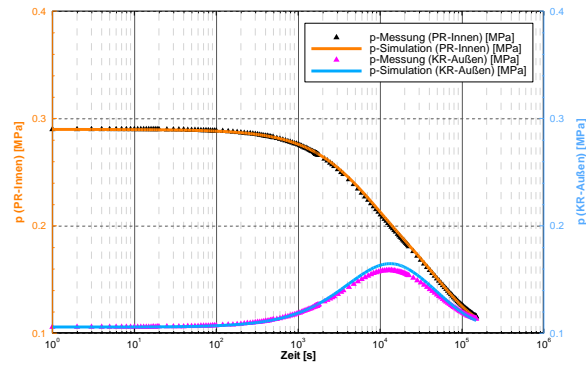
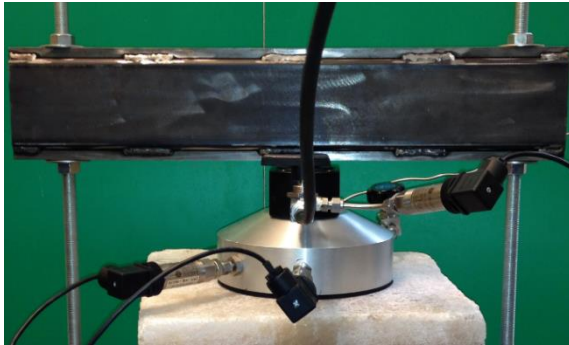
Abgesehen von den oben genannten Unterschieden treffen die Ausführungen zur Versuchsdurchführung von Permeabilitätstests in Messbohrungen auch für die Oberflächenpackertests zu.

#### **Anlage 2.1.4.3 Versuchsausrüstung**

Mobile Oberflächenpacker wurden schon in der Vergangenheit entwickelt bzw. eingesetzt. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurden durch IBeWa sowohl das Versuchskonzept weiterentwickelt als auch entsprechende mobile Oberflächenpackergarnituren gebaut und erfolgreich getestet.

Es stehen derzeit zwei Packergarnituren, jeweils mit einem Kontrollraum, zur Verfügung.

Abgesehen von den konstruktiven Unterschieden der eigentlichen Packergarnitur treffen die Ausführungen zur Versuchsdurchführung von Permeabilitätstests in Messbohrungen auch für die Oberflächenpackertests zu.



Packerkonfiguration: Oberflächenpacker, 1 Prüfraum, 1 Kontrollraum

Durchmesser:

Packer: 0,1 m 0,2 m

Prüfraum: ca. 0,02 m ca. 0,07 m

Kontrollraum: ca. 0,04-0,08 m ca. 0,15-0,17 m

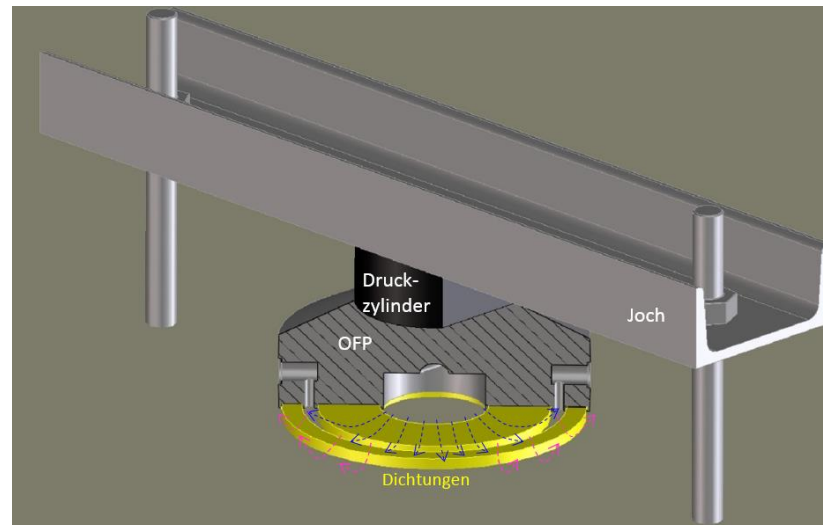
Testdruck: ≤ 5 MPa

Testregime: Impulstest, Test mit konstantem Druck

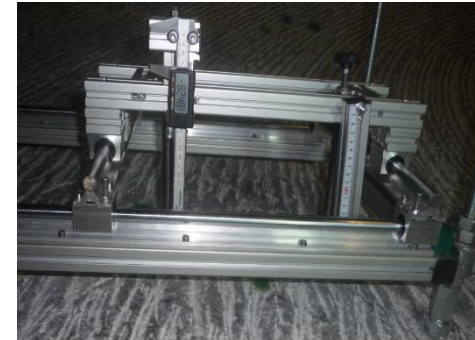
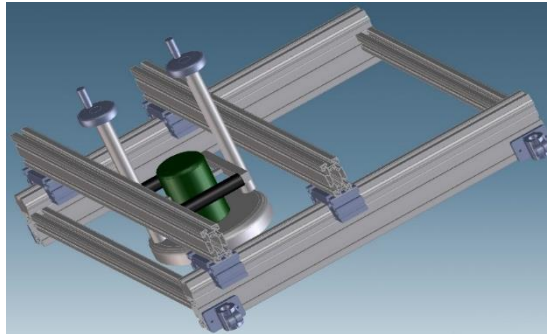
Fluide: Gas, Flüssigkeiten (Salzlösungen)

Testdauer: Stunden bis Tage

Permeabilität: ≥1E-22 m<sup>2</sup> / <1E-22 m<sup>2</sup> höhere Messdauer



Abmessungen: 0,4 m x 0,3 m  
min. Schleiffläche: abhängig von Konturrauheit  
max. Schleiftiefe: ca. 0,05 m  
Gewicht: ca. 10 kg  
Besonderheiten: 4-Punktfixierung  
lagestabile 2d-Schleiffläche  
in Größe variable Schleif-  
töpfe



## Anlage 2.1.4.4 Auswertung

Zur Interpretation der mit dem Oberflächenpacker gemessenen Testergebnisse wurde ein numerisches Simulationsprogramm entwickelt. Dieses Simulationsprogramm ermöglicht die Modellierung des Strömungsraumes in r-z-Geometrie (oder r- $\phi$ -z-Geometrie für die Bestimmung der Permeabilität). Eine typische Gitternetzstruktur, wie sie für die Testinterpretation verwendet wird zeigt Abbildung 121. Gleichfalls wird in Abbildung 121 die räumliche Druckverteilung im Gebirge (links) und die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Druckganglinien für drei Tests dargestellt.

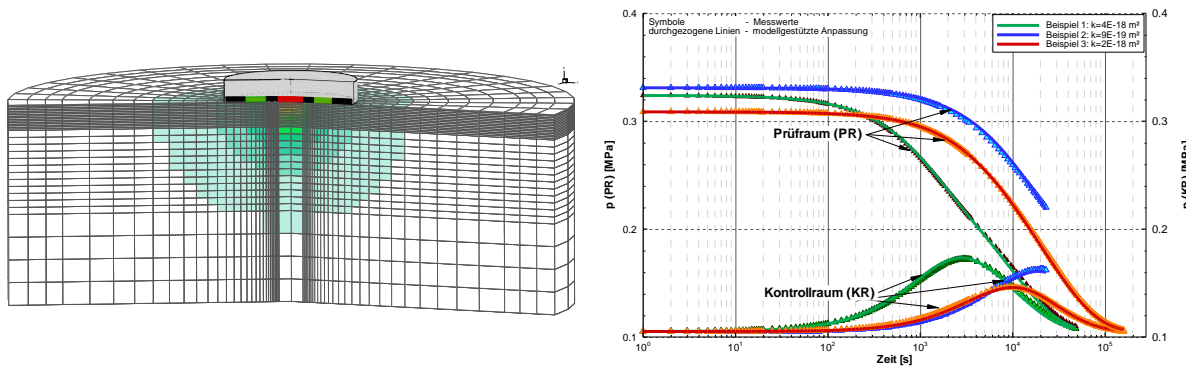


Abbildung 121: Testauswertung: räumliche Diskretisierung und Druckausbreitung im Simulationsmodell (links) und gemessene und berechnete Druckganglinien für drei Tests (rechts)

## Anlage 2.1.5 Kombipacker

### Anlage 2.1.5.1 Testmethode und Versuchsdesign

Der Kombinationspacker (KP) stellt eine Kombination von Bohrloch- und Oberflächenpacker dar. Er ermöglicht in situ-Permeabilitätstests im konturnahen Bereich ( $< 0,07 \text{ m}$ ). Dies ist von besonderer Bedeutung bei der Erkundung der Ausdehnung der konturnahen Auflockerungszone an Standorten geplanter Verschluss- bzw. Abdichtbauwerke. In Abhängigkeit von der bergtechnischen, gebirgsmechanischen und geologischen Situation sowie der Standzeit des Standortes kann diese eine unterschiedliche Ausdehnung erreichen. Der neu entwickelte und getestete Kombinationspacker ermöglicht die strömungstechnische Parametrisierung dieses Bereiches für Konturabstände kleiner  $0,07 \text{ m}$  und Testintervalle mit einer kleinsten Länge von  $0,01 \text{ m}$ .

Für die Kombination von Bohrloch- und Oberflächenpacker waren folgende konstruktiven Entwicklungen erforderlich:

- Bohrlochpacker
  - Entwicklung einer 3-fach-Packergarnitur (3 Packerelemente und 2 Messintervalle),
  - Reduzierung der Messintervalllänge von min.  $0,09 \text{ m}$  auf min.  $0,01 \text{ m}$ .
- Oberflächenpacker
  - Anpassung des Durchmessers des zentralen Messintervalls auf Bohrllochdurchmesser von  $0,07 \text{ m}$ ,
  - Ausführung des zentralen Messintervalls als Durchführung (Bohrlochpacker) und
  - Modifizierung des mechanischen Widerlagers zur Aufbringung des Anpressdrucks.

Die Abbildung 122 zeigt eine Prinzipskizze und den Einsatz eines Kombinationspackers.

Mit den Kombinationspackern können derzeit ausschließlich Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,07 m und präparierte Konturflächen mit einem Durchmesser > 0,20 m getestet werden.

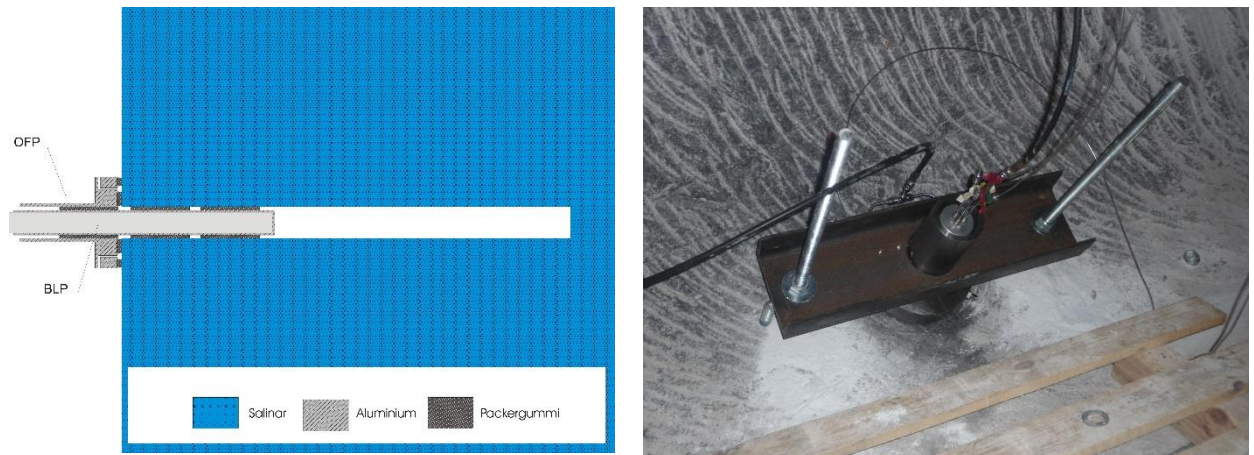


Abbildung 122: Prinzipskizze der Ausrüstung (links) und Foto des Kombinationspackers beim in situ Test (rechts)

Vom Prinzip stellt der Kombinationspacker einen 4-fach-Bohrlochpacker dar, bei dem der Bohrlochpacker mit seinem stoßseitigen Packerelement im OFP abgesetzt (Bohrungsverlängerung) wird und der Kontrollraum des OFP (äußeres Messintervall) den Kontrollraum Stoß eines 4-fach-Bohrlochpackers darstellt. Die Tests werden, wie für OFP und BLP, als instationäre in situ-Strömungsversuche durchgeführt. Wie bei den Bohrlochpackertests wird der konturnahe Gebirgsbereich in radialer Richtung angeströmt und die konturnahe Oberfläche des Gebirges in axialer Richtung durch einen Oberflächenpacker abgedichtet. Dies erfordert die Gewährleistung des Dichtsitzes der Packergummis des OFP. Aus diesem Grund und da die Gebirgskontur i.d.R. rau ausgebildet ist, muss der Messpunkt vor der Messung, wie für die OFP-Tests, vorbereitet werden. Hierzu wird die Gebirgskontur angeschliffen, so dass bei minimaler Schleiftiefe eine glatte, ebene Kontur entsteht.

Diese spezielle Messapparatur ist durch einen Eintrag beim Deutschen Patent- und Markenamt rechtlich geschützt (Nr. 20 2016 001 532.0).

### Anlage 2.1.5.2 Versuchsdurchführung

Abgesehen von den konstruktiven Unterschieden der Packergarnitur treffen die Ausführungen zur Versuchsdurchführung von Bohrlochpackertests auch für die Kombinationspackertests zu (Anlage 2.1.3.2, Anlage 2.1.4.2).

### Anlage 2.1.5.3 Versuchsausrüstung

Kombinationspacker stellen eine aktuelle Entwicklung dar. Es stehen derzeit zwei auf den Einsatz in Bohrungen mit 70 mm Durchmesser begrenzte Packersysteme zur Verfügung. Mit diesen können konturnah mit Testintervallen bzw. Prüfräumen von 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, und 5 cm Tests durchgeführt werden. Im Fall, dass man den Prüfraum von 1 cm zur Hälfte im OFP absetzt sind auch radiale Messungen im Konturabstand von 0,5 cm möglich.

## Anlage 2.1.5.4 Auswertung

Analog zu den Bohrloch- und Oberflächenpackertests erfolgt auch für die Auswertung der Kombinationspackertests eine modellgestützte Parameteridentifikation unter Verwendung eines geeigneten numerischen Simulationsprogramms. Die Modellierung des Strömungsraumes kann sowohl in r-z-Geometrie als auch in r- $\phi$ -z-Geometrie zur Bestimmung der Permeabilität vorgenommen werden. Eine typische räumliche Diskretisierung, wie sie für die Testinterpretation verwendet wird, und die räumliche Druckverteilung im Gebirge werden in Abbildung 123 gezeigt.

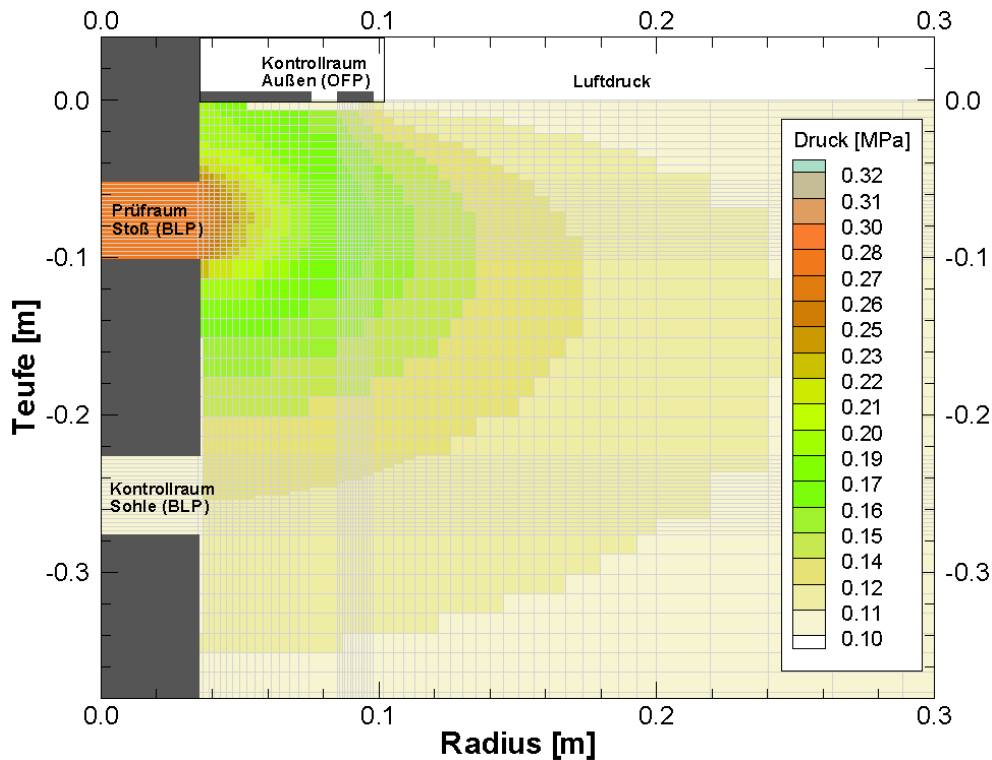
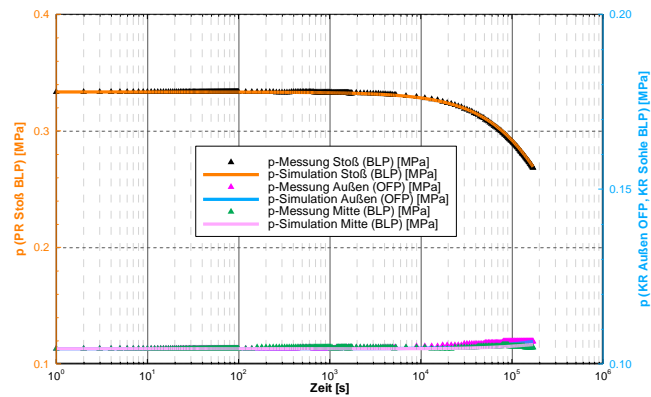


Abbildung 123: Testauswertung – Modelldiskretisierung und räumliche Druckverteilung

[Erläuterung: rot => hoher Druck ausgehend vom Prüfraum bzw. Testintervall; cremfarben => anfänglicher (niedrigerer) Druck im Strömungsraum; dunkelgrau => passiv (Packerelemente)]

## Kombipacker



Packerkonfiguration:

Bohrlochpacker: 1fach-, 2fach-, 3fach-, 4fach-Packer

→ 1 Prüfraum + 1, 2 oder 3 Kontrollräume

Bohrlochpacker:

Durchmesser:

66-75 mm

Länge Testintervalle:

0,01-0,58 m + im OFP (<0,01 m) + Bohrung

Oberflächenpacker:

Durchmesser:

0,2 m

Prüfraum:

0,07 m

Kontrollraum:

0,15-0,17 m

Testdruck:

≤ 5 MPa

Testregime:

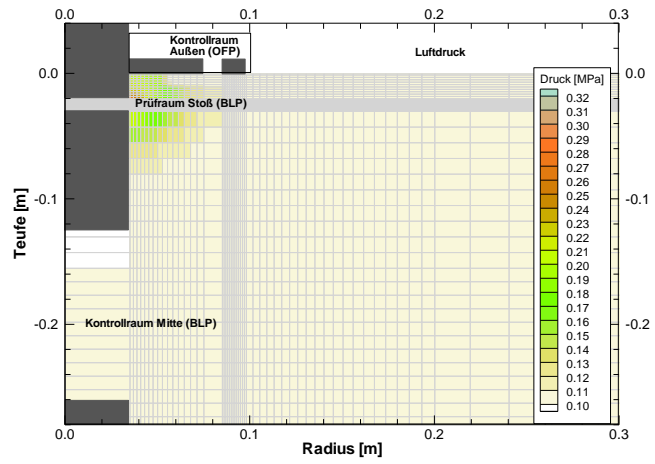
Impulstest, Test mit konstantem Druck

Fluide:

Gas

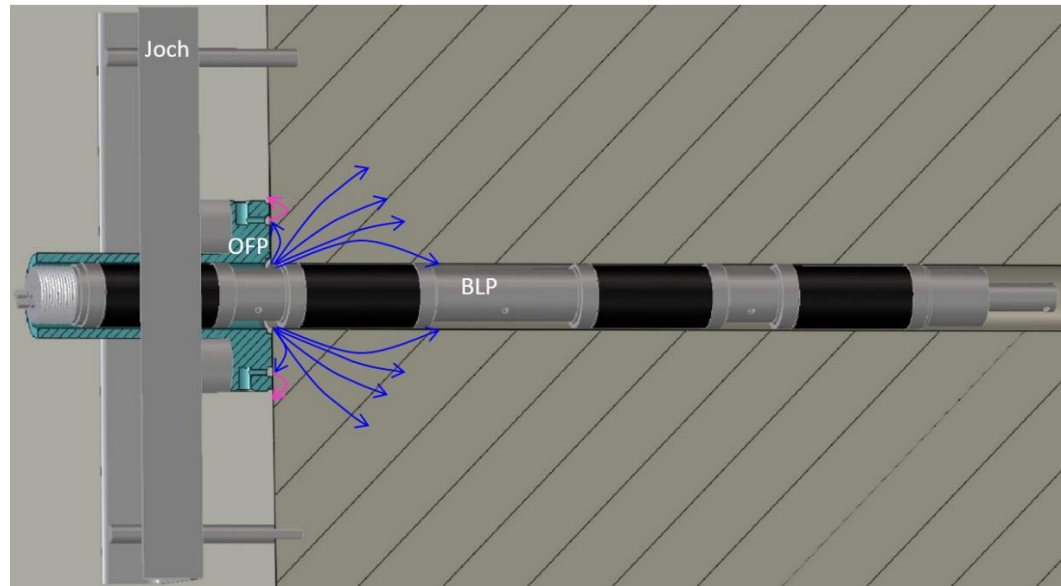
Testdauer:

Stunden bis Tage



Permeabilität:

$\geq 1E-22 \text{ m}^2$  /  $< 1E-22 \text{ m}^2$  höhere Messdauer



## **Anlage 2.1.6 Qualitätssicherung der in situ- Permeabilitätsmessungen**

### **Anlage 2.1.6.1 Qualitätsanforderungen Messbohrungen für in situ-Gaspermeabilitätstests**

Bei der Herstellung von Messbohrungen für in situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen sind folgende Anforderungen zu beachten:

- Bohren mit trockener Pressluft (z.B. mit Druckluft aus Gasdruckbehältern oder Lufttrocknung bei Bohrprozess),
- Kernbohren mit Hartmetallkronen, kurzer Kernmarsch, um größtmöglichen Kerngewinn zu sichern,
- gleichmäßiges Abteufen der Bohrung, ggf. Stabilisierung => Gewährleistung einer glatten Bohrunkskontur und eines geraden Bohrungsverlaufs,
- bei konturnahen Untersuchungen Sicherung des Bohrwerkzeugs gegen Ausschlagen des Bohrlochmundes,
- geologische Ansprache, Kerndokumentation und Kernkonservierung (z.B. Einschweißen in Schlauchfolie, Lagerung in Kernkisten),
- ggf. Kamerabefahrung des Bohrloches,
- ggf. markscheiderische Einmessung der Bohrung,
- ggf. Ermittlung des Flüssigkeitsgehaltes an Kernmaterial über Ofentrocknung (Trocknungsmethodik in Abhängigkeit vom Gebirge) für eine orientierende, qualitative Beurteilung eines möglichen Einflusses des Flüssigkeitsgehaltes auf die Permeabilität,
- Ausblasen des Bohrkleins aus der Bohrung mit trockner Pressluft über den gesamten Bohrungsverlauf,
- feuchtedichter Verschluss der Bohrung (z.B. mit entsprechendem Quetschpacker).

### **Anlage 2.1.6.2 In situ-Permeabilitätsuntersuchung**

Zur Sicherung der Qualität bei den in situ-Permeabilitätsuntersuchungen werden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- (1) Einsatz von qualifiziertem und erfahreinem Fachpersonal
- (2) Sicherstellung der Dichtheit der Vorort montierten Messausrüstung direkt vor dem Einbau in die Messbohrung:
  - Es werden Dichtheitstest der montierten Messausrüstung in einem dafür vorgesehenen Prüfröhr durchgeführt => Nachweis, dass es zu keinem durch Leckage bedingten Druckabfall (im Bereich der Messgenauigkeit des Sensors) kommt, Testdauer 8 h bis 20 h.
  - Bei einem Druckabfall während des Dichtheitstests erfolgt die Beaufschlagung der Messausrüstung mit einem Atemluft-R134a Gemisch => über die Detektion des Tracergases unter Verwendung eines Lecksuchgerätes (Empfindlichkeit von 3 g/a) wird die Leckage (z.B. Leitungsverbinder, Ventile, Einschraubverschraubungen) lokalisiert, behoben und die Dichtheit, wie oben beschrieben, in einem Wiederholungstest erneut geprüft.
  - Erst nach dem erfolgreichen Nachweis der Dichtheit erfolgt der Einbau der unveränderten Packergarnitur (im getesteten Montagezustand) in die Messbohrung.
  - Dichtheitstests erfolgen, soweit möglich, nach jeder Montage der Packerausrüstung, die mit einer Öffnung des druckseitigen Systems der Messausrüstung verbunden war sowie bei Besonderheiten der Druckganglinien über den Messverlauf.
- (3) Zur Sicherstellung der erforderlichen Versuchsbedingungen verwendete Medien:

- für Gasdruckbeaufschlagung: trockene Druckluft ( $N_2 + O_2$ ) für Permeabilitätsuntersuchung,
- für Lösungsdruckbeaufschlagung: Salzlösungen, Zusammensetzung je nach Versuchsaufgabe, werden durch den Auftraggeber gestellt und hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung und der dynamischen Viskosität für die Temperaturbedingungen am Messort parametrisiert,
- zum Setzen der Packerelemente kommt hochwertiges Hydrauliköl zum Einsatz,

(4) Zur Sicherstellung der Qualität beim eigentlichen Messvorgang werden folgende Maßnahmen umgesetzt:

- Erstellung eines Arbeitsprogramms zur Durchführung der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen pro Messbohrung unter Einbeziehung aller verfügbaren und für die Versuchsdurchführung relevanten Informationen (z.B. bergtechnische Situation, geologische Gegebenheiten, Kernansprache, Kamerabefahrung, Untersuchungen zum bergsmechanischen Spannungszustands) sowie Diskussion, Erläuterung und Planungseinbeziehung der ausführenden Messtechniker, Abstimmung des Arbeitsprogramms mit dem Auftraggeber,
- Für Flüssigkeitspermeabilitätstests: Bestimmung der Dichte und dynamischen Viskosität der Versuchslösung vor dem Messbeginn (Flüssigkeitsprobe) für die am Messort gegebenen Temperaturbedingungen,
- Auswahl und Einsatz einer der Messaufgabe – Konturabstand, Bohrlochsituation, Geologie – entsprechenden Packerausrüstung, die, soweit möglich, die Erfassung des Druckes in der Prüfkammer und zusätzlich in mindestens einer Kontrollkammer ermöglicht (Beurteilung der Auflockerungszone um die Bohrung),
- Protokollieren von Anfangs- und Endwert aller gemessenen Parameter, der versuchsbeschreibenden Informationen, Beobachtungen und Besonderheiten während der Versuchsdurchführung in einem standardisierten Messprotokoll,
- Einbau der Packergarnitur auf Messpunkttiefe des Arbeitsprogramms über händisches Messen (Gliedermaßstab) nur bis Einbautiefe von ca. 2 m; bei Einbautiefen > 2 m wird in der Regel ein Spezialgestänge / Messstrang mit einem integrierten Längenmaßstab verwendet; Messgenauigkeit  $\pm 0,02$  m,
- Durchführung einer Beobachtungsphase (Kontrolle des Öldruckes) nach dem hydraulischen Setzen der Packerelemente über einen Zeitraum von ca. 20 min bis 60 min, Beobachtung des Setzungsverhaltens des Packers an jedem Messpunkt, ggf. Umsetzen des Packers um Dichtsitz über den Versuchszeitraum zu gewährleisten,
- Zuschaltung eines hydraulischen Druckspeichers (z.B. Blasenspeicher) zur Gewährleistung eines stabilen Packersetzdruckes während der gesamten Versuchszeit,
- Anpassung des Testregimes an die Permeabilitätsverhältnisse Vorort; in der Regel werden die instationären in situ-Permeabilitätsuntersuchungen als Impulstests durchgeführt (je nach Standortverhältnissen können auch Tests mit konstantem Druck bzw. mit konstanter Rate durchgeführt werden),
- zur Beurteilung von Fremdeinflüssen wird der Luftdruck (Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  %), die Wettertemperatur (Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  K) und ggf. je nach Aufgabenstellung die Medientemperatur (Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  K) über den gesamten Versuchszeitraum erfasst,
- die Länge der Messleitungen der jeweiligen Messausrüstung wird gemessen und im Messprotokoll dokumentiert; Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  m,
- Einhaltung der Arbeits- und Betriebssicherheit, z.B.:
  - Sicherung der Packergarnitur über ein mechanisches Widerlager (z.B. Überwurfjoch),
  - ggf. Sperrung des Messstellenbereiches in Abstimmung mit Vorort-Verantwortlichen des Auftraggebers.

### **Anlage 2.1.6.3      Ausrüstung für in situ-Permeabilitätsuntersuchungen**

Bei der eingesetzten Versuchsausrüstung werden zur Qualitätssicherung folgende Maßnahmen durchgesetzt:

- Einsatz von kalibrierter Sensorik mit Messgenauigkeiten von  $\pm 0,1$  % bis  $\pm 0,2$  %,
- Datenlogger und Sensoren sind werksseitig kalibriert; ggf. erfolgt Nach- oder Neukalibrierung durch IBeWa (z.T. in Zusammenarbeit mit Partnern) und/oder den Hersteller (z.B. Kalibrierung der Drucksensoren auf Druckwaage),
- Volumenbestimmung der Test- und Kontrollintervalle jeder Packergarnitur unter Laborbedingungen (Gasentspannungstests im Prüfrohr mit entsprechend abgestimmten Drucksensoren, Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  %) oder aus der Geometrie der Versuchsausrüstung,
- Nachweisführung der Packerdichtheit und Belastungsstabilität für jede Packergarnitur unter Laborbedingungen (Dichtheitstests im Prüfrohr mit entsprechend abgestimmten Drucksensoren, Messgenauigkeit  $\pm 0,1$  %),
- Dichtheitstests der Messausrüstung nach längerem Messeinsatz sowie Sichtkontrolle, Wartung und Austausch von Verschleißteilen,
- Verwendung von korrosionsbeständigen Materialien (u.a. Edelstahl 1.4571, Titan, Spezialaluminium, Superalloys, Spezialdichtmittel, hochfeste Kunststoffe) für die Messausrüstung,
- sondergefertigte Datenlogger sind mit Spezialnetzteil für spannungsschwankungsfreie Stromversorgung sowie hochleistungsfähigen Batterien zur mehrwöchigen Pufferung ausgestattet,
- Einhaltung der Arbeits- und Betriebssicherheit der Messausrüstung, z.B.:
  - regelmäßige elektrische Überprüfung der nicht ortsfesten, elektrischen Ausrüstungsgegenstände nach den gesetzlichen Vorgaben (BetrSichV BGV A3),
  - Überwachung und regelmäßige Abnahmen des TÜV für verwendete Druckbehälter nach den gesetzlichen Vorgaben (BetrSichV BGV A3, Anl. §12.1).

### **Anlage 2.1.6.4      Auswertung der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen**

Für die modellgestützte Auswertung der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen kommen folgende Maßnahmen der Qualitätssicherung zur Anwendung:

- Einsatz von qualifiziertem und erfahrenem Fachpersonal,
- Pre-processing der Versuchs- und Messdaten: Zusammenstellung der Parameter zur Versuchskonfiguration (Volumina, Längen, Versuchsverlauf), Aufbereitung der Messdaten für die modellgestützte Auswertung, Plausibilitätsprüfung und Beurteilung der Güte der Messung unter Berücksichtigung der vorliegenden Standortinformationen ggf. Messwiederholung,
- Berücksichtigung aller im Vorfeld gewonnenen Parameter (z.B. Laborpermeabilitäten und -porositäten von Baustoffen) und Beobachtungen bei der Versuchsdurchführung,
- Verwendung von getesteter und verifizierter Software für die numerische, modellgestützte Auswertung der Permeabilitätsuntersuchungen (Verifizierung über Vergleich mit analytischen Lösungen),
- datenbankgestützte Sicherung, Auswertung und Darstellung der Versuchsinformationen und –parameter sowie der ermittelten Permeabilitäten und Dokumentation in Berichtsform,
- zusammenfassende Darstellung der Versuche, Auswertungen und Interpretationen in einem Bericht.

### **Anlage 2.1.7 Fehlerbetrachtung für die Bestimmung von Permeabilitäten**

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

- Messfehler, die durch die Genauigkeit der eingesetzten Sensoren, Messschieber, Waagen und der Messgenauigkeit bei der Bestimmung der Eigenschaften der verwendeten Ausrüstung (z. B. Volumen) sowie der Fluide (z. B. dynamische Viskosität) entstehen (entspricht z. B. der für Messgeräte angegebenen Messgenauigkeit handelsüblicher Geräte – Messgeräteabweichung),
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei „gleichen“ Bedingungen.
- Man spricht hierbei von zufälligen Messabweichungen, die sich bei Wiederholungen durch die Streuung quantifizieren lassen. Die Berechnung setzt eine bestimmte Anzahl von Wiederholungsmessungen voraus. Deren Anzahl richtet sich nach vorgegebenen Genauigkeitsforderungen [27] bzw. nach Erfahrungswerten. In verschiedenen Veröffentlichungen zu Fehlerbetrachtungen bei Messungen wird die Zahl der Wiederholungen von mindestens 3 bis i. a. 10 für eine gesicherte statistische Aussage angegeben.

Wie in [28] beschrieben beeinflussen beide Fehlerquellen die Unsicherheit in den Messungen. Im Ergebnis der Permeabilitäts- bzw. Lösungsgehaltsbestimmung führt die Fehlerbetrachtung zu einer Angabe eines Bereiches, innerhalb dessen die Permeabilität mit einer vorgegebenen statistischen Sicherheit (i. a. 95 % oder 99 %) liegt.

Für die BLP-Messungen in diesem Bericht ist für die Summe der Messfehler von einer Größenordnung von < 5 % der angegebenen Permeabilität auszugehen.

Die Angabe eines Fehlers, der die Reproduzierbarkeit der Messungen berücksichtigt, hätte eine oben beschriebene Anzahl von Messwiederholungen erforderlich gemacht, welche nicht vorgesehen war.

## **Anlage 2.2 Laboruntersuchungen - Methodik**

### **Anlage 2.2.1 Lösungsgehalt**

Der Lösungsgehalt von Baustoffen ist für die Berechnung der Trockenmasse und Trockendichte sowie für die Beurteilung der Porenraumsättigung wesentlich. Die der Lösungsgehaltsbestimmung zugrundeliegende Trocknung des Materials ist ein Teil der Probenaufbereitung für die Ermittlung weiterer Materialparameter (z.B. Reindichte und Porosität). Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [29] sowie bei den aktuellen Untersuchungen kamen unterschiedliche Trocknungsmethoden zum Einsatz.

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

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

Der Lösungsgehalt berechnet sich aus:

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

$w_L$  Lösungsgehalt [-]

$m_L$  Masse Lösung [g]

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

Die Masse der Lösung im Porenraum berechnet sich aus:

$$m_L = \frac{m_W \cdot \rho_L}{\rho_L - C_C}$$

$m_W$  Masse Wasser [g]

$C_C$  Gesamtkonzentration gelöster Komponenten [g/L]

$\rho_L$  Dichte Lösung [g/L]

Die korrigierte Feststofftrockenmasse ergibt sich aus:

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

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

$m_{F,f}$  Masse Feststoff, feucht [g]

$m_{F,tr}$  Masse Feststoff, trocken [g]

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

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

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

- die thermische Zersetzung der Bindemittelphasen (Sorelphasen) im feinpulverisierten Zustand bereits ab 50 °C bis 60 °C im offenen System bei entsprechend niedriger Luftfeuchte einsetzt,

- aus der Porenlösung (falls im Baustoff enthalten) je nach Zusammensetzung und Konzentration Salze (Bischofit, Carnallit, NaCl...) auskristallisieren,
- bereits bei der Präparation entsprechender Pulverproben enthaltene Porenlösung einzutrocknen beginnt oder auch Feuchtigkeit aus der Luft aufgenommen wird - je nachdem, welche Ionenkonzentrationen und Wasseraktivität die Porenlösung aufweist,
- eine Trocknung kompakter (nicht pulverisierter) Proben in endlicher Zeit und aufgrund des z.T. stattfindenden Porenverschlusses nicht möglich ist.

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

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

- < 1 Ma. %: 0,001 Ma. %/24 h für 100 g – ±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 getrockneten Proben wurden nach dem Erreichen der Massekonstanz in verschlossene Behältnisse überführt.

### Anlage 2.2.2 Dichtebestimmung – Feuchtdichte, Trockendichte und Reindichte

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

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

Die Feuchtmasse der Probenkörper wurde über Wägung mit einer Kern-Waage PLS mit einer Ablesbarkeit von ±0,001 g ermittelt.

Die Trockendichte wurde auf der Basis der Feuchtdichte und der ermittelten Lösungsgehalte berechnet. Der für die Trockendichte angegebene Fehler wurde auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung bei zufälligen Fehlern für die eingehenden Parameter nach Gleichung (1) ermittelt.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \cdot \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \cdot \varepsilon_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k} \cdot \varepsilon_k\right)^2} \quad (1)$$

y f(x<sub>1</sub> ... x<sub>k</sub>)

ε Fehler der x-Werte

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

### Anlage 2.2.3 Totale Porosität (aus den Dichten)

Auf der Grundlage der Rein- und Trockendichte kann die **totale Porosität** nach der Gleichung (2) berechnet werden.

$$n_t = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (2)$$

$n_t$	totale Porosität	[-]
$\rho_d$	Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Reindichte	[g/cm <sup>3</sup> ]

Für die berechnete totale Porosität wurde mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [27], unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der Fehler ermittelt.

### Anlage 2.2.4 Porenraumsättigung

Auf der Basis der aus der Dichte ermittelten Porosität (Anlage 2.2.3) und des Lösungsgehaltes (Anlage 2.2.1) wurde die Porenraumsättigung mit Flüssigkeit nach Gleichung (3) ermittelt:

$$S = \frac{w_L \cdot \rho_d}{\rho_L \cdot n_t} \quad (3)$$

S	Sättigung des Porenraumes	[-]
$n_t$	totale Porosität	[-]
$\rho_d$	Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_L$	Dichte der Porenraumflüssigkeit	[g/cm <sup>3</sup> ]
$w_L$	Lösungsgehalt	[-]

Für die Sättigung wurde der Fehler auf der Basis der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung [27] berechnet.

### Anlage 2.2.5 Quecksilberporosimetrie (MIP)

Beim Quecksilberinjektionsversuch nach DIN 66133 [30] wird im Ergebnis der Injektion von Quecksilber mit steigendem Injektionsdruck die Porosität einer Probe aus dem druckabhängig injizierten Quecksilbervolumen ermittelt. Aus der Kenntnis der Grenzflächenspannung und des Benetzungswinkels von Quecksilber für die angewendeten Druck- und Temperaturbedingungen kann nach der Gleichung (4) aus den Versuchsdaten eine Vorstellung über die Porengrößenverteilung abgeleitet werden.

$$p_{cap} = \frac{2 \cdot \gamma_{Hg-Luft} \cdot \cos \delta_{Hg-Luft}}{r} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

Für die Quecksilberporosimetrieversuche ist von einem Einfluss der Injektionsrate, der Kompressibilität des Gesamtsystems aus Feststoff, Porengefüge und Quecksilber und der Porenform (zylindrisch oder davon abweichend) auszugehen. Die Auswertung geht von zylindrischen Poren aus. Die Proben wurden mit dem Porosimeter AutoPore V9600 1.03 der Firma Micromeritics bei einem maximalen möglichen Druck von ca. 420 MPa und einem messbaren Porendurchmesser von ca. 2 nm bis ca. 700 µm, Micromeritics GmbH untersucht. Für alle Proben wurde auch die Reindichte ermittelt, siehe Anlage 2.2.2.

Die Porosität bzw. die Porengrößenverteilung von porösen Materialien weist einen material-spezifischen Verlauf auf. Anhand dieses Verlaufes können Makro-, Meso- und Mikroporen differenziert werden. Wie die Beispiele in Tabelle 21 zeigen, werden die Porengrößenbereiche für Baustoffe in Abhängigkeit von der bearbeiteten Themenstellung unterschiedlich definiert. Vor diesem Hintergrund wird die Klassifizierung der Porengrößen probenbezogen in Auswertung der Anstiege der Regressionsgeraden an Teilabschnitten der Porengrößenverteilung entsprechend der beispielhaften Darstellung in Abbildung 124 angewendet. Die Grenzen zwischen den Porenklassen werden durch die Schnittpunkte der Regressionsgeraden definiert Abbildung 124.

Tabelle 21: Beispiele von Porengrößendefinitionen für Baustoffe

<b>Mikroporen</b>	<b>Mesoporen</b>	<b>Makroporen</b>	<b>Quelle</b>
<b>Gelporen</b>	<b>Kapillarporen</b>		
<b>[nm]</b>	<b>[nm]</b>		
< 30	> 30		[31]
< 10	> 10		
mittlerer Durchmesser 1,8	-		
0,01 bis 100	100 bis 10 <sup>5</sup>	ab 10 <sup>5</sup>	[32]
0,5 bis 30	30 bis 10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> bis 10 <sup>6</sup>	[33]
0,5 bis 50	50 bis 500		[34]
1 bis 10	10 bis 10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup> bis 10 <sup>6</sup>	

Mikroporen	Mesoporen	Makroporen	Quelle
Gelporen	Kapillarporen		
[nm]	[nm]		
< 5	5 bis $5 \cdot 10^3$		
1 bis 10	10 bis $10^5$		[35]

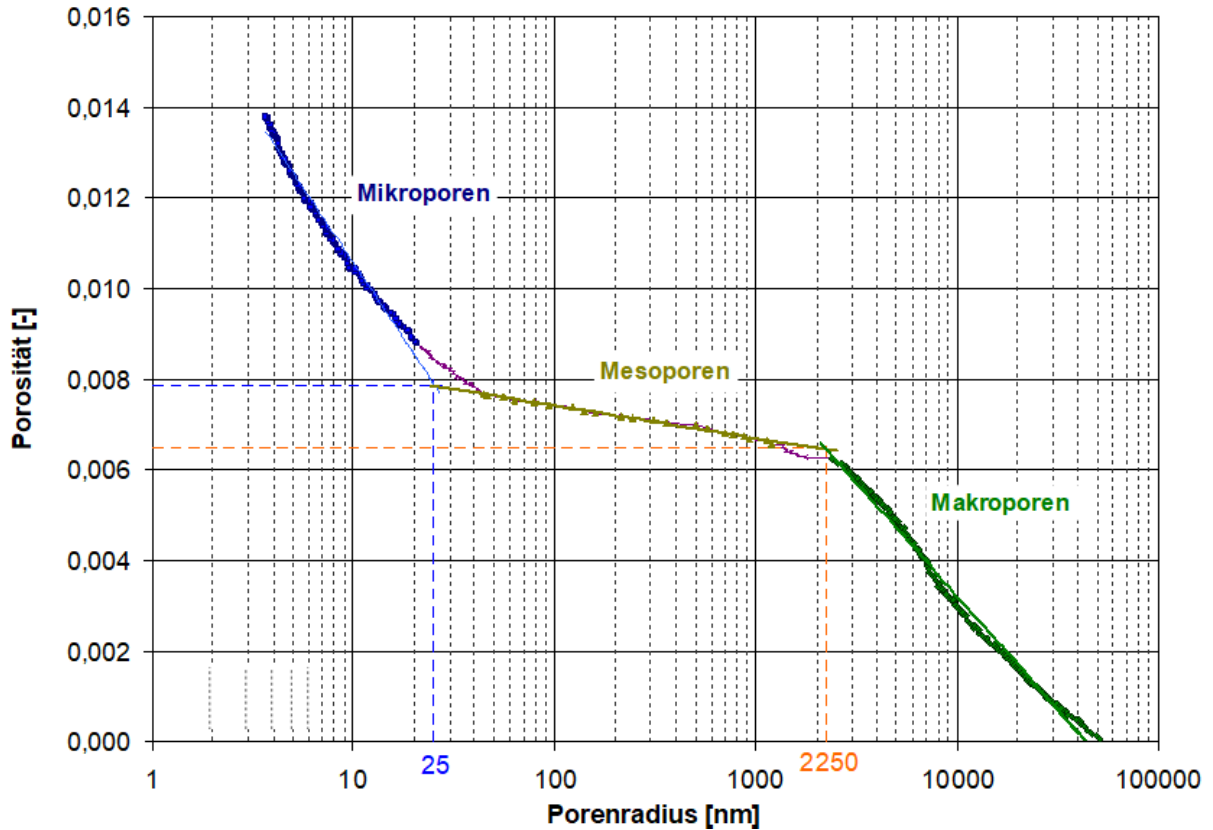


Abbildung 124: Vorgehensweise für die Ermittlung der Mikro-, Meso- und Makroporenklassen [36]

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

### Anlage 2.2.6 Gaspermeabilität an Kernproben im Labor

Für die Ermittlung der Permeabilität wurde die Methode des instationären Zweikammerversuches angewendet. Abbildung 125 gibt eine schematische Übersicht des dafür angewendeten Versuchsaufbaus. Abbildung 125 zeigt die Versuchsanordnung für die Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Permeabilität. Das Konzept der Permeabilitätsmessung beruht auf der modellgestützten Auswertung des zeitabhängigen Strömungsprozesses durch einen zylindrischen Prüfkörper. Der Strömungsprozess wird durch einen Druckimpuls in der Eingangskammer ausgelöst. Die über den Versuchszeitraum in der Eingangs- und Ausgangskammer gemessenen Druckganglinien beschreiben den Strömungsprozess und bilden die wesentliche Grundlage für die modellgestützte Identifikation der Permeabilität aus den Versuchsdaten.

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

- Probenaufbau und –geometrie,
- Versuchskonfiguration – Volumina 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 126 möglich.

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

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

Die Ermittlung der Permeabilität erfolgt über die Anpassung der für die Ein- und Ausgangskammer berechneten an die gemessenen Druckverläufe. Die Anpassung erfolgt über die Variation der Parameter Permeabilität und Porosität. Wurde in begleitenden Untersuchungen die Porosität des Materials ermittelt, wird diese als Startwert der modellgestützten Parameteridentifikation verwendet. Liegen keine Ergebnisse für die Porosität vor, werden Erfahrungswerte für die untersuchten Materialien als Startwerte verwendet. Die Zielfunktion der Anpassung bzw. der Parameteridentifikation ist die Minimierung der Fehlerquadratsumme für die gemessenen und berechneten Druckverläufe. In Abbildung 128 ist beispielhaft ein Anpassungsergebnis dargestellt.

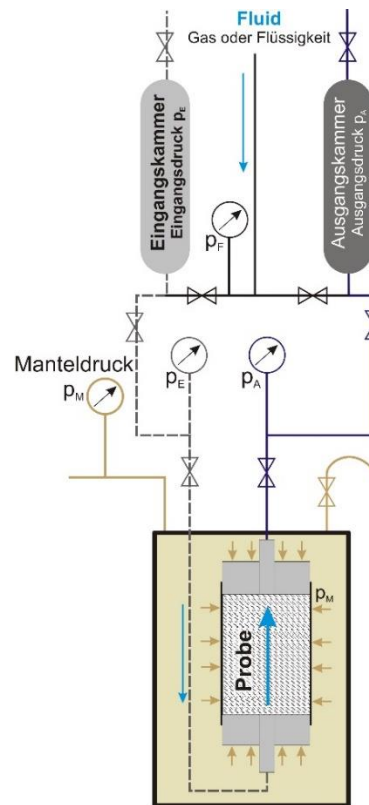


Abbildung 125: Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus

Erläuterung:  $p_M$  – Manteldruck;  $p_E$  – Eingangsdruck;  $p_A$  – Ausgangsdruck;  $p_F$  – Fluiddruck

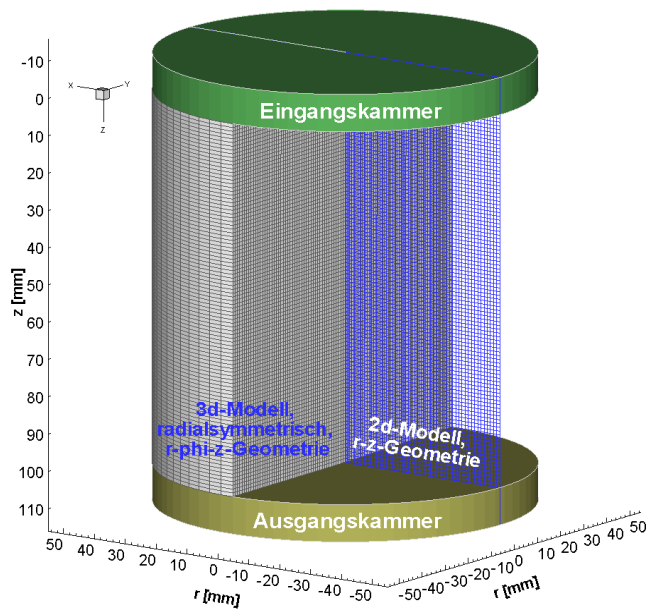


Abbildung 126: Schematische Darstellung des numerischen Modells



Abbildung 127: Foto Zweikammerversuchsapparatur für Gas

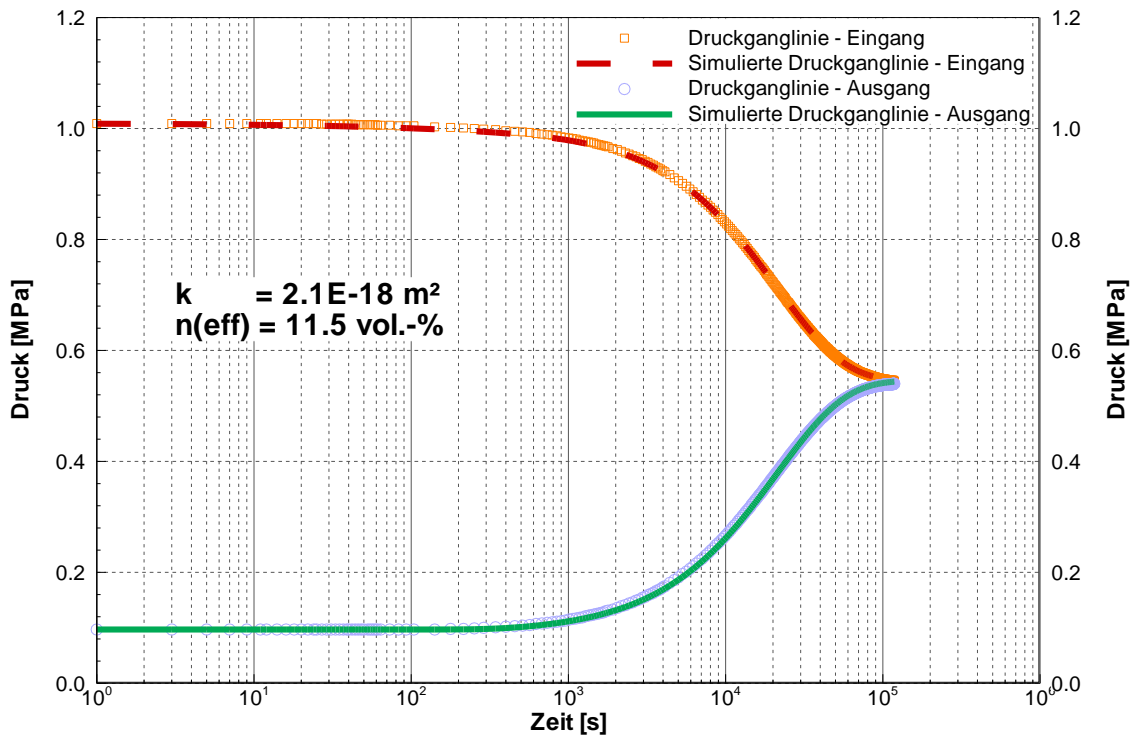


Abbildung 128: Beispiel für das Ergebnis einer modellgestützten Anpassung der berechneten an die gemessenen Druckganglinien (kein Bezug zu projektbezogenen Auswertungen)

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

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

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

#### Gaspermeabilität $k_G$

- Einbau des Prüfkörpers im Thermoschrank und Vorgabe der Temperatur entsprechend Messprogramm und Aufbringen des vorgegebenen Manteldrucks über einen Zeitraum von 24 h,
- Verwendung kalibrierter Drucksensoren für die Messung des Eingangsdrucks und Ausgangsdrucks mit einer Messunsicherheit von  $\pm 0,1$  % EW,
- Durchführung eines Dichtheitstests der Messanlage für jeden Versuch während der 24-stündigen Einspanndauer des Prüfkörpers,
- Versuchsdurchführung nach erfolgreichem Dichtheitstest, Ermittlung des Vordrucks des Messgases für definierte Druckaufgabe,
- Überwachung der Temperatur und des Luftdruckes im Messschrank und Labor, 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.  $N_2$ <sup>15</sup>).

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

Neben dem Einfluss der Porenraumsättigung mit Flüssigkeit wird die Permeabilität der untersuchten Materialien und Gesteine bestimmt vom Einspannungszustand und der Einspannungsdauer der Prüfkörper sowie dem angewendeten Fluidruck. In Abhängigkeit vom Verformungsverhalten des Materials unter dem Einfluss des Manteldrucks 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 Rissbildung<sup>16</sup> 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

---

<sup>15</sup> bei Vernachlässigung der Trocknung und ggf. einsetzender Wechselwirkungen zwischen Gas- und Porenlösung

<sup>16</sup> Beim Ausbau der Prüfkörper konnte keine Rissbildung visuell beobachtet werden.

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. Auf Grund der Versuchskonfiguration ergibt sich für den Strömungsprozess bis zur Einstellung des Druckausgleiches zwischen Eingangs- und Ausgangskammer ein strömendes Gasvolumen in der Größenordnung von ca. 65 % des komprimierten Volumens.

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

### **Anlage 2.2.7 Lösungspemeabilität $k_L$**

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

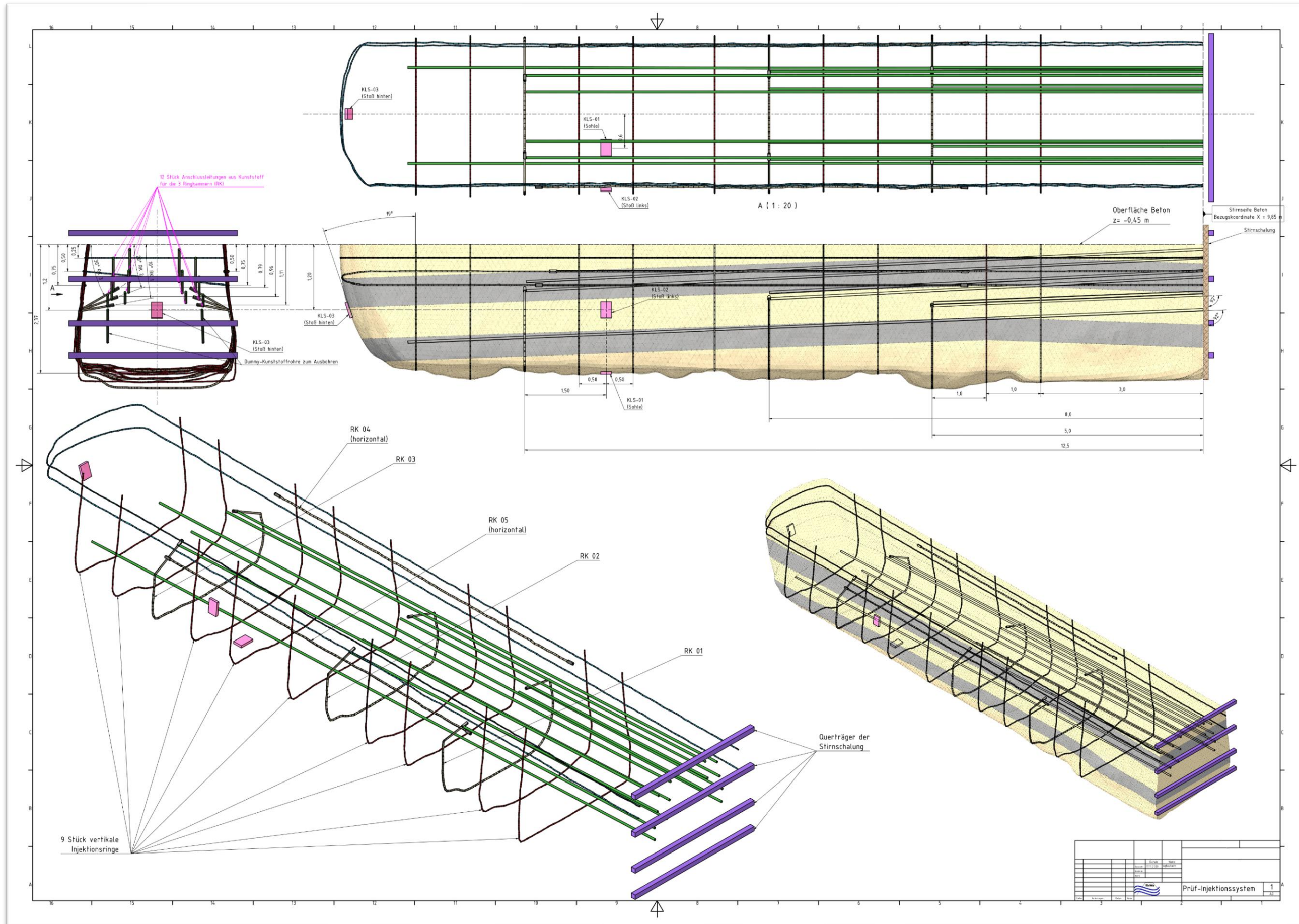
- luftfreies Befüllen der Anlage mit Messlösung; das Befüllen/Entlüften der Behälter erfolgt mittels Vakuumpumpe,
- Wiederholung der Messung bis zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse,
- Bestimmung der Kompressibilität des Versuchsaufbaus aus Versuchslösung und Prüfkörper nach der Messung.

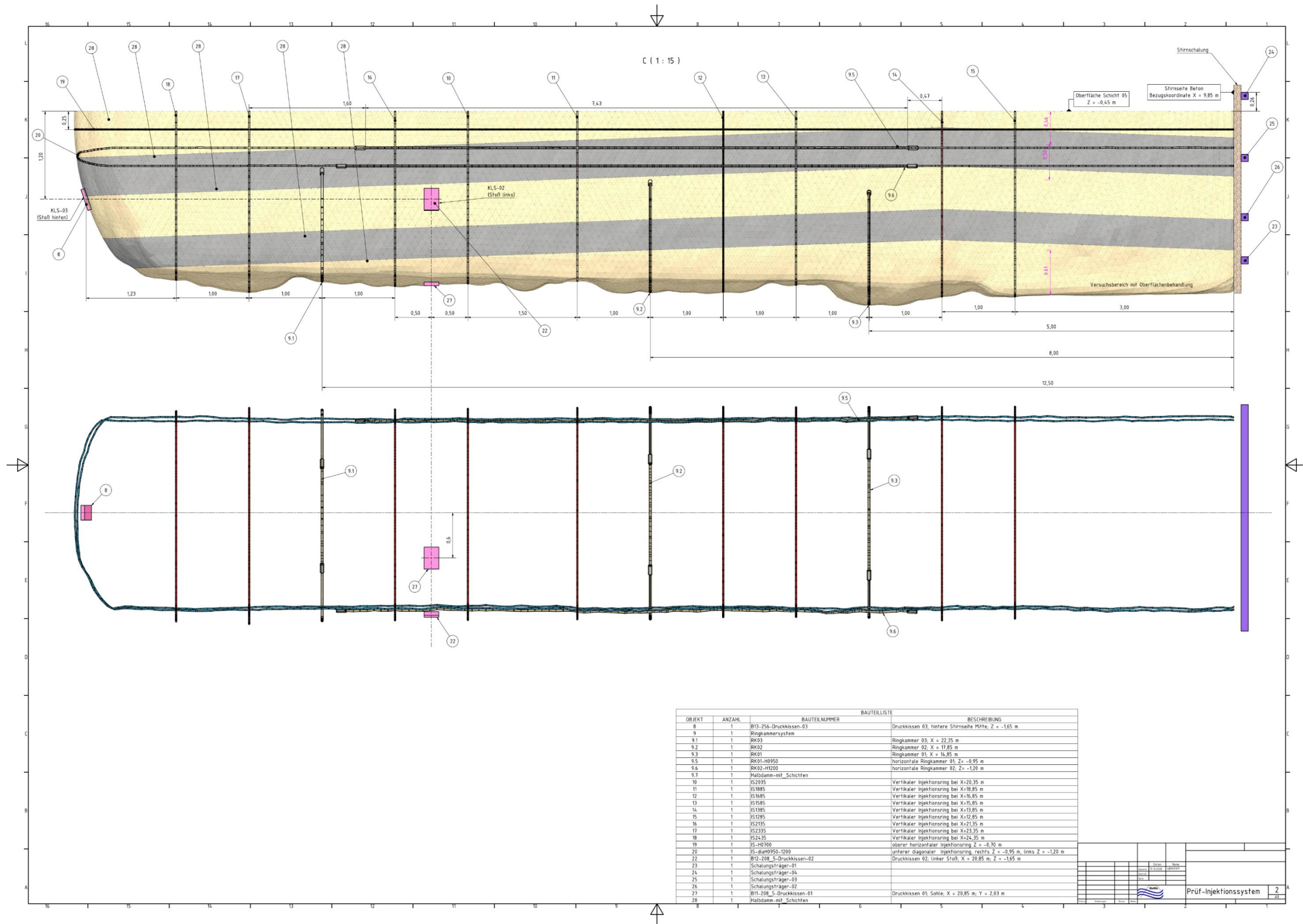
Aus den vorliegenden Erfahrungen für die Durchströmung von hydraulisch abbindendem Material mit mineralisierter Lösung ist davon auszugehen, dass Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem hydraulisch abbindenden Material (u.a. Lösungs- und Kristallisationsprozesse mit Volumenzunahme → Kristallisationsdruck,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

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

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

Anlage 3 Pläne - Installation Messsystem und Injektionsleitungen







# PREDIMAX® 19 INJEKTIONSSCHLAUCH

Injektionsschlauch, mehrfach- und zementverpressbar

## PRODUKTBESCHREIBUNG

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

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



## ANWENDUNG UND ANWENDUNGSGBIETE

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

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

## PRODUKTMERKMALE UND VORTEILE

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

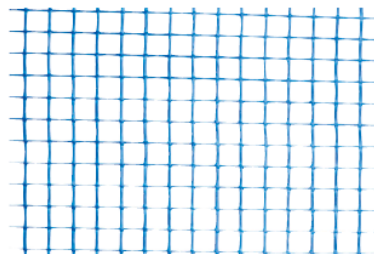


## Außenputzgewebe

### Zur Flächenarmierung im Außenputz

#### Verschiebefest

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



#### Art.-Nr. 0519 530 020

VE: 100

#### Leistungsnachweis

ETAG-geprüft

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

Anlage 6 Baustoffkomponenten modifizierte A1-Rezeptur

Anlage 6.1 Herstellerangaben zum MgO

**Chemische Analyse:** Material gemahlen

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

**Zitronensäureaktivität:** Material ungemahlen

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

**physikalische Analyse:** Material ungemahlen

Bindezeit in Anlehnung an DIN EN 14016:

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

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

13. 6. 2021

R. Werthmann

## Anlage 6.2 Qualitätssicherung Annahme MgO



### Versatz- und Baustoffprüflabor, Abt. EVT

K-UTEC AG Salt Technologies  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen

Telefon: 03632 610-160  
Telefax: 03632 610-105  
E-Mail: Christian.Kursave@k-utec.de

### Prüfbericht 351-0721E bis 358-0721E

Auftraggeber: TU Clausthal, Herr Bauermeister  
Probebezeichnung: MgO Styromag (Probenahme bei der GTS v.15.07.21)  
EVT-Probe-Nr.: 351-0721E bis 358-0721E (Pal. 1 bis 8)  
Probenanzahl: 8  
Probeneingang: 15.07.2021

#### Prüfergebnisse:

Sollwerte bei pH 7,0 = 150s – 500s

EVT Nr.	Parameter	Prüfverfahren	Dimension	Prüfergebnis
351-0721E Pal. 1	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	185 ± 4 228 ± 4
352-0721E Pal. 2	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	191 ± 2 233 ± 3
353-0721E Pal. 3	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	199 ± 1 241 ± 1
354-0721E Pal. 4	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	196 ± 1 240 ± 1
355-0721E Pal. 5	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	194 ± 4 236 ± 5
356-0721E Pal. 6	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	191 ± 3 233 ± 3
357-0721E Pal. 7	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	174 ± 5 214 ± 4
358-0721E Pal. 8	Aktivität bei pH= 7,0 Aktivität bei pH= 8,6	Internes Verfahren 1)	s	194 ± 1 238 ± 2

<sup>1)</sup> Zitronensäuremethode, Starttemp. 30,0°C, Magnetrührer 600 U/min

Sondershausen, den 19.07.2021

  
C. Kursave  
Leiter EVT-Labor

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchte Probe. Auszugsweise Veröffentlichung dieses Prüfberichtes nur mit schriftlicher Genehmigung der K-UTEC AG Salt Technologies.

Dateiname: 351-0721E bis 358-0721E Prüfbericht MgO.docx  
Änderungsdatum: 02.04.2013

Seite 1 von 1  
Geltungsbereich: EVT

## Chemisch-physikalische Analytik

K-UTEC AG Salt Technologies  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen

Tel.: +49 3632 610-150  
Fax.: +49 3632 610-105  
E-Mail: cpa@k-utec.de

### Prüfbericht: 21-1220-1

Auftrag: Untersuchung von salzhaltigem Abfall  
Auftraggeber: K-UTEC, Abt. EVT,  
Herr Dipl.-Chem. Lack  
Herr Kursave

Probeneingang: 21.07.2021  
Probennahme: Auftraggeber  
Entnahmeort:  
Entnahmedatum:  
Probenanzahl: 1  
Prüfzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021

Proben-Nr.	Probentext
21-1220/01	MgO, Palette 2 (EVT-Probe Nr.: 352-0721E)

Dieser Prüfbericht darf ohne Genehmigung der K-UTEC AG nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände. (DIN EN ISO/IEC 17025)

Prüfbericht-Nr.: 21-1220-1  
Betreff: Untersuchung von salzhaltigem Abfall

Seite 2 von 2

Probenart: Salz Probenbez.: 352-0721E  
Proben-Nr.: 21-1220/01  
Messzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021  
MgO, Palette 2 (EVT-Probe Nr.: 352-0721E)

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
Glühverlust bei 550°C	DIN EN 12879-S3a: 2001-02	n.n.	% TS	0,0010
Magnesium	DIN 38 406-E 3-3; 2002-03	50,8	% TS	0,01
Calcium	DIN EN ISO 11885-E22:09-09	30300	mg/kg TS	10

Sondershausen, den 23.07.2021



Dr. Braun  
Laborleiter

\* nicht akkreditierter Parameter  
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze  
Dim. Dimension  
# bezogen auf Trockensubstanz

## Chemisch-physikalische Analytik

K-UTEC AG Salt Technologies  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen

Tel.: +49 3632 610-150  
Fax.: +49 3632 610-105  
E-Mail: cpa@k-utec.de

### Prüfbericht: 21-1221-1

Auftrag: Untersuchung von salzhaltigem Abfall  
Auftraggeber: K-UTEC, Abt. EVT,  
Herr Dipl.-Chem. Lack  
Herrn Kursave

Probeneingang: 21.07.2021  
Probennahme: Auftraggeber  
Entnahmeort:  
Entnahmedatum:  
Probenanzahl: 1  
Prüfzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021

Proben-Nr.	Probentext
21-1221/01	MgO, Palette 4 (EVT-Probe Nr.: 354-0721E)

Dieser Prüfbericht darf ohne Genehmigung der K-UTEC AG nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände. (DIN EN ISO/IEC 17025)

Prüfbericht-Nr.: 21-1221-1  
Betreff: Untersuchung von salzhaltigem Abfall

Seite 2 von 2

Probenart: Salz Probenbez.: 354-0721E  
Proben-Nr.: 21-1221/01  
Messzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021  
MgO, Palette 4 (EVT-Probe Nr.: 354-0721E)

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
Glühverlust bei 550°C	DIN EN 12879-S3a: 2001-02	n.n.	% TS	0,0010
Magnesium	DIN 38 406-E 3-3: 2002-03	51,0	% TS	0,01
Calcium	DIN EN ISO 11885-E22:09-09	31800	mg/kg TS	10

Sondershausen, den 23.07.2021

Dr. Braun  
Laborleiter

\* nicht akkreditierter Parameter  
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze  
Dim. Dimension  
# bezogen auf Trockensubstanz

## Chemisch-physikalische Analytik

K-UTEC AG Salt Technologies  
Am Petersenschacht 7  
99706 Sondershausen

Tel.: +49 3632 610-150  
Fax.: +49 3632 610-105  
E-Mail: cpa@k-utec.de

### Prüfbericht: 21-1222-1

Auftrag: Untersuchung von salzhaltigem Abfall  
Auftraggeber: K-UTEC, Abt. EVT,  
Herr Dipl.-Chem. Lack  
Herrn Kursave

Probeneingang: 21.07.2021  
Probenahme: Auftraggeber  
Entnahmeort:  
Entnahmedatum:  
Probenanzahl: 1  
Prüfzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021

Proben-Nr.	Probentext
21-1222/01	MgO, Palette 6 (EVT-Probe Nr.: 356-0721E)

Dieser Prüfbericht darf ohne Genehmigung der K-UTEC AG nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Prüfbericht spezifizierten Prüfgegenstände. (DIN EN ISO/IEC 17025)

Prüfbericht-Nr.: 21-1222-1  
Betreff: Untersuchung von salzhaltigem Abfall

Seite 2 von 2

Probenart: Salz Probenbez.: 356-0721E  
Proben-Nr.: 21-1222/01  
Messzeitraum: 23.07.2021 bis 23.07.2021  
MgO, Palette 6 (EVT-Probe Nr.: 356-0721E)

Parameter	Verfahren	Messwert	Dim.	Bestim.- grenze
Glühverlust bei 550°C	DIN EN 12879-S3α: 2001-02	n.n.	% TS	0,0010
Magnesium	DIN 38 406-E 3-3: 2002-03	50,4	% TS	0,01
Calcium	DIN EN ISO 11885-E22:09-09	31100	mg/kg TS	10

Sondershausen, den 23.07.2021



Dr. Braun  
Laborleiter

\* nicht akkreditierter Parameter  
n.n. Messergebnis ist unterhalb Bestimmungsgrenze  
Dim. Dimension  
# bezogen auf Trockensubstanz

### Anlage 6.3 Kumulative Korngrößenverteilung des verwendeten Salzgruses

Tabelle 22: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 8

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

Tabelle 23: Korngrößenverteilung der Salzkörner von Band 6

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

Tabelle 24: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (1)

Verteilung des Massengewichtes (%)														
	4,5 µm	5,5 µm	6,5 µm	7,5 µm	9 µm	11 µm	13 µm	15,5 µm	18,5 µm	21,5 µm	25 µm	30 µm	37,5 µm	45 µm
F.S.2.1	1,22	1,67	2,14	2,63	3,41	4,5	5,65	7,14	8,96	10,8	12,93	15,89	20,09	23,97
F.S.3.1	1,37	1,91	2,47	3,06	4,01	5,35	6,78	8,63	10,92	13,23	15,9	19,59	24,73	29,34
F.S.4.1	1,89	2,59	3,34	4,11	5,34	7,08	8,89	11,23	14,07	16,9	20,12	24,49	30,39	35,5
F.S.5.1	2,67	3,53	4,43	5,35	6,79	8,77	10,8	13,37	16,46	19,5	22,94	27,56	33,76	39,09
F.S.6.1	1,48	1,87	2,27	2,67	3,28	4,11	4,95	6,01	7,29	8,57	10,06	12,16	15,25	18,26

Tabelle 25: Kumulative Korngrößenverteilung des Feinsalzes (2)

Verteilung des Massengewichtes (%)														
	52,5 µm	62,5 µm	75 µm	90 µm	105 µm	125 µm	150 µm	180 µm	215 µm	255 µm	305 µm	365 µm	435 µm	
F.S.2.1	27,57	32,02	37,18	42,92	48,28	54,93	62,7	71,51	80,82	89,32	95,98	99,69	100	
F.S.3.1	33,46	38,35	43,75	49,49	54,63	60,83	67,9	75,79	83,97	91,27	96,78	99,75	100	
F.S.4.1	39,9	44,95	50,29	55,75	60,5	66,06	72,28	79,13	86,19	92,44	97,15	99,76	100	
F.S.5.1	43,66	48,81	54,18	59,59	64,21	69,49	75,17	81,26	87,43	92,88	97,14	99,71	100	
F.S.6.1	21,23	25,19	30,12	35,92	41,5	48,65	57,27	67,24	77,91	87,82	95,63	99,74	100	

## Anlage 6.4 Datenblatt Anmachlösung - Ses-30 %-Lösung der DEUSA

Stand: 23.07.2021	<b>Spezifikation</b>	
-------------------	----------------------	---

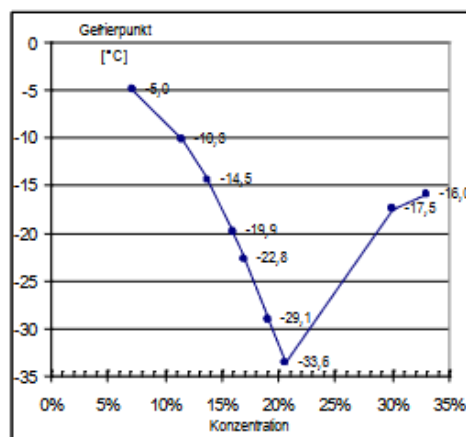
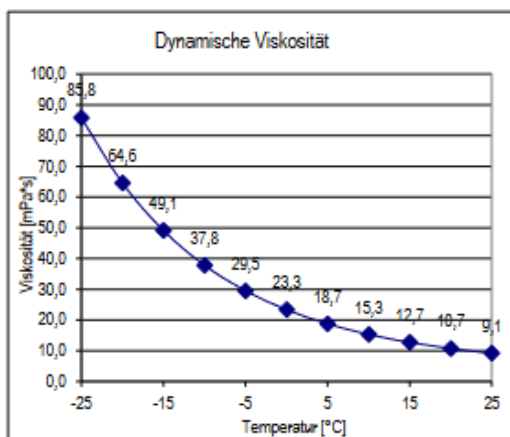
Allgemeine Produktinformationen	
Artikelbezeichnung	Ses 30 %
Handelsname	Magnesiumchloridlösung
Formel	MgCl <sub>2</sub>

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

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

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

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





TU Clausthal

IFAD Rohstoffaufbereitung und Recycling

Analytisches Labor

Erzstraße 20

38678 Clausthal-Zellerfeld

## Analysenschein

IFAD/Deponietechnik

Herr Julius Bauermeister

Probe: Magnesiumchloridlösung

Probenvorbereitung, -messung:

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

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

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

Bearbeiter: Petra Sommer

Clausthal, den 12.10.2020

Tel.: 05323/72-3794

# Produktdatenblatt. Micro A

**Informationen**

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

**Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an:**

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

Ein Unternehmen der REMONDIS-Gruppe

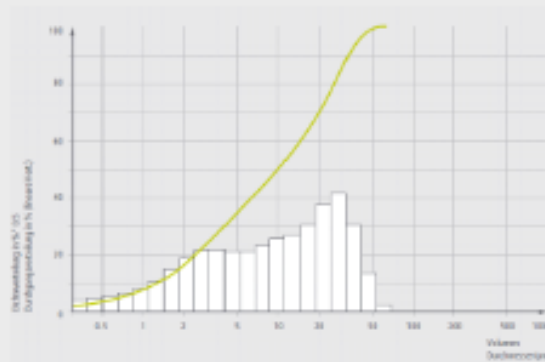
**Produktbeschreibung**

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

**> Kornaufbau (Alpine Luftstrahlsiebung)**

Durchschnittswert D50 (Lasergranulometer CILAS 920) ca. 10 µm

Beispiel für den typischen Kornaufbau mit Lasergranulometer CILAS 920



**> Chemische Zusammensetzung**

CaSO <sub>4</sub>	> 90,0 %
Kristallwasser	< 1,0 %
Feuchte	< 0,2 %

**> Physikalische Werte**

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

**> Logistik und Sicherheitshinweise**

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

## Anlage 7 Qualitätssicherung des modifizierten Sorelbetons A1

Qualitätssicherung  
Sorelbeton A1 (Hauptversuch)



### Qualitätssicherung des Sorelbetons A1 (Hauptversuch) v.26.07.21 bis 28.07.21

#### Zusammensetzung des Sorelbetons

Ausgangsstoffe		Masseanteil
Trockenstoffe	MgO	11,8 %
	Anhydrit	3,9 %
	Steinsalzgrus	60,6 %
Anmischflüssigkeit	MgCl <sub>2</sub> -Lösung	23,7 %

#### Eigenschaften des Betons

##### 1. Probenahme am 26.07.2021 (2. Charge)

Parameter	Bemerkungen	Dimension	Ist
Suspensionsdichte		g/cm <sup>3</sup>	1,922
Fließmaß nach 30 s / max. (Probenahme aus Mischer)	Fließrinne	mm	480 / 545
Temperatur Suspension		°C	31,5
Biegezugfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	11,6
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma), Lagerung bei ca. 23°C		MPa	46,9
Biegezugfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	12,4
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	52,3
Biegezugfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	13,3
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	54,6

##### 2. Probenahme am 27.07.2021 (64. Charge)

Parameter	Bemerkungen	Dimension	Ist
Suspensionsdichte		g/cm <sup>3</sup>	1,898
Fließmaß nach 30 s / max. (Probenahme aus Mischer)	Fließrinne	mm	460 / 500
Temperatur Suspension		°C	31,6
Biegezugfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	10,0
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	41,5

Biegezugfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>10,7</b>
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>52,3</b>
Biegezugfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 27°C		MPa	<b>9,8</b>
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 27°C		MPa	<b>42,9</b>

### 3. Probenahme am 28.07.2021 (146. Charge)

Parameter	Bemerkungen	Dimension	Ist
Suspensionsdichte		g/cm <sup>3</sup>	<b>1,893</b>
Fließmaß nach 30 s / max. (Probenahme aus Mischer)	Fließrinne	mm	<b>500 / 560</b>
0 h, Temperatur Suspension		°C	<b>31,4</b>
Biegezugfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>9,0</b>
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 7d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>38,5</b>
Biegezugfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>10,7</b>
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 14d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>42,7</b>
Biegezugfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>9,7</b>
einaxiale Druckfestigkeit (Prisma) 28d, Lagerung bei ca. 23°C		MPa	<b>44,2</b>

### Frischbetoneigenschaften

Charge	Datum	Susp. Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Fließmaß nach 30s / max. [mm]	Temp. Susp. [°C]
1	26.07.2021	1,902	490 / 550	31,4
2	26.07.2021	1,922	480 / 545	31,5
9	26.07.2021	1,923	440 / 480	32,6
14	26.07.2021	1,922	430 / 520	31,2
22	26.07.2021	1,904	460 / 490	32,1
32	26.07.2021	1,874	430 / 480	32,1
33	26.07.2021	1,900	490 / 530	32,4
42	26.07.2021	1,898	450 / 490	32,8
51	26.07.2021	1,889	460 / 500	31,7
53	27.07.2021	1,923	490 / 560	30,5
64	27.07.2021	1,898	460 / 500	31,6
74	27.07.2021	1,905	440 / 470	32,1
83	27.07.2021	1,877	410 / 450	32,2
91	27.07.2021	1,912	460 / 520	31,3
93	27.07.2021	1,920	450 / 500	31,5

100	27.07.2021	1,893	440 / 460	31,3
109	27.07.2021	1,911	430 / 450	31,9
117	27.07.2021	1,909	440 / 480	31,5
125	28.07.2021	1,872	440 / 460	31,9
134	28.07.2021	1,890	470 / 540	31,6
143	28.07.2021	1,884	450 / 500	31,4
146	28.07.2021	1,893	500 / 560	31,4

Sondershausen, den 30.08.2021



C. Kursave  
Laborleiter EVT

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchte Probe. Auszugsweise Veröffentlichung dieses Prüfberichtes nur mit schriftlicher Genehmigung der K-UTEC AG Salt Technologies.

## Anlage 8 Injektionsbaustoffe

### Anlage 8.1 Styromag-Suspension

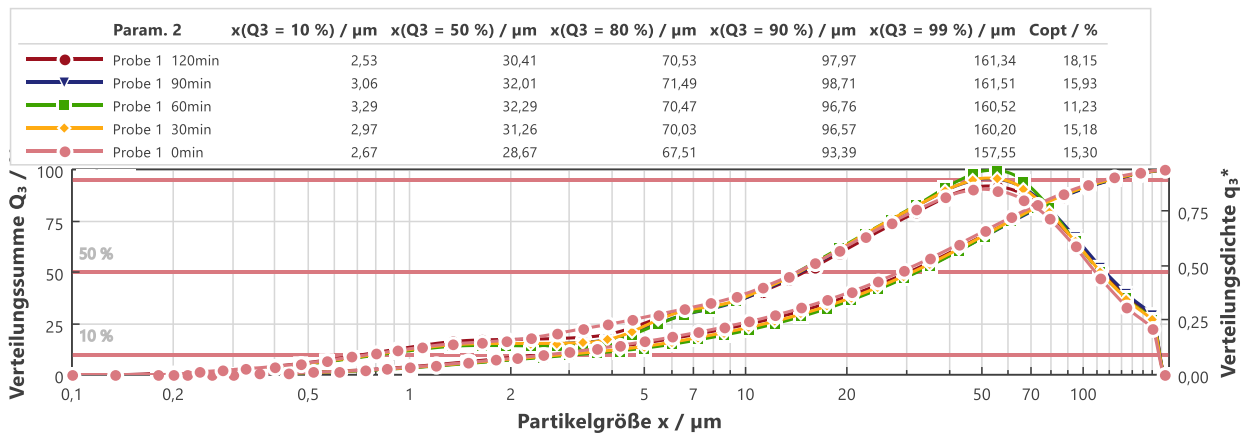
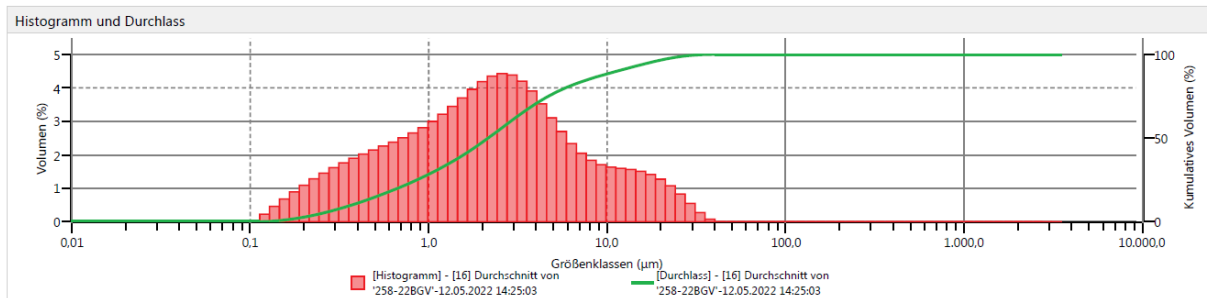


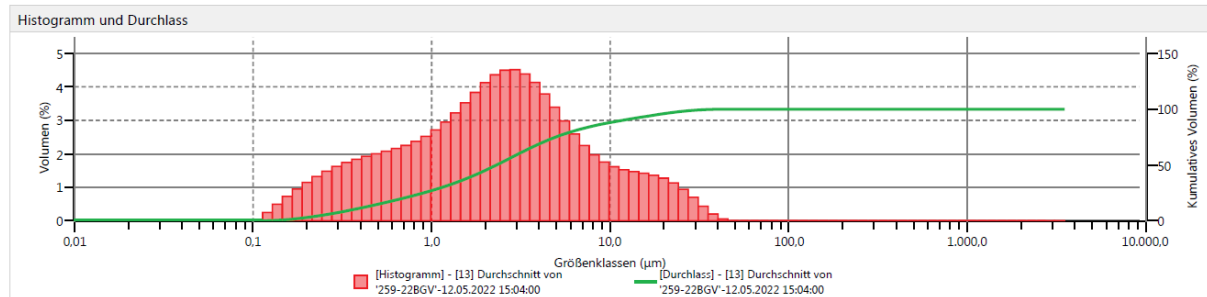
Abbildung 129: Verteilungsdichte/Verteilungssumme der Partikelgröße zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Anmischen der angerührten Styromag-Suspension.

## Anlage 8.2 Injektionsbaustoff MFBBa - Partikelgrößenverteilung der Trockenmischung

<p><b>Probe</b></p> <p><b>Probenname</b> Durchschnitt von '258-22BGV'  <b>Beschreibung</b> MgO-Injektionsmörtel MFBBa, Probe: P300-37/1  <b>Kunde</b> IBeWa Freiberg  <b>Dispergierbedingungen</b> Standard- Edelstahl-Venturi (mit Prallplatte)  <b>Name Dispergiemedium</b> Luft  <b>Erweitert-Siebdaten</b> ohne Erweiterung  <b>Bearbeiter</b> akl</p>	<p><b>Messdetails</b></p> <p><b>Analyse Datum Zeit</b> 12.05.2022 14:25:03  <b>Messung Uhrzeit</b> 14:25:03  <b>Ergebnis Quelle</b> Gemittelt  <b>SOP Dateiname</b> AeroS.cfg</p>
<p><b>Analyse</b></p> <p><b>Streuungsmodell</b> Fraunhofer  <b>Analyse-Modell</b> Universal  <b>Gewichtete Abweichung</b> 0,55 %  <b>Laserabschattung</b> 4,65 %</p>	<p><b>Ergebnis</b></p> <p><b>Partikel-Dichte</b> 0,10 g/cm<sup>3</sup>  <b>Breite</b> 5,104  <b>Gleichförmigkeit</b> 1,508  <b>D [3:2]</b> 1,00 µm  <b>D [4:3]</b> 4,20 µm  <b>Dv (10)</b> 0,370 µm  <b>Dv (50)</b> 2,15 µm  <b>Dv (90)</b> 11,4 µm</p>



<p><b>Probe</b></p> <p><b>Probenname</b> Durchschnitt von '259-22BGV'  <b>Beschreibung</b> MgO-Injektionsmörtel MFBBa, Probe: P300-38/1  <b>Kunde</b> IBeWa Freiberg  <b>Dispergierbedingungen</b> Standard- Edelstahl-Venturi (mit Prallplatte)  <b>Name Dispergiemedium</b> Luft  <b>Erweitert-Siebdaten</b> ohne Erweiterung  <b>Bearbeiter</b> akl</p>	<p><b>Messdetails</b></p> <p><b>Analyse Datum Zeit</b> 12.05.2022 15:04:00  <b>Messung Uhrzeit</b> 15:04:00  <b>Ergebnis Quelle</b> Gemittelt  <b>SOP Dateiname</b> AeroS.cfg</p>
<p><b>Analyse</b></p> <p><b>Streuungsmodell</b> Fraunhofer  <b>Analyse-Modell</b> Universal  <b>Gewichtete Abweichung</b> 0,34 %  <b>Laserabschattung</b> 7,60 %</p>	<p><b>Ergebnis</b></p> <p><b>Partikel-Dichte</b> 0,10 g/cm<sup>3</sup>  <b>Breite</b> 4,907  <b>Gleichförmigkeit</b> 1,486  <b>D [3:2]</b> 1,02 µm  <b>D [4:3]</b> 4,45 µm  <b>Dv (10)</b> 0,364 µm  <b>Dv (50)</b> 2,31 µm  <b>Dv (90)</b> 11,7 µm</p>



### Anlage 8.3 Technisches Datenblatt des Epojet LV [37]

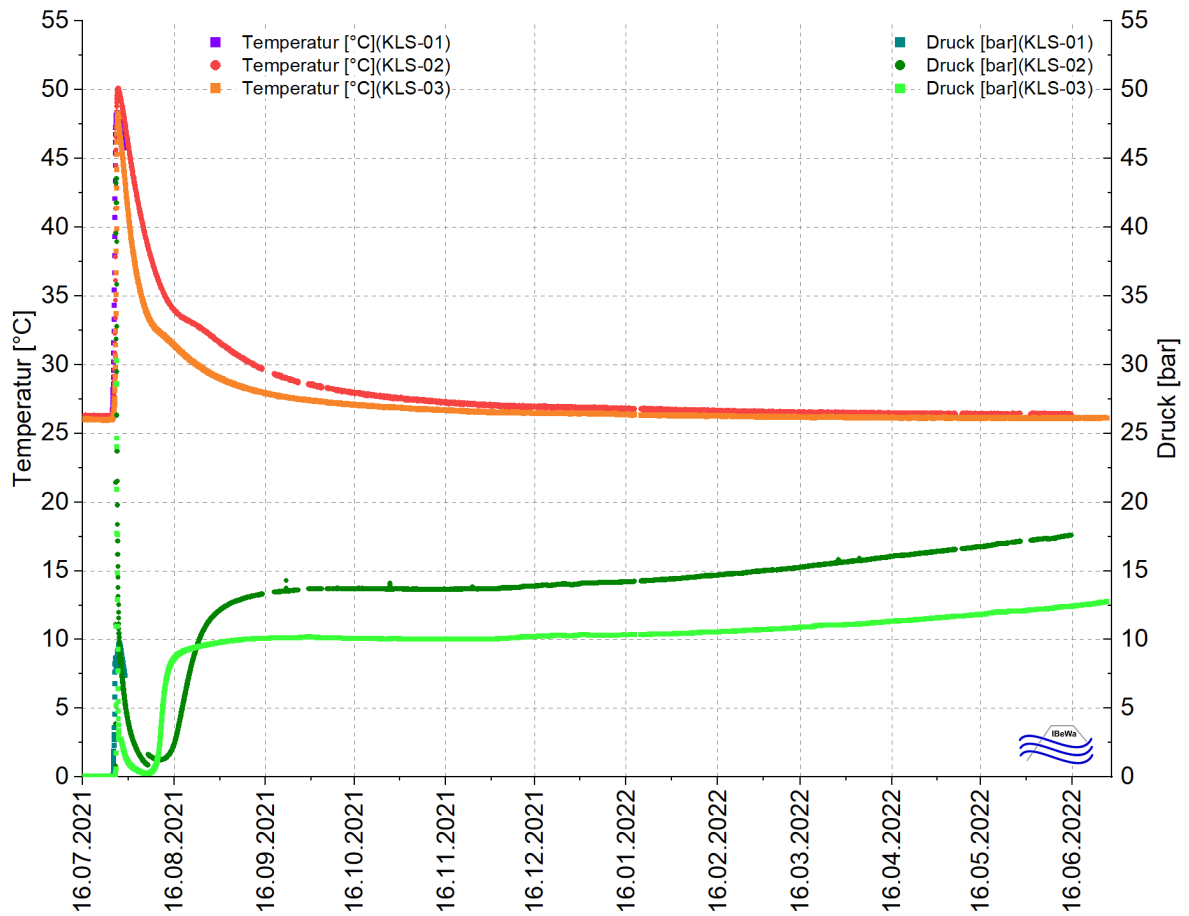
TECHNISCHE DATEN		
KENNDATEN DES PRODUKTS		
	Komponente A	Komponente B
Konsistenz:	flüssig	flüssig
Farbe:	gelblich transparent	gelblich transparent
Dichte (kg/l):	1,1	1,1
Viskosität nach Brookfield (mPa·s):	300 (Spindel 2 - 20 Upm)	25 (Spindel 1 - 50 Upm)
Lagerung:	24 Monate im ungeöffneten Originalgebinde bei Temperaturen von +10 °C bis +30 °C	
Kennzeichnung nach		
- GGVS/ADR:	UN 3082, 9 III	UN 2735, 8 III (LQ möglich)
- VbF:	umweltgefährdender Polyamine, flüssig, ätzend, Stoff, flüssig, n.a.g. n.a.g. (m-Xylylendiamin, (Epoxidharz 3-Azapentan-1,5-diamin) 4,4'-Isopropylidendiphenol)	
- GefStoffV:	entfällt	entfällt
- GISCODE (A+B):	reizend, umweltgefährdend ätzend (Komp. A enthält epoxidhaltige Verbindungen, Hinweise des Herstellers beachten) RE1, lösemittelfrei gem. TRGS 610 Weitere Hinweise können dem Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.	
ANWENDUNGSDATEN (bei +23 °C und 50% rel. Luftfeuchtigkeit)		
Mischungsverhältnis:	Komponente A : Komponente B = 4 : 1	
Konsistenz der Mischung:	dünnflüssig	
Farbe der Mischung:	gelblich transparent	
Dichte der Mischung (kg/l):	1,10	
Viskosität nach Brookfield (mPa·s):	140 (Spindel 1 - 20 Upm)	
Verarbeitungszeit (EN ISO 9514) (Minuten):		
- bei +23 °C:	70	
- bei +30 °C:	30	
Erhärtungszeit (Stunden):		
- bei +23 °C:	7-8	
- bei +30 °C:	5-6	
Verarbeitungstemperatur:	von +10 °C bis +35 °C	
Endfestigkeit nach:	7 Tagen	

ANWENDUNGSDATEN				
Eigenschaften	Prüfverfahren	Anforderungen gemäß EN 1504-5	Produkteigenschaft	
Haftung durch Haftzugfestigkeit:	EN 12618-2	Kohäsionsbruch im Untergrund	übertrifft die Anforderungen	
Haftung durch Schrägscherfestigkeit:	EN 12618-3	monolithisches Versagen	übertrifft die Anforderungen	
Volumetrische Schrumpfung (%):	EN 12617-2	< 3	2,1	
Glasübergangstemperatur:	EN 12614	> +40 °C	> +40 °C	
Injektionsfähigkeit bei trockenem oder feuchtem Medium:	EN 1771	Injektionsfähigkeitsklasse: - Rissbreite 0,1 mm: < 4 Min. - Rissbreite 0,2-0,3 mm: < 8 Min.	trocken	feucht
			1 Min. 10"	1 Min. 39"
		indirekte Spannung: - > 7 (N/mm <sup>2</sup> )	11 (N/mm <sup>2</sup> )	10 (N/mm <sup>2</sup> )
Dauerhaftigkeit (Frost/Tau, und Nass/Trocken-Zyklen):	EN 12618-2	Bruch im Untergrund	übertrifft die Anforderungen	
Zugfestigkeitsentwicklung bei +10 °C (MPa):	EN 1543	Zugfestigkeit > 3 (N/mm <sup>2</sup> ) innerhalb von 72 Std. bei Mindestanwendungstemperatur	> 3	
Zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> ):	EN ISO 527	-	39	
Zug-Elastizitätsmodul (N/mm <sup>2</sup> ):	EN ISO 527	-	2.600	
Bruchdehnung (%):	EN ISO 527	-	2,5	
Druckfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> ):	ASTM D 695	-	70	

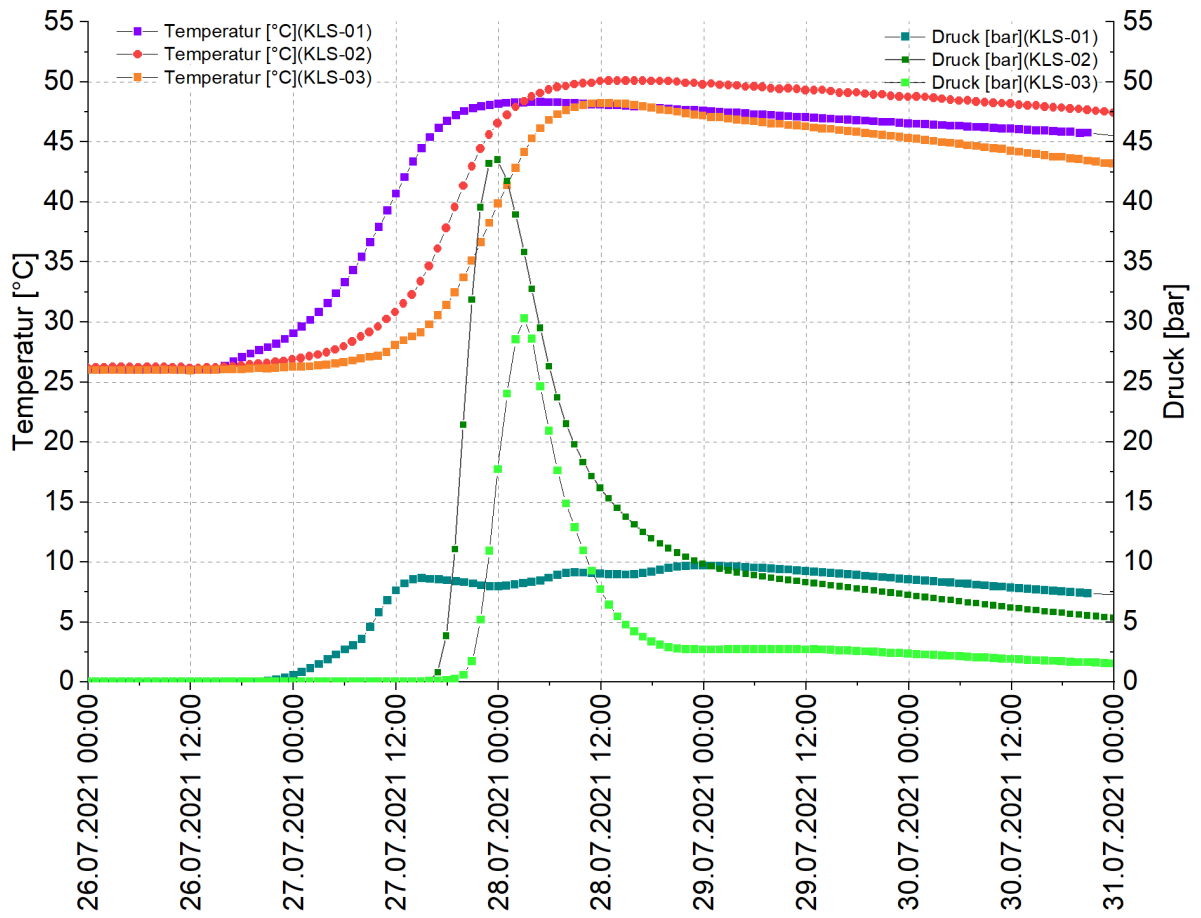
## Anlage 9 Monitoringergebnisse

### Anlage 9.1 Ergebnisse der kabellosen Sensoren

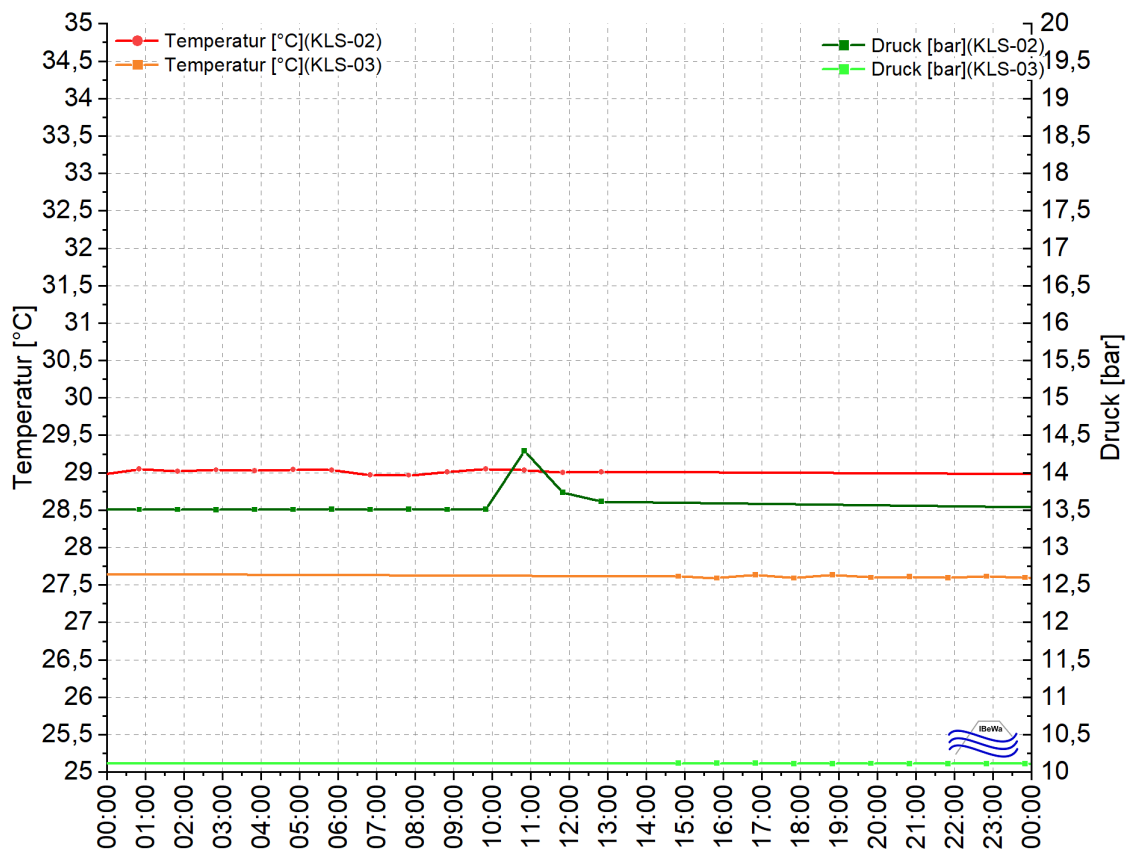
#### Anlage 9.1.1 Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke im Zeitraum 07/2021 – 07/2022



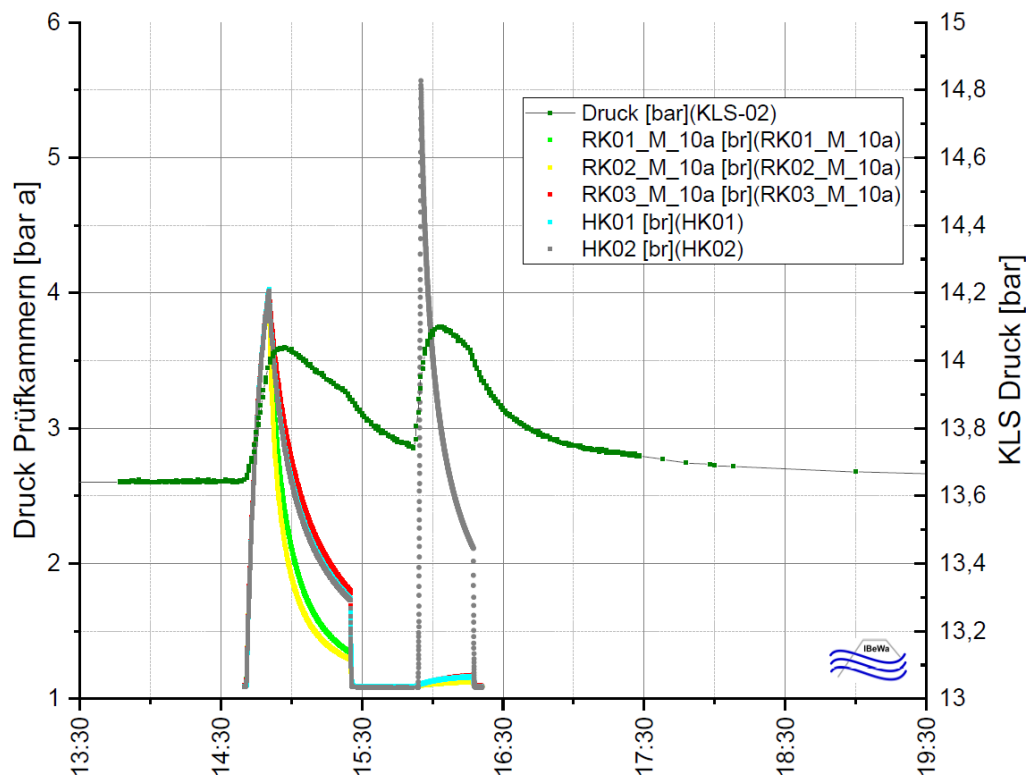
**Anlage 9.1.2 Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke im Zeitraum der Betonage**



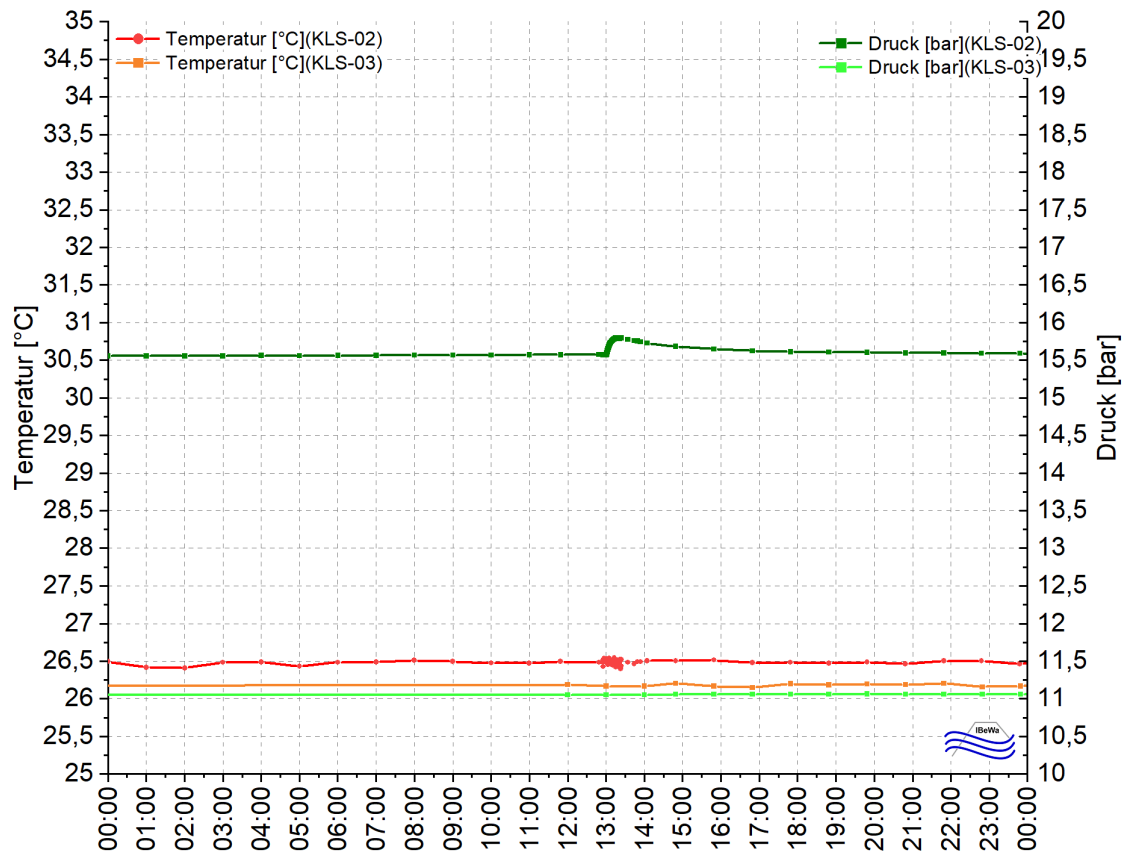
**Anlage 9.1.3 Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke während der Tests (verworfenen!) am 23.09.2021**



**Anlage 9.1.4 Kabellos gemessener Kontaktdruck und die angewendeten Prüfdrücke während der Tests am 28.10.2021**

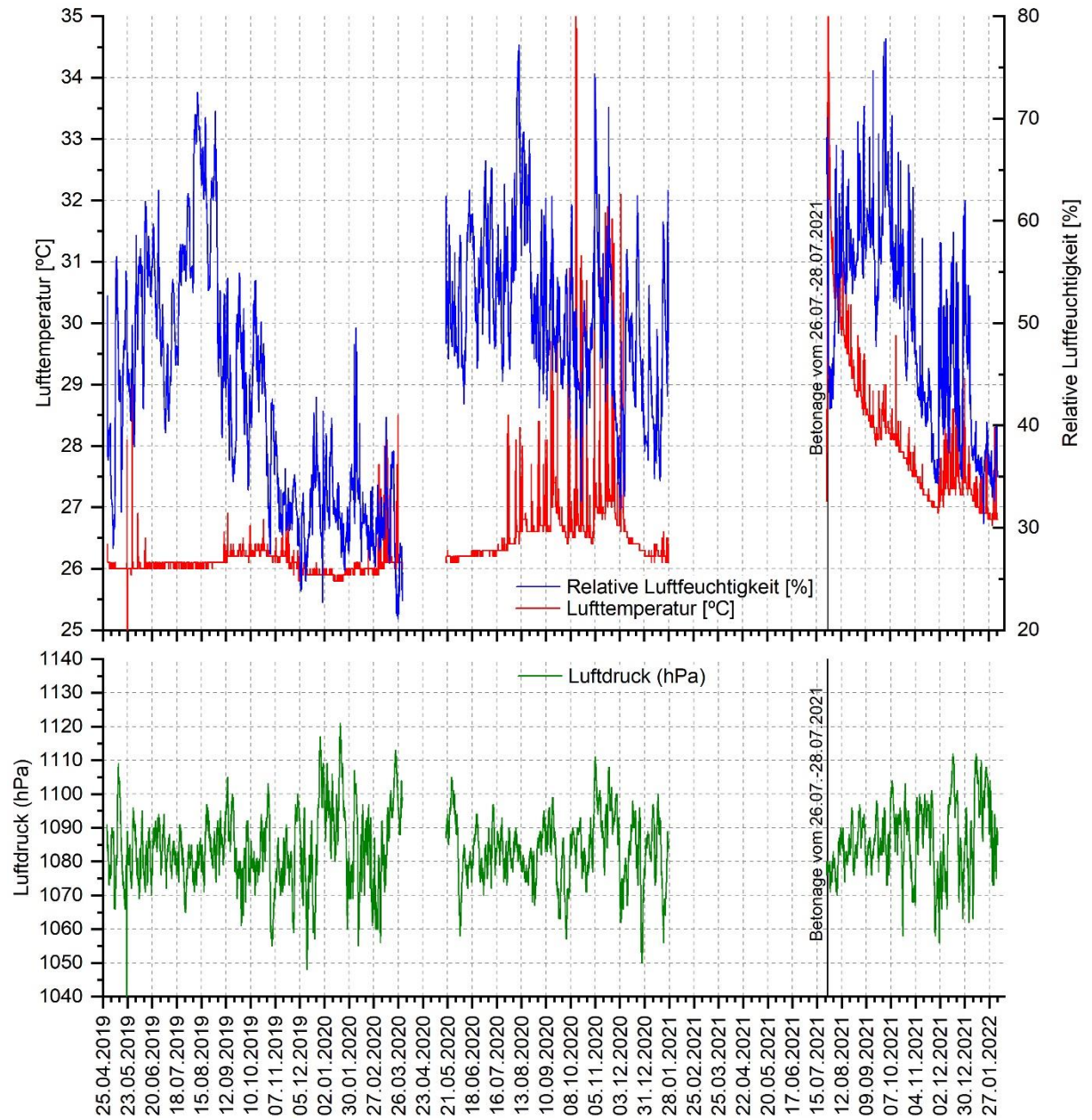


**Anlage 9.1.5 Kabellos gemessene Kontakttemperaturen und Kontaktdrücke während des Tests der HK02 am 29.03.2022**

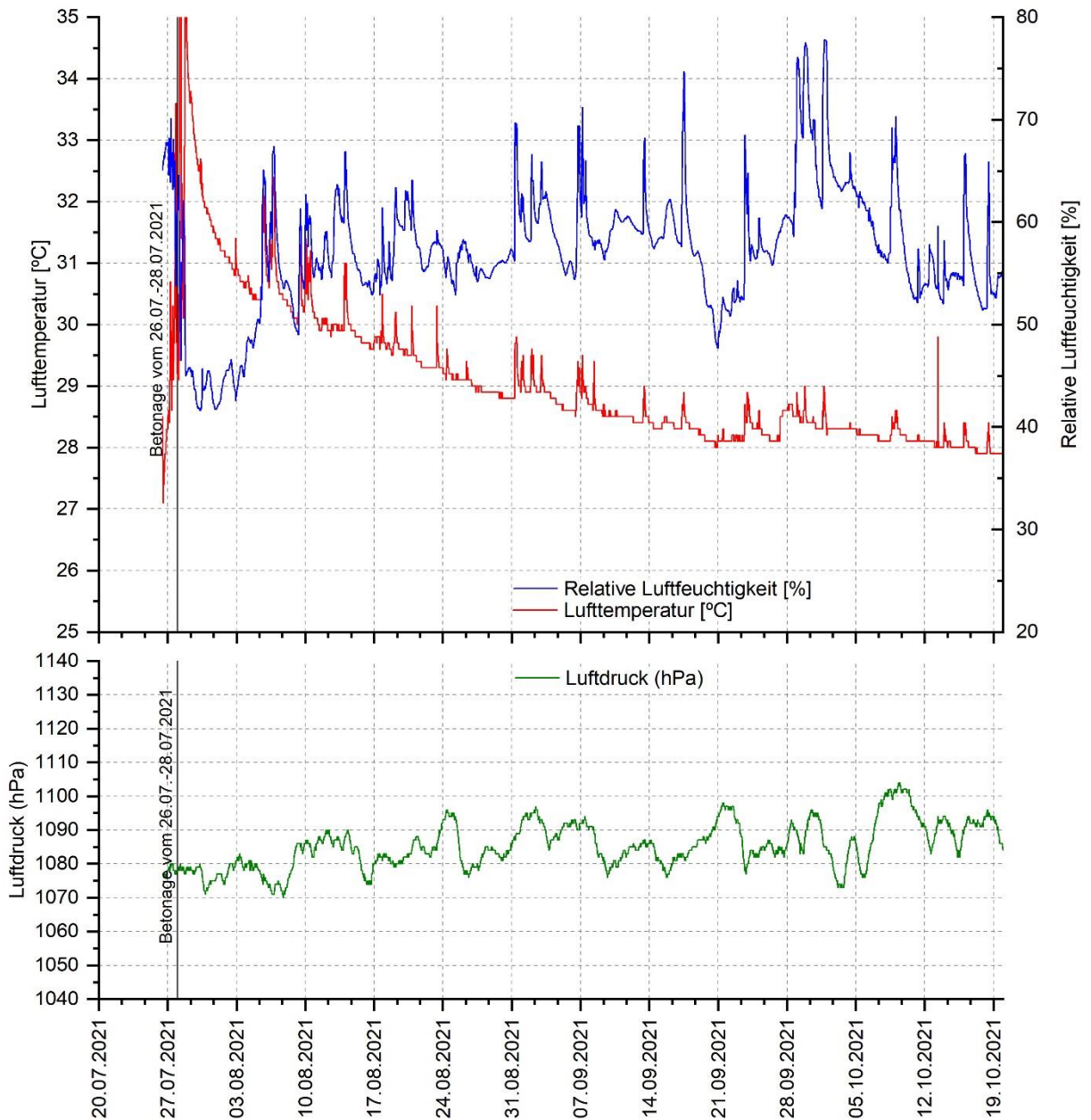


## Anlage 9.2 Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte

### Anlage 9.2.1 Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte - im Projektzeitraum 04/2019 – 02/2022



**Anlage 9.2.2 Thermodynamische Bedingungen - Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte während und nach der Betonage im Zeitraum 07/2021 – 10/2021**



## Anlage 10 In situ-Permeabilitäten

### Anlage 10.1 In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den OFP-Untersuchungen 2020 und 2022 im Stoß

Nr.	Bohrung	Messpunktbezeichnung	Untersuchungsbereich				Prüf-fluid	Testme-thode	Datum	Prüfdruck (Relativdruck)	Gaspermea-bilität
			OK	MP	UK	IL					
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[m <sup>2</sup> ]
k1	OFP	OFP01_175_000_G1	-	-	-	-	Gas	IT	29.04.2020	0,51	7,0E-18
k1	OFP	OFP02_175_000_G1	-	-	-	-	Gas	IT	24.02.2020	0,47	1,3E-17
k2	OFP	OFP02_175_003_G1	-	-	-	-	Gas	IT	24.02.2020	0,49	3,0E-17
k3	OFP	OFP02_175_004_G2	-	-	-	-	Gas	IT	28.04.2020	0,48	8,0E-17
k4	OFP	OFP02_175_007_G1	-	-	-	-	Gas	IT	03.06.2020	0,45	6,5E-17
k1	OFP	OFP01_175_000_1G1	-	-	-	-	Gas	IT	04.03.2022	0,68	1,0E-22
k2	OFP	OFP02_175_007_1G1	-	-	-	-	Gas	IT	03.03.2022	0,64	2,2E-20

**Anlage 10.2 In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen 2020 und 2022 in der Sohle**

Nr.	Bohrung	Messpunktbezeichnung	Untersuchungsbereich				Prüf-fluid	Test-methode	Datum	Prüfdruck (Relativdruck)	Gaspermeabilität	
			OK	MP	UK	IL						
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[m <sup>2</sup> ]	
k0	B02-060, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm) Sohle - 2020	B02_060_0000_G1	0,000	0,048	0,095	0,095	Gas	IT	06.02.2020	0,47	2,5E-18	
k1		B09-040, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm) Sohle - 2020	B09_040_-0170_G1	0,000	0,005	0,010	0,010	Gas	IT	14.08.2020	0,52	2,8E-17
k2			B09_040_-0150_G1	0,000	0,015	0,030	0,030			13.08.2020	0,49	1,1E-17
k3			B09_040_-0130_G1	0,000	0,025	0,050	0,050			12.08.2020	0,49	1,1E-17
k4			B09_040_0000_G1	0,000	0,090	0,180	0,180			18.08.2020	0,51	3,7E-19
k5			B09_040_0180_G1	0,180	0,270	0,360	0,180			10.06.2020	0,64	3,7E-19
k6			B09_040_0360_G1	0,360	0,450	0,540	0,180			08.06.2020	0,64	5,7E-20
k7	B09_040_0540_INT_G1	0,540	1,770	3,000	2,460		09.06.2020	0,44	1,0E-22			
k1	B09-040, (L = 3,00 m; a = -90,0°; d = 70 mm) Sohle - 2022	B09_040_0170_1G2	0,000	0,005	0,010	0,010	Gas	IT	07.06.2022	0,38	3,0E-14	
k2		B09_040_0150_1G1	0,000	0,015	0,030	0,030			07.06.2022	0,40	1,5E-14	
k3		B09_040_0130_1G2	0,000	0,025	0,050	0,050			09.06.2022	0,32	7,9E-15	
k4		B09_040_0000_1G1	0,000	0,090	0,180	0,180			13.06.2022	0,35	9,0E-16	
k5		B09_040_0180_1G1	0,180	0,270	0,360	0,180			13.06.2022	0,45	1,0E-17	
k6		B09_040_0360_1G1	0,360	0,450	0,540	0,180			21.06.2022	0,60	2,3E-18	
k7		B09_040_0540_INT_1G1	0,540	1,770	3,000	2,446				22.06.2022	0,58	3,0E-22

**Anlage 10.3 In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Kombi- und Bohrlochpackermessungen 2020 und 2022 im Stoß**

Nr.	Bohrung	Messpunktbezeichnung	Untersuchungsbereich				Prüffluid	Testmethode	Datum	Prüfdruck (Relativdruck)	Gaspermeabilität
			OK	MP	UK	IL					
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[m <sup>2</sup> ]	
k1	B03-165, (L = 10,00 m; a = -5,0°; d = 70 mm) Stoß - 2020	B03_165_-0170_1G1	0,000	0,005	0,010	0,010	Gas	IT	03.06.2020	0,63	9,5E-18
k2		B03_165_-0150_1G1	0,000	0,015	0,030	0,030			04.06.2020	0,64	1,9E-18
k3		B03_165_-0130_1G1	0,000	0,025	0,050	0,050			05.06.2020	0,33	5,0E-19
k4		B03_165_0000_1G1	0,000	0,090	0,180	0,180			21.04.2020	0,62	5,0E-19
k5		B03_165_0180_1G1	0,180	0,270	0,360	0,180			20.04.2020	0,62	5,0E-19
k6		B03_165_0360_1G1	0,360	0,450	0,540	0,180			16.04.2020	0,63	5,0E-20
k7		B03_165_0540_INT_1 G2	0,540	5,270	10,000	9,460			08.06.2020	0,44	1,0E-22
k8		B03_165_-0065_1G1	0,000	0,058	0,115	0,115			28.04.2020	0,52	6,2E-19
k9		B03_165_-0035_1G1	0,000	0,073	0,145	0,145			23.04.2020	0,62	5,0E-19
k1	B03-165, (L = 10,00 m; a = -5,0°; d = 70 mm) Stoß - 2022	B03_165_-0170_2G1	0,000	0,005	0,010	0,010	Gas	IT	15.03.2022	0,45	6,0E-19
k2		B03_165_-0150_2G1	0,000	0,150	0,030	0,030			10.03.2022	0,55	2,5E-19
k3		B03_165_-0130_2G1	0,000	0,025	0,050	0,050			09.03.2022	0,54	1,0E-19
k4		B03_165_0000_2G1	0,000	0,090	0,180	0,180			16.03.2022	0,51	8,0E-20
k5		B03_165_0180_2G2	0,180	0,270	0,360	0,180			22.03.2022	0,39	7,0E-20
k6		B03_165_0360_G2	0,360	0,450	0,540	0,180			21.03.2022	0,48	6,8E-19
k7		B03_165_0540_INT_G 2	0,540	5,270	10,000	9,460			23.06.2022	0,55	1,6E-21

**Anlage 10.4 In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B14\_164**

Nr.	Bohrung	Messpunktbezeichnung	Untersuchungsbereich				Prüf-fluid	Testmethode	Datum	Prüfdruck	Gaspermeabilität	Zielstellung / Bemerkung
			OK	MP	UK	IL						
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[m <sup>2</sup> ]	[-]	
k1	B14_164, (L = 2,27 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B14_164_025_G2	0,25	0,31	0,37	0,12	Gas	IT	21.01.2022	0,45	3,7E-16	Betonierfuge
k2		B14_164_060_G1	0,60	0,66	0,72	0,12			13.01.2022	0,50	2,0E-17	MgO-Baustoff
k3		B14_164_080_G1	0,80	0,86	0,92	0,12			19.01.2022	0,46	4,3E-18	Betonierfuge
k4		B14_164_112_G1	1,12	1,18	1,24	0,12			17.01.2022	0,54	4,0E-18	MgO-Baustoff
k5		B14_164_125_G1	1,25	1,31	1,37	0,12			13.01.2022	0,51	6,0E-19	MgO-Baustoff
k6		B14_164_142_G1	1,42	1,48	1,54	0,12			17.01.2022	0,54	1,2E-17	Betonierfuge
k7		B14_164_160_G1	1,60	1,66	1,72	0,12			17.01.2022	0,54	5,3E-18	MgO-Baustoff
k8		B14_164_035_INT_G1	0,35	1,31	2,27	1,92					12.01.2022	0,51
-	B14_164, (L = 3,28 m; a = -90,0°; d = 70 mm)	B14_164_265_G1	2,65	2,71	2,77	0,12	Gas	IT	23.02.2022	0,49	3,8E-19	
-		B14_164_260_G1	2,60	2,66	2,72	0,12			23.02.2022	0,47	3,8E-18	
-		B14_164_255_G1	2,55	2,61	2,67	0,12			22.02.2022	0,49	2,6E-16	
-		B14_164_249_G1	2,49	2,55	2,61	0,12			23.02.2022	0,50	1,1E-15	
-		B14_164_231_G1	2,31	2,37	2,43	0,12			22.02.2022	0,78	2,6E-15	
-		B14_164_243_G1	2,43	2,49	2,55	0,12					22.02.2022	0,48

**Anlage 10.5 In situ-Permeabilitätsergebnisse zu den Bohrlochpackermessungen in der Bohrung B15\_164**

Nr.	Bohrung	Messpunktbezeichnung	Untersuchungsbereich				Prüffluid	Testmethode	Datum	Prüfdruck	Gaspermeabilität
			OK	MP	UK	IL					
[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[MPa]	[m <sup>2</sup> ]	
k9	B15-164 (L = 2,13 m; a = -83,0°; d = 70 mm) Sohle	B15-164_078_G1	0,78	0,84	0,90	0,12	Gas	IT	03.03.2022	0,58	5,9E-18
k10		B15-164_108_G1	1,08	1,14	1,20	0,12			07.03.2022	0,60	6,0E-18
k11		B15-164_145_G1	1,45	1,51	1,57	0,12			02.03.2022	0,49	6,5E-18
k12		B15_164_034_INT_G1	0,34	1,24	2,13	1,79			24.02.2022	0,50	7,3E-18
k13		B15-164_182_INT_G1	1,82	1,98	2,13	0,31			27.02.2022	0,57	7,5E-18

## Anlage 11 Laboruntersuchungen - Ergebnisse

### Anlage 11.1 Lösungsgehalt

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

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

Die Trocknungen wurden bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse materialspezifisch mit Angabe der Trocknungstemperatur zusammengefasst. In Tabelle 26 sind die an ermittelten Werte zusammengefasst.

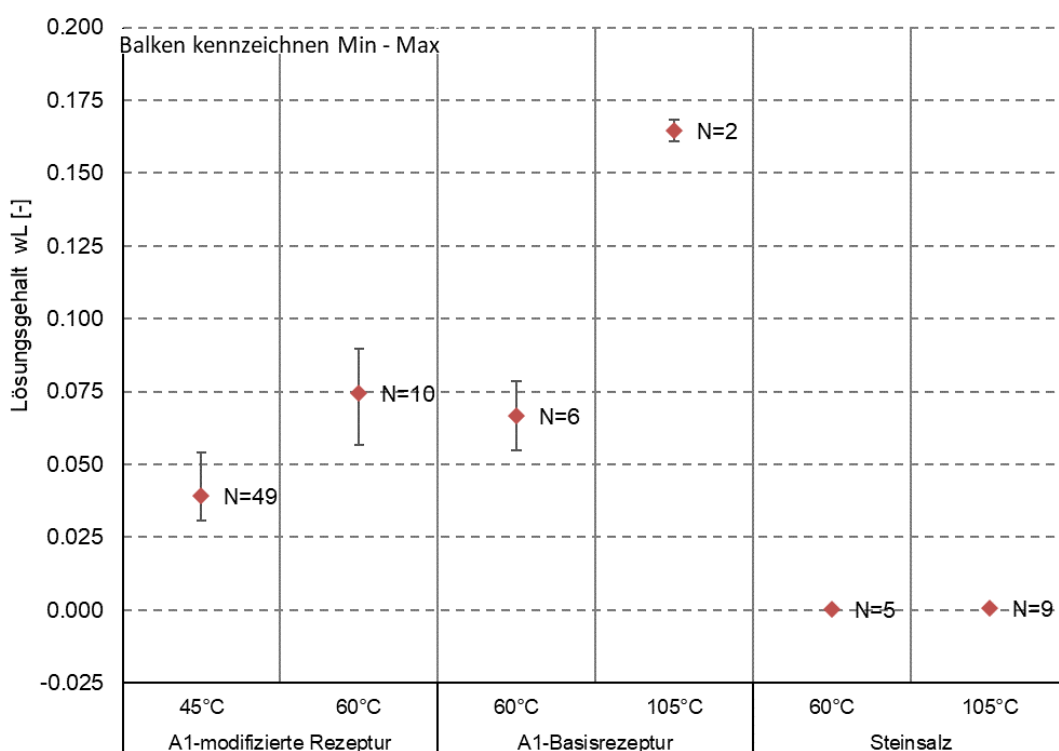


Abbildung 130: Am Baustoff und Gebirge ermittelter Lösungsgehalt für unterschiedliche Trocknungstemperatur

Tabelle 26: Ergebnisübersicht der ermittelten Lösungsgehalte mit Angabe der Trocknungstemperatur

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

## Anlage 11.2 Dichte

### Anlage 11.2.1 Reindichte

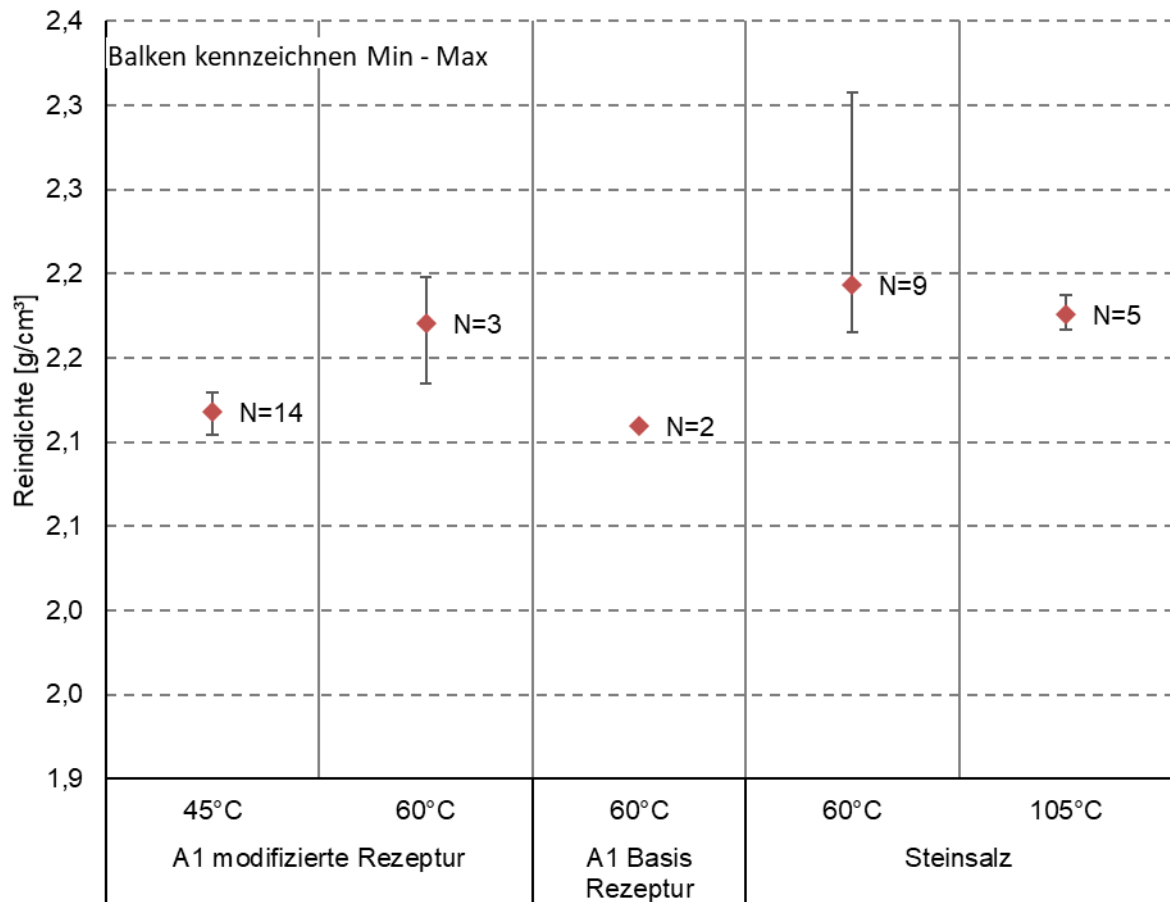


Abbildung 131: Am Baustoff und Gebirge ermittelte Reindichte für unterschiedliche Trocknungstemperatur

Tabelle 27: Ergebnisübersicht der ermittelten Reindichten

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

## Anlage 11.2.2 Trockendichte

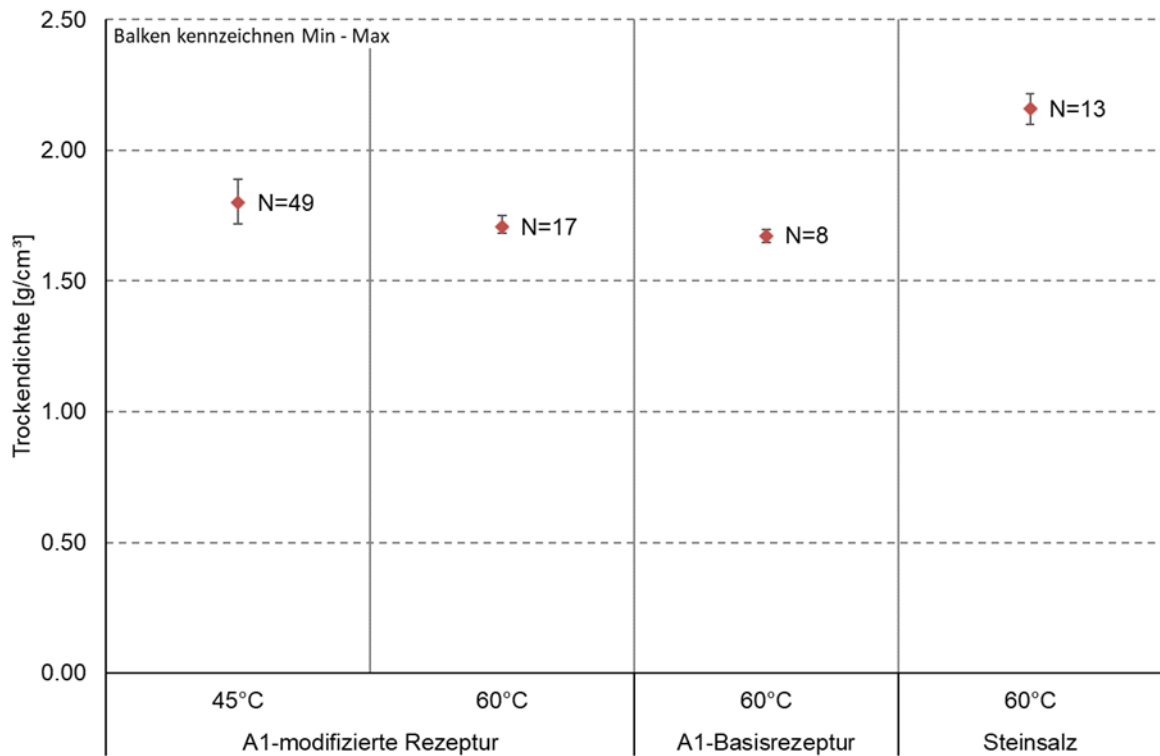


Abbildung 132 Am Baustoff und Gebirge ermittelte Trockendichte

Tabelle 28 Ergebnisse der Trockendichteberechnung

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

### Anlage 11.3 Porosität aus den Dichten

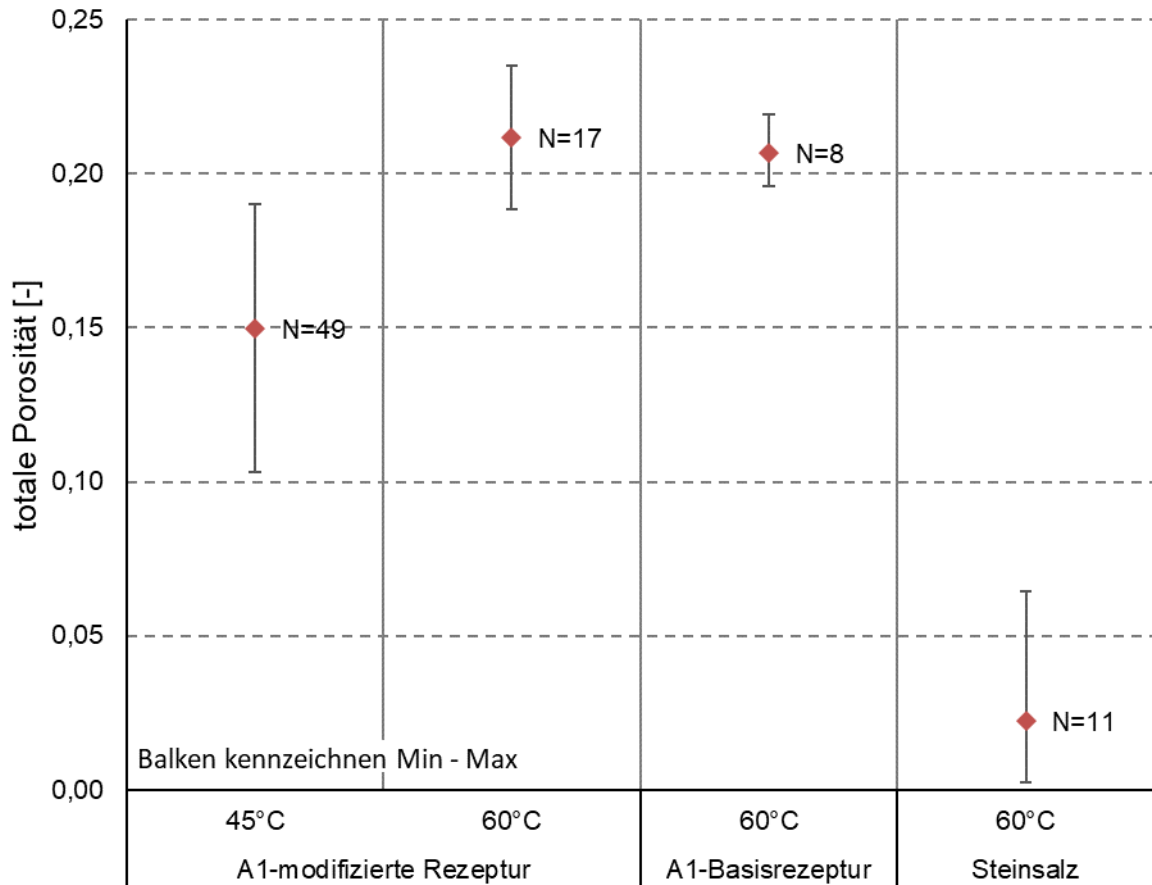


Abbildung 133: Aus den Dichten berechnete totale Porosität für unterschiedliches Material

Tabelle 29: Ergebnisse der Porositätsberechnung aus Messwerten der Dichtemessung

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

### Anlage 11.4 Porenraumsättigung - Ergebnisse der Untersuchungen für Steinsalz und Baustoff

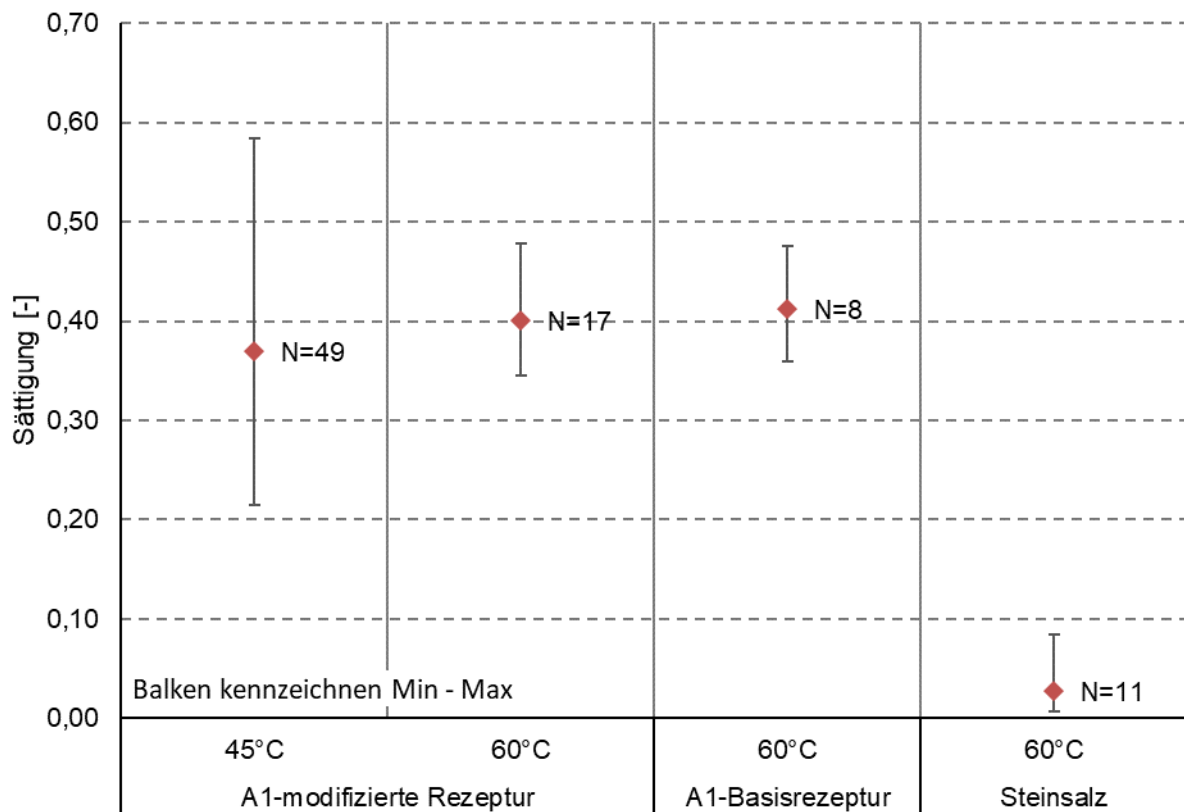


Abbildung 134: Aus dem Lösungsgehalt und der totalen Porosität berechnete Sättigung

Tabelle 30: Ergebnisübersicht der berechneten Sättigung

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

## Anlage 11.5 Porosität und Porengrößenverteilung aus Quecksilberporosimetrie (MIP)

### Anlage 11.5.1 MIP - Ergebnisse für Steinsalz

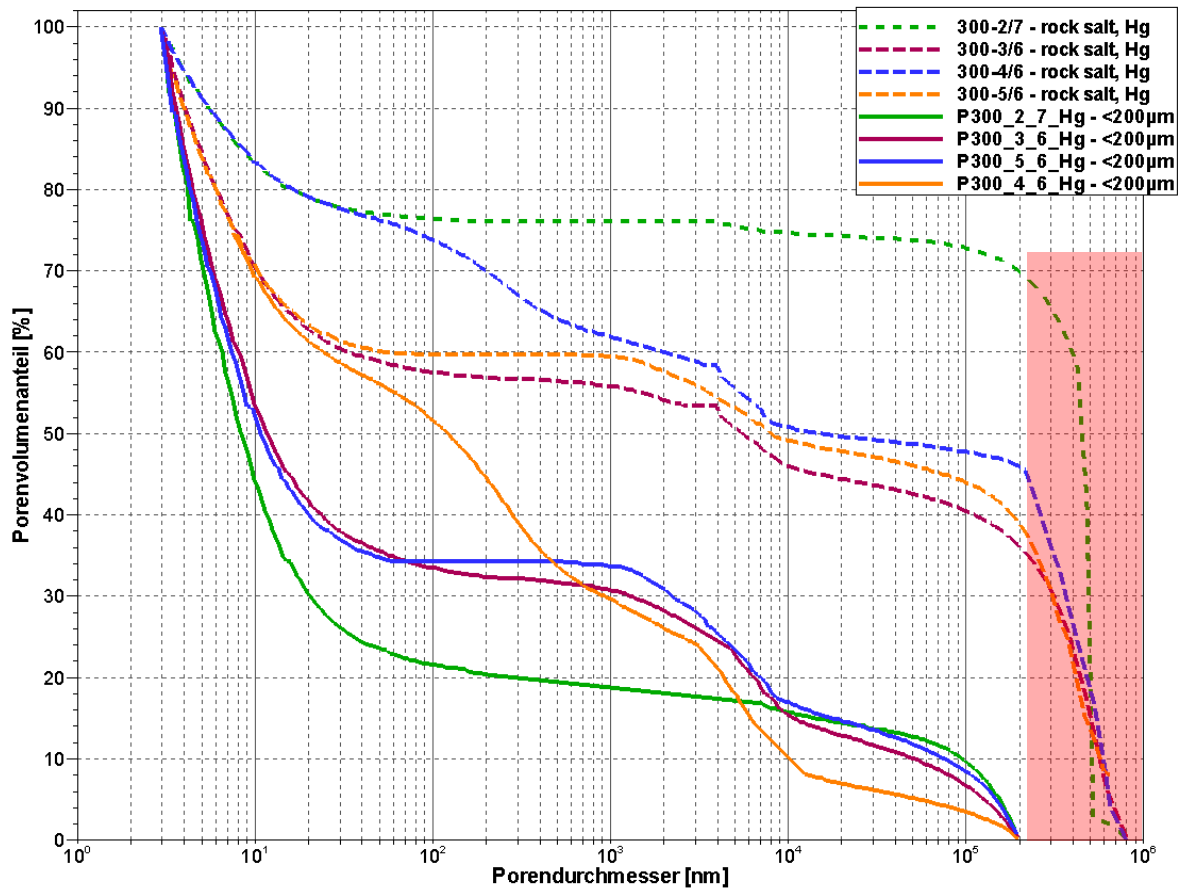


Abbildung 135: An 4 Steinsalzproben mit MIP ermittelter Porenvolumenanteil in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und vergleichend unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne den Porenvolumenanteil der Poren >200 μm

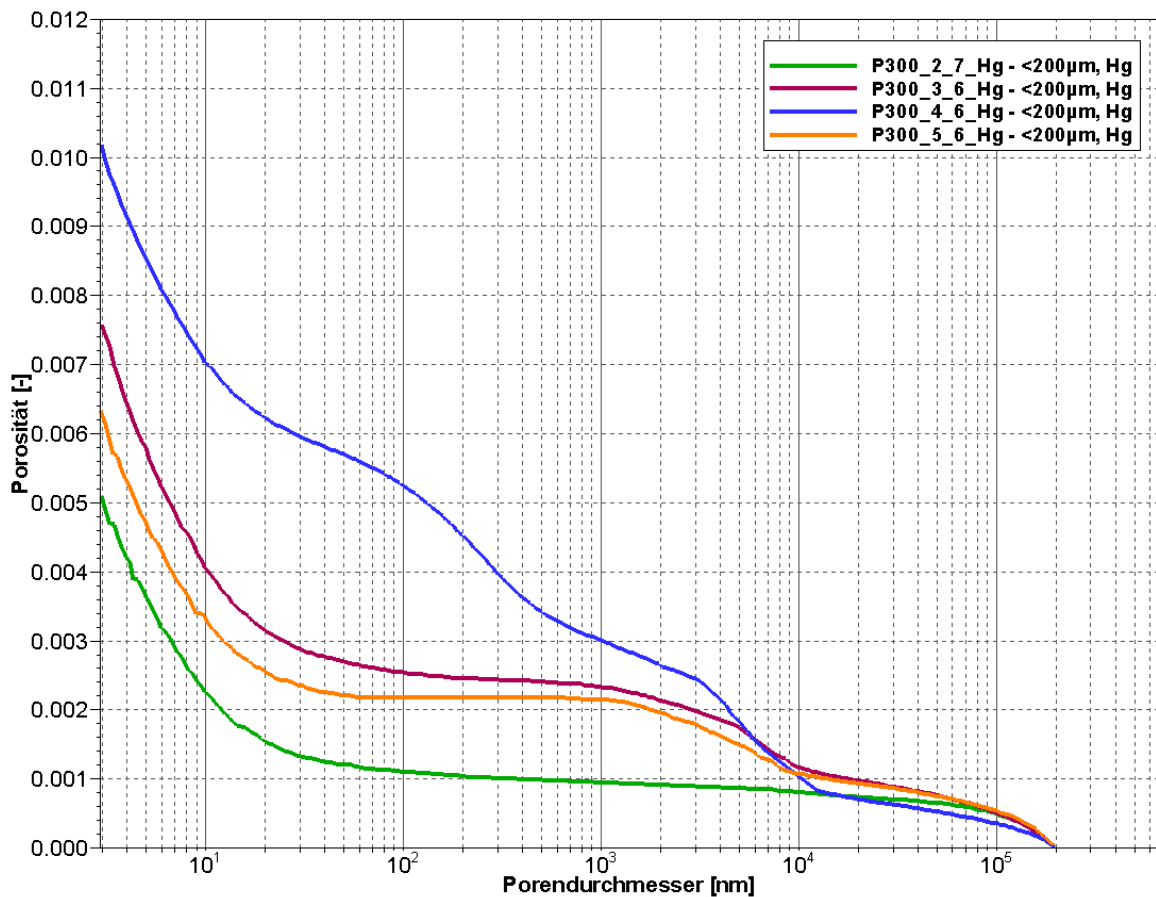


Abbildung 136: An Steinsalzproben mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser unter Berücksichtigung der Ergebnisse des CT Analyse ohne Poren >200 µm

Tabelle 31: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Steinsalz ohne Poren >200 µm

Probe	n Mikro-poren	n Meso-poren	n Makro-poren	n Hg-in-jizierbar	n <sub>t</sub> aus Dichte	n CT	n <sub>surf</sub> CT
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
P300-2/7	0,004	0,001	0,001	0,005	0,025	0,029	0,05
P300-3/6	0,005	0,001	0,002	0,008	0,021	0,025	0,066
P300-4/6	0,003	0,006	0,001	0,010	0,040	0,018	0,073
P300-5/6	0,003	0,002	0,001	0,006	0,019	0,019	0,065

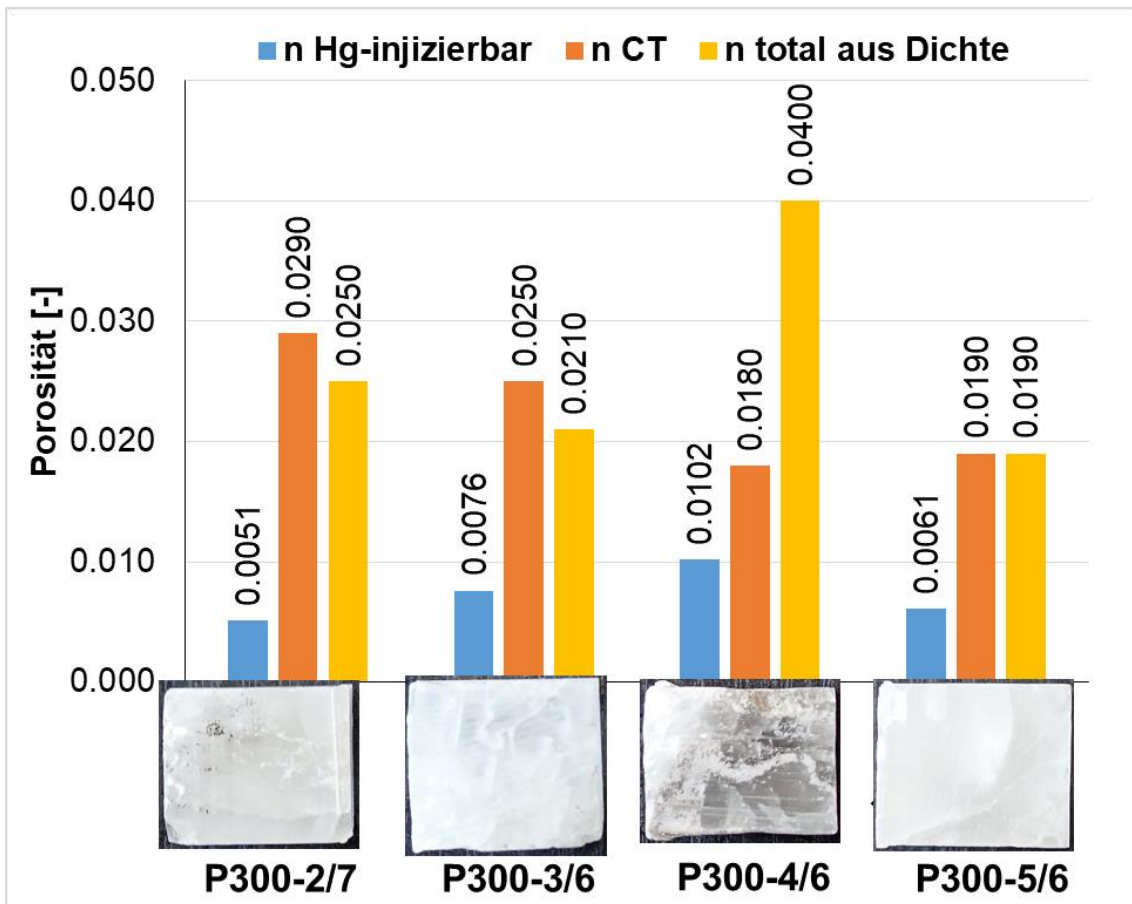


Abbildung 137: An Steinsalzproben ermittelte Porositäten durch MIP (Poren >200 µm vernachlässigt) und durch CT

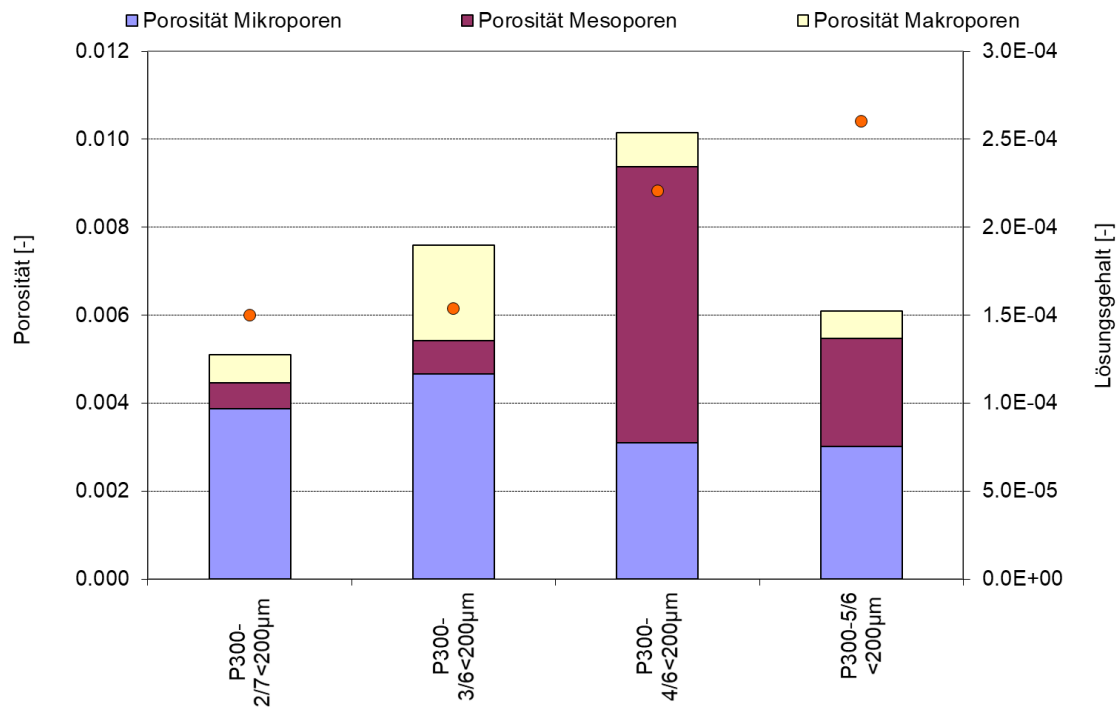


Abbildung 138: An Steinsalzproben ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen

**Anlage 11.5.2 MIP - Ergebnisse für die im Bauwerk eingesetzte Rezeptur - A1 modifizierte Rezeptur mit Mischsalz+Styromag+Anhydrit**

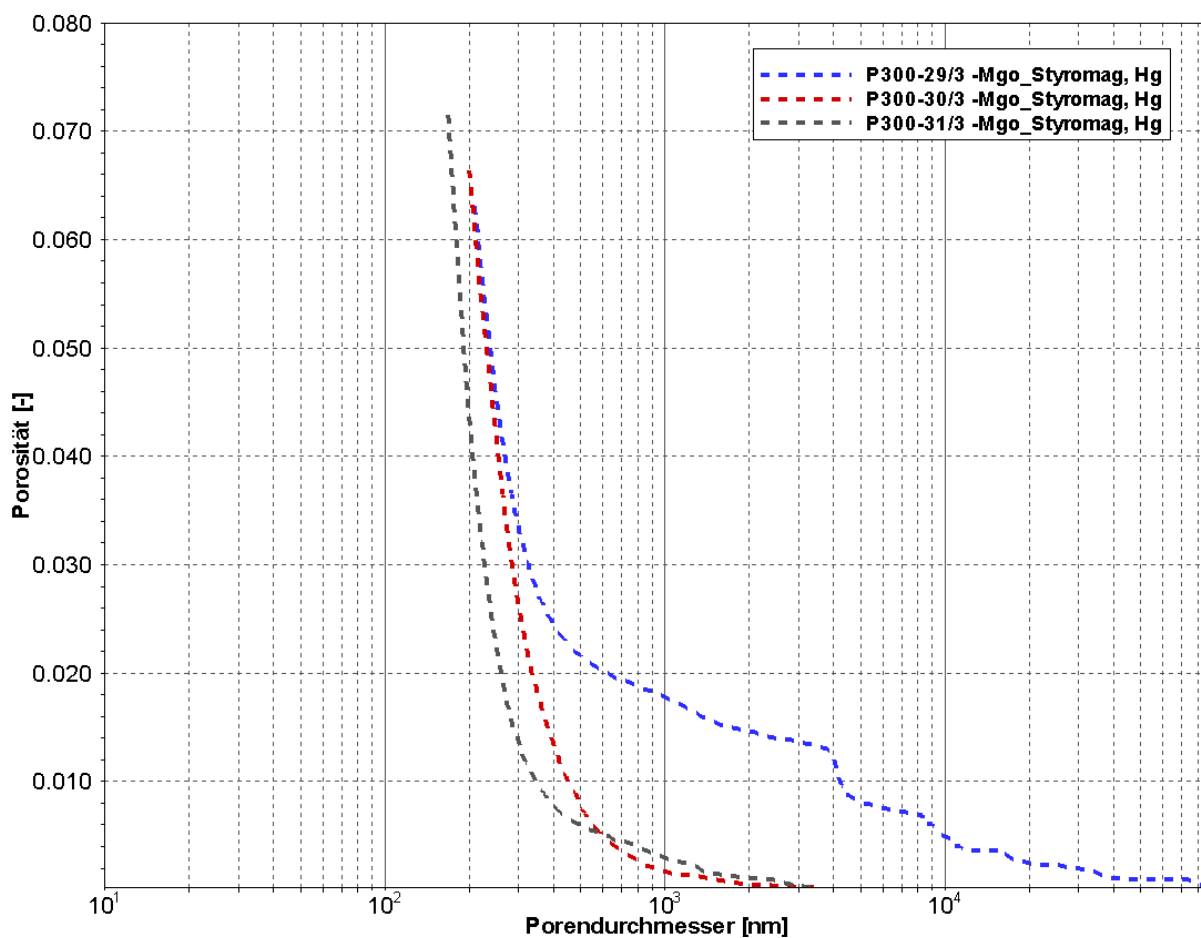


Abbildung 139: Am Baustoff des Bauwerkes mit MIP ermittelte Porosität in Abhängigkeit vom Porendurchmesser

Tabelle 32: Auswertung der Ergebnisse der Quecksilberporosimetrie an Baustoffproben A1 modifizierte Rezeptur

Probe	Lösungsgehalt [60 °C]	minimaler Porenradius ( $\rho_{\max}=413 \text{ MPa}$ )	maximaler Porenradius	n Mikroporen	n Mesoporen	n Makroporen	n Hg-injizierbar
	[-]	[nm]	[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]
P300-29/3	0,060	4	43750	0,015	0,102	0,025	0,141
P300-30/3	0,057	4	1700	0,022	0,112	0,006	0,140
P300-31/3	0,061	4	1650	0,020	0,109	0,008	0,138

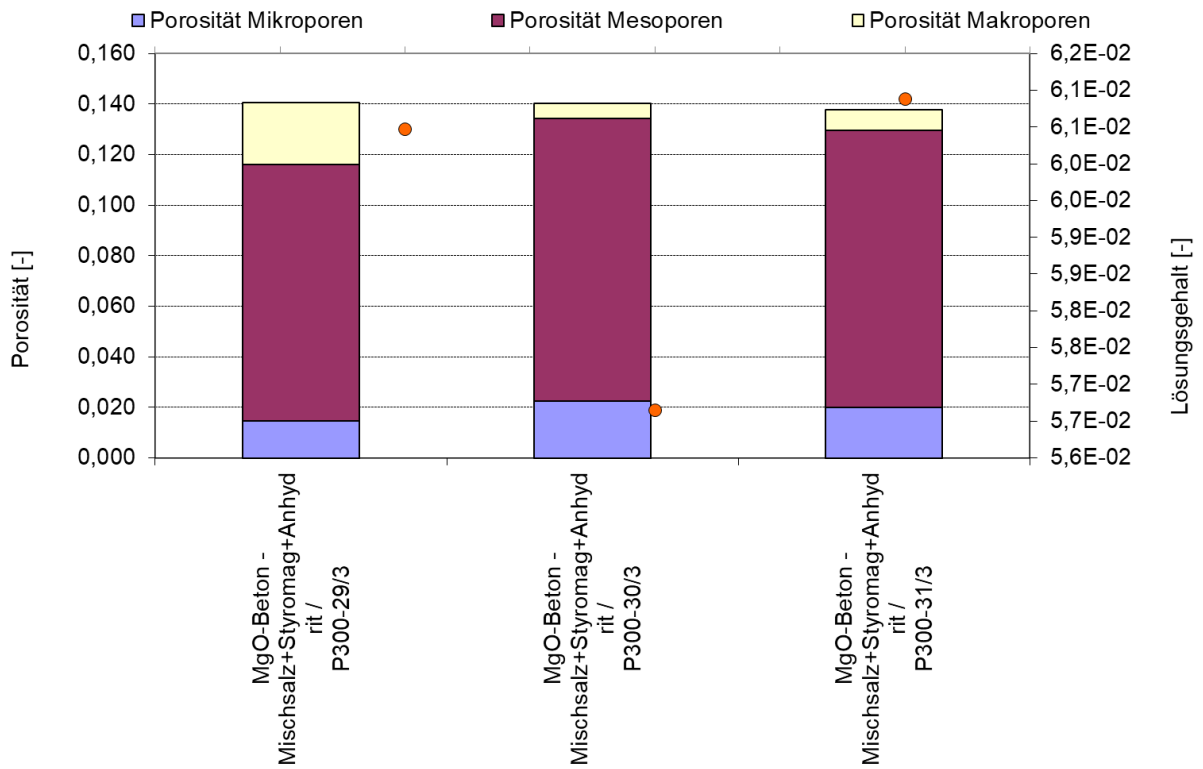
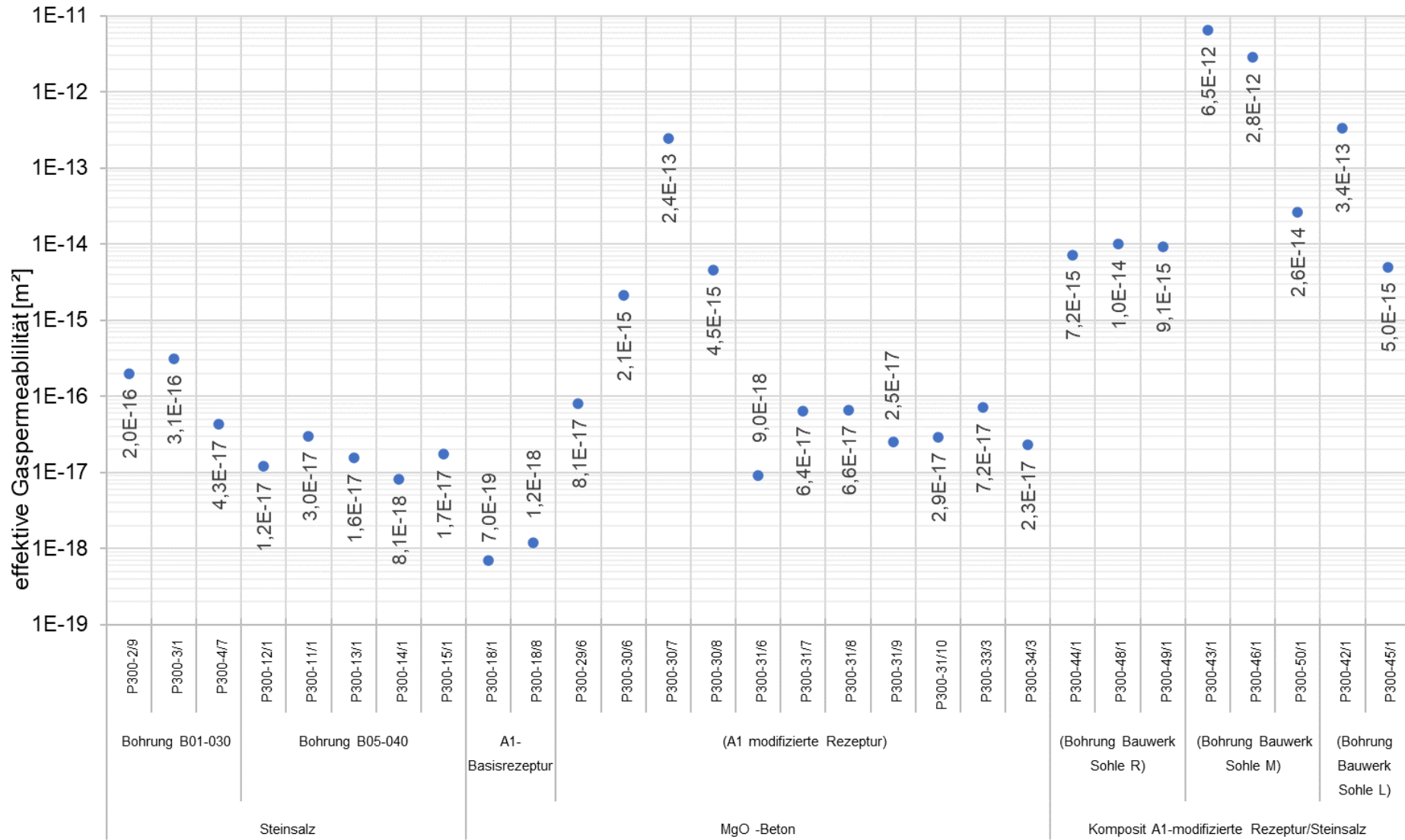


Abbildung 140: An Baustoffproben (A1-modifizierte Rezeptur) ermittelte Porosität mit Einordnung in Porenklassen

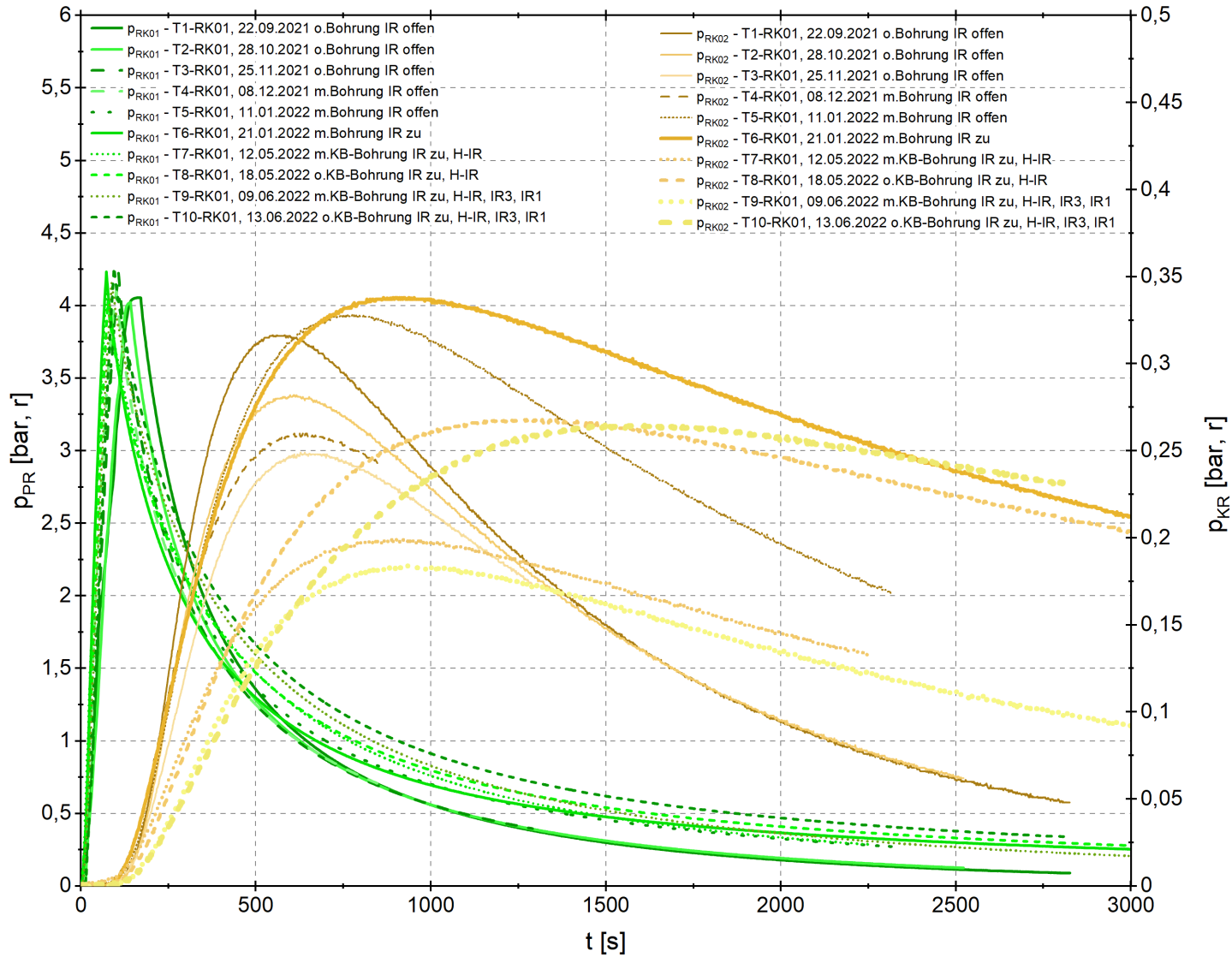
Anlage 11.6 Effektive Gaspermeabilität Steinsalz, Baustoff und Kontaktbereich - ermittelt an Kernproben im Labor



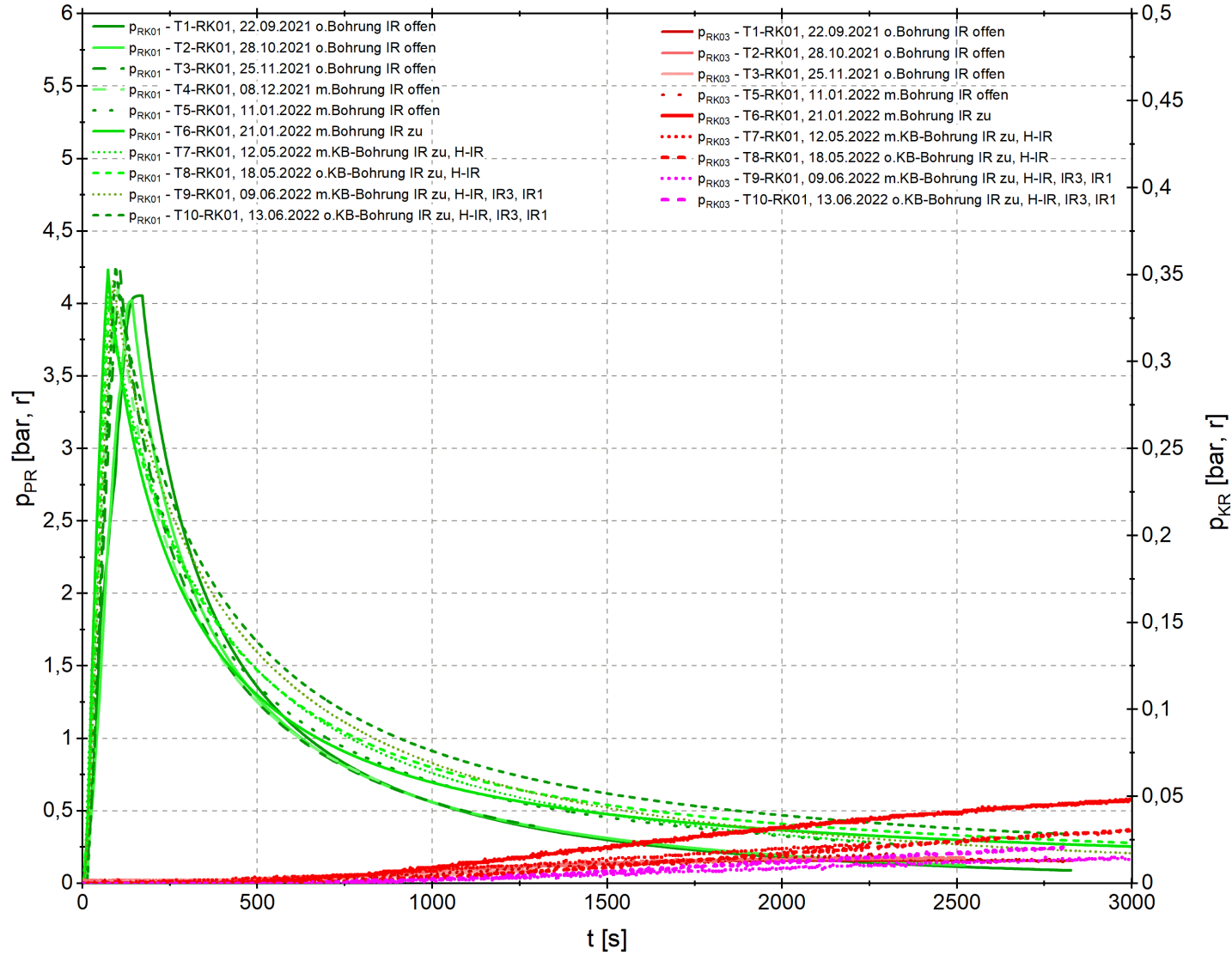
## Anlage 12 Bauwerkstests

### Anlage 12.1 Alle Tests der Ringkammer 1

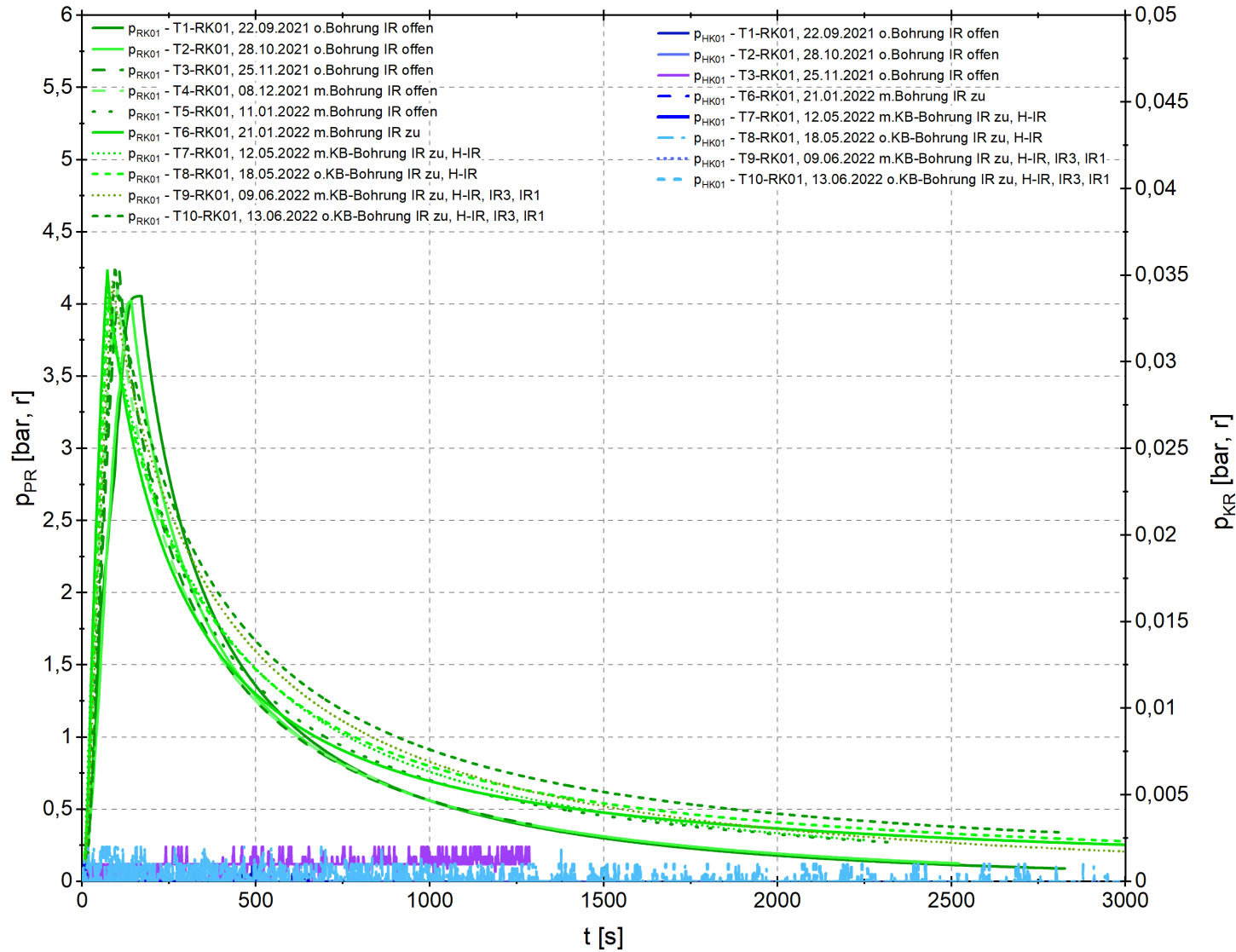
#### Anlage 12.1.1 Test RK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2



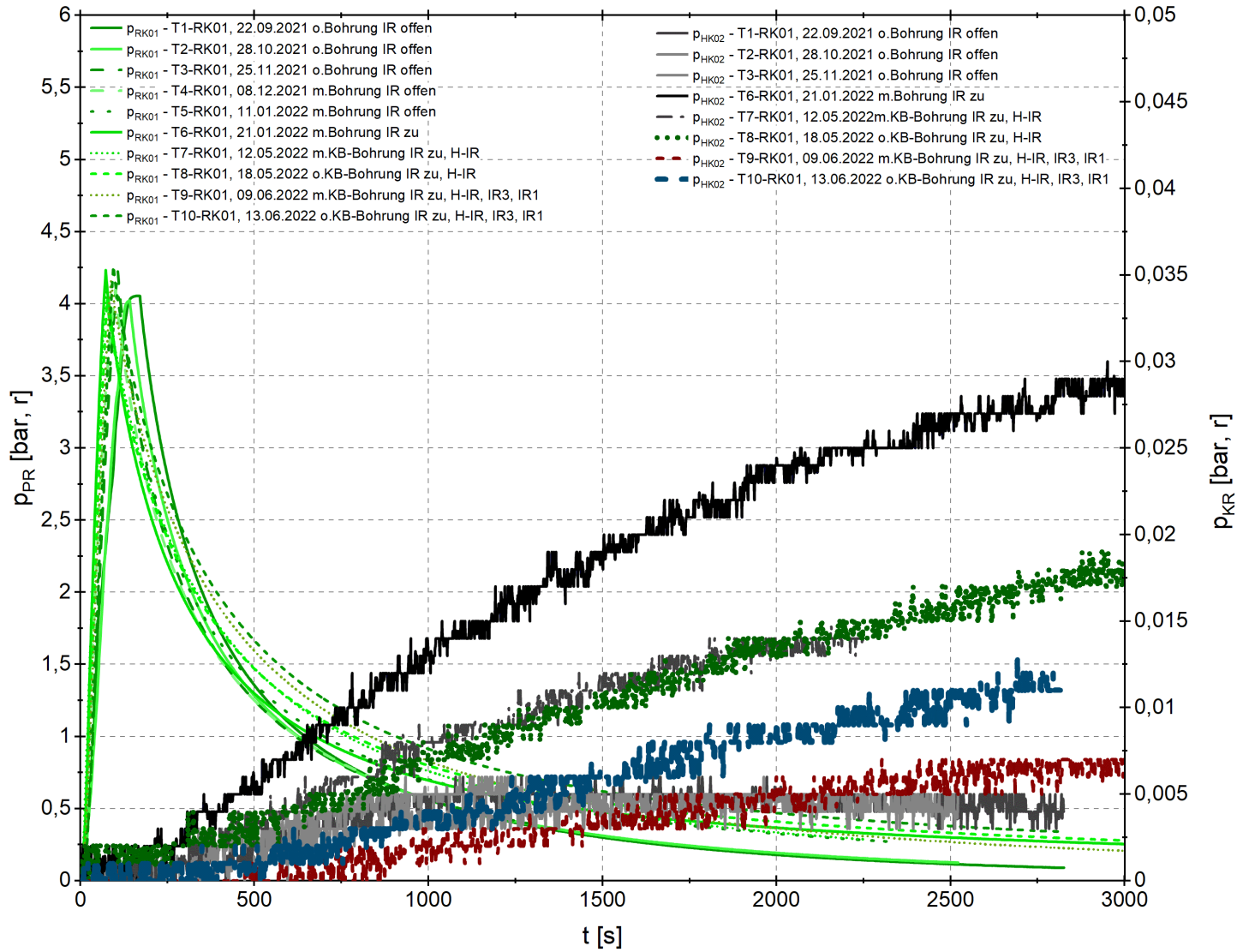
### Anlage 12.1.2 Test RK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3



### Anlage 12.1.3 Test RK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1

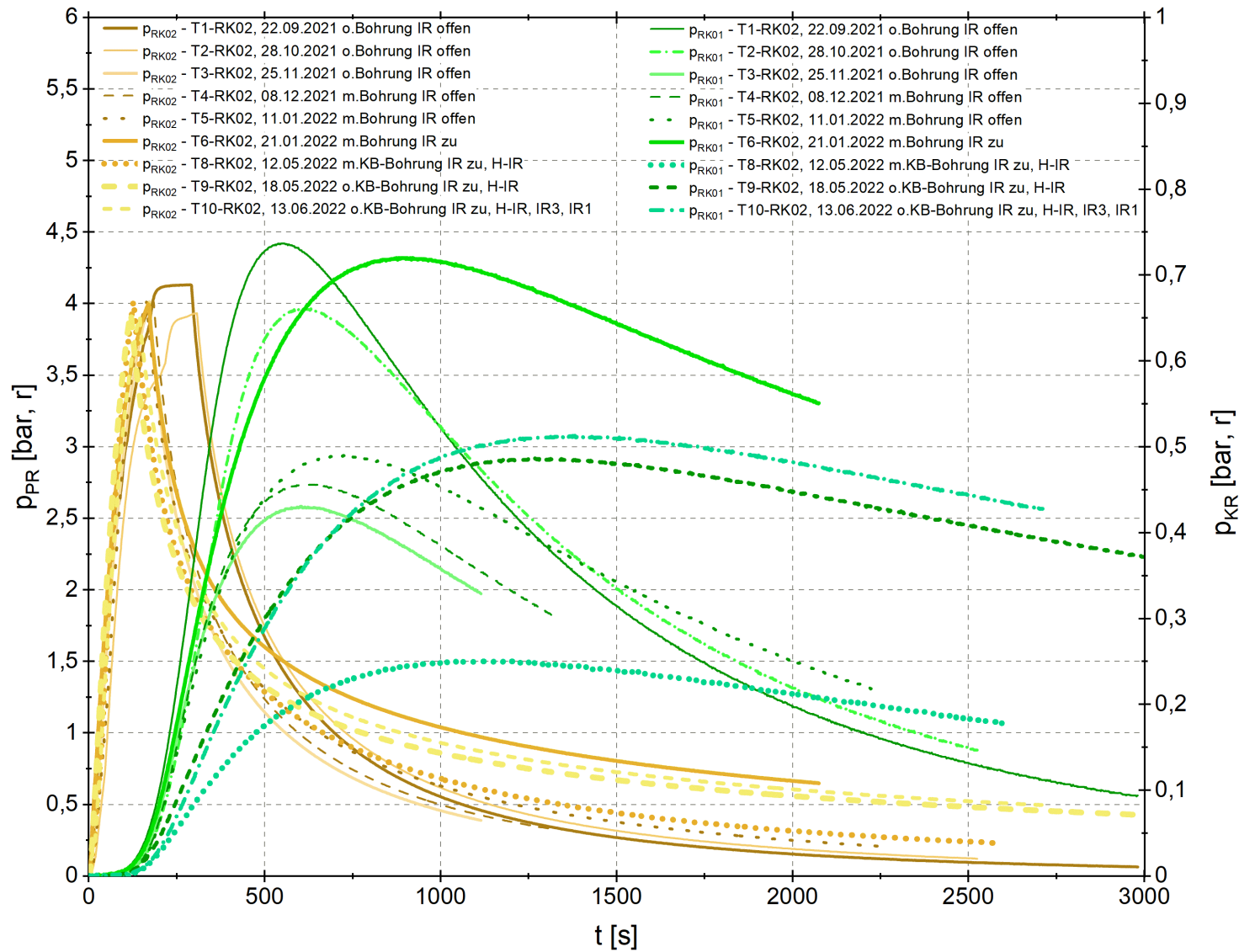


## Anlage 12.1.4 Test RK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2

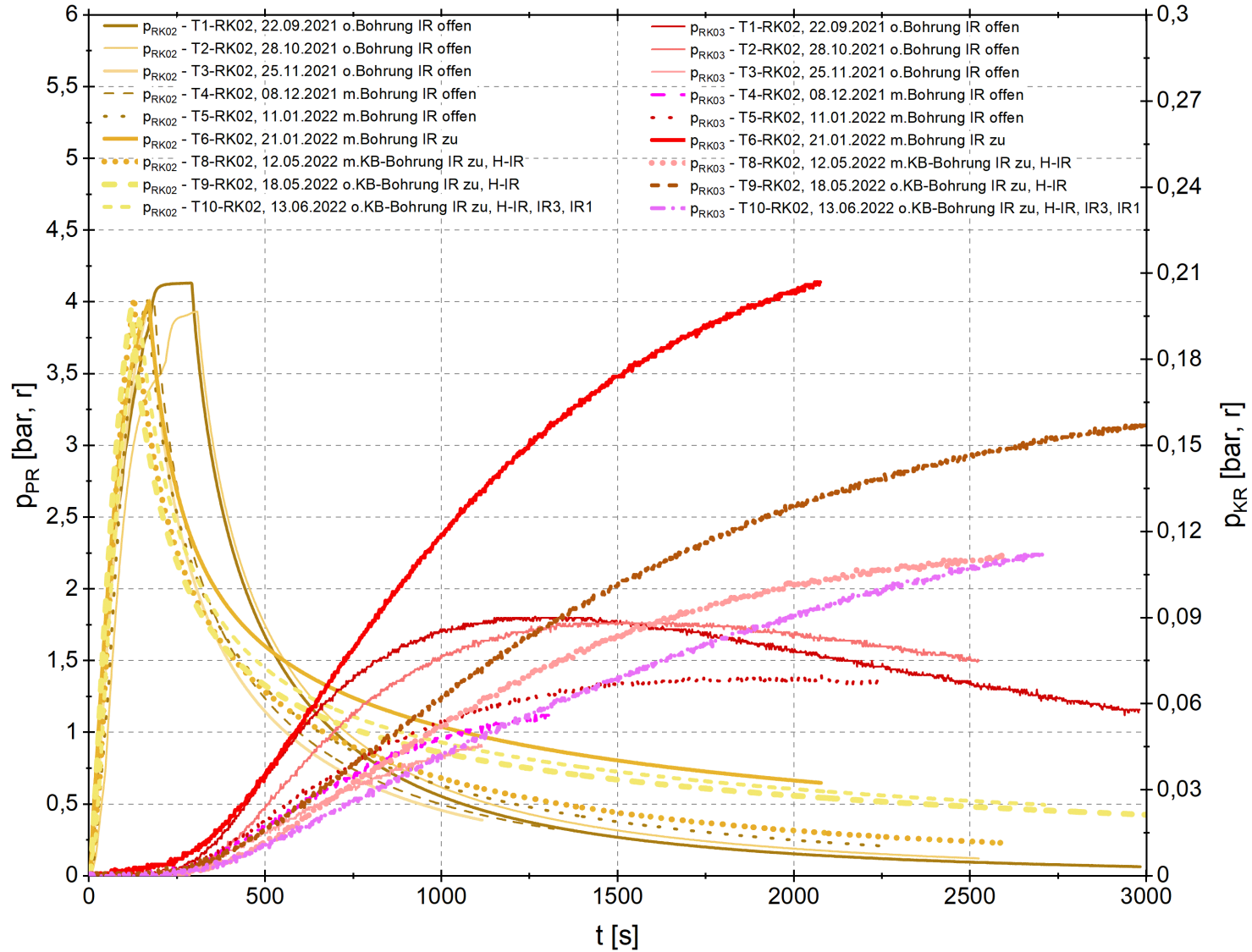


## Anlage 12.2 Alle Tests der Ringkammer 2

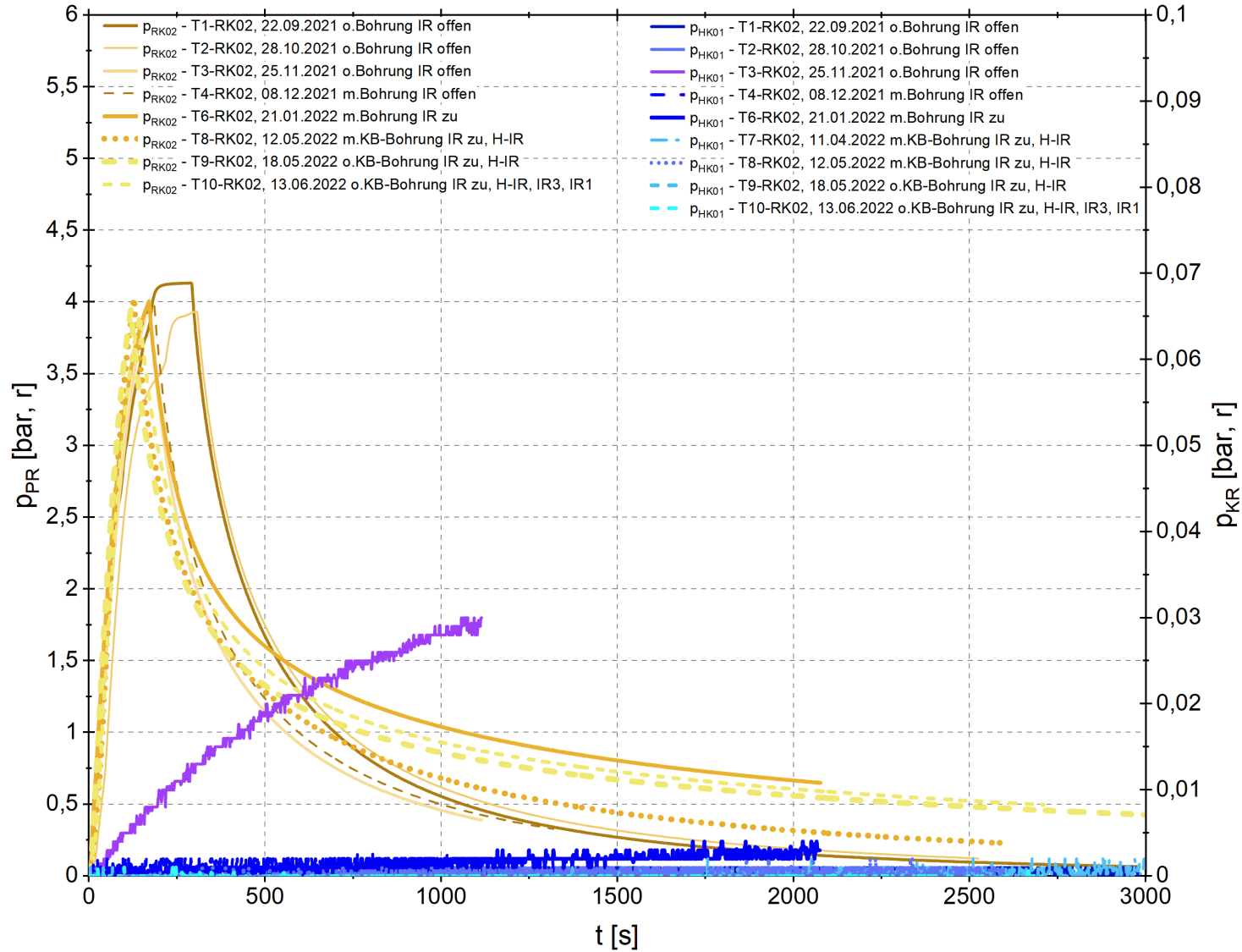
### Anlage 12.2.1 Test RK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1



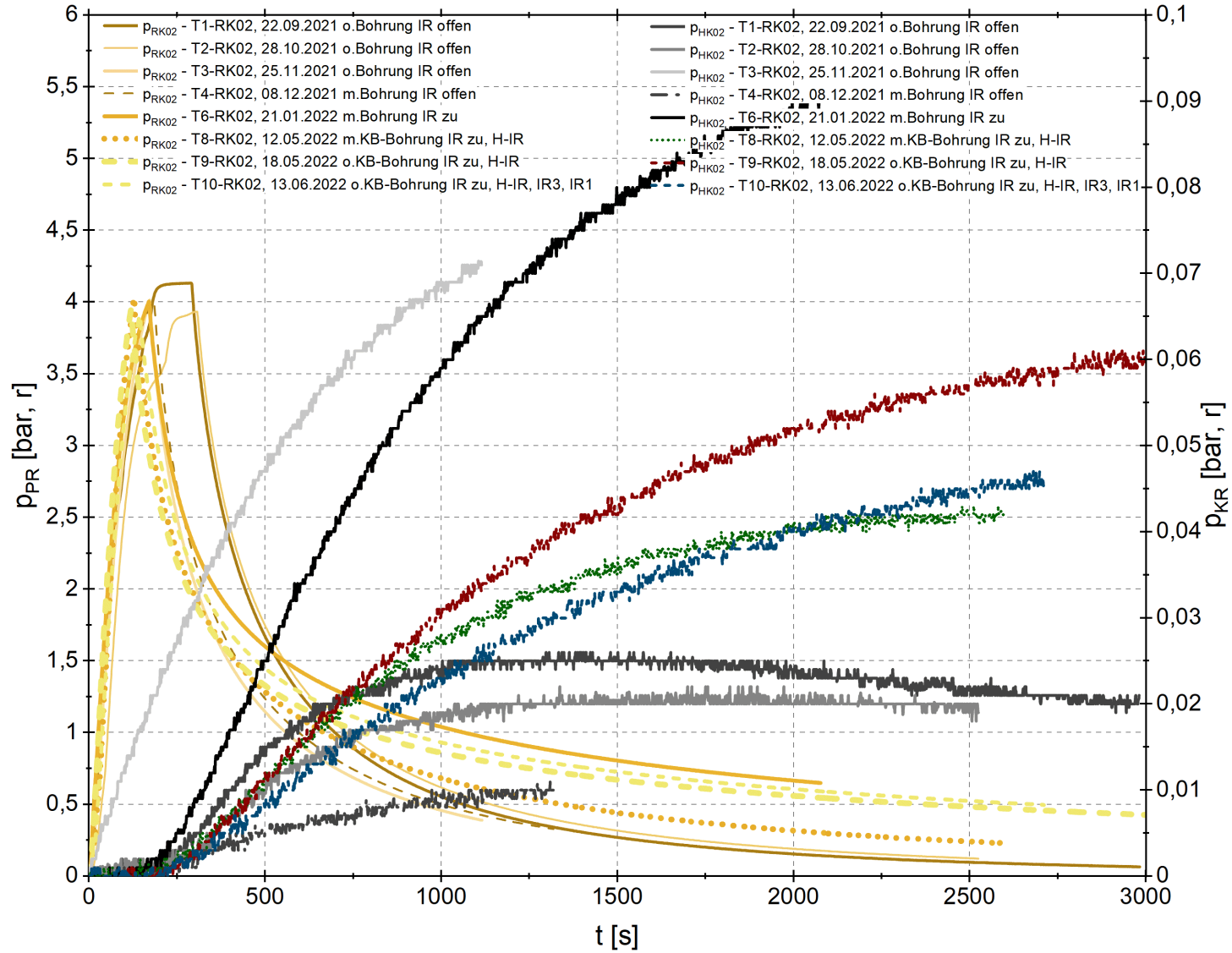
### Anlage 12.2.2 Test RK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3



### Anlage 12.2.3 Test RK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1

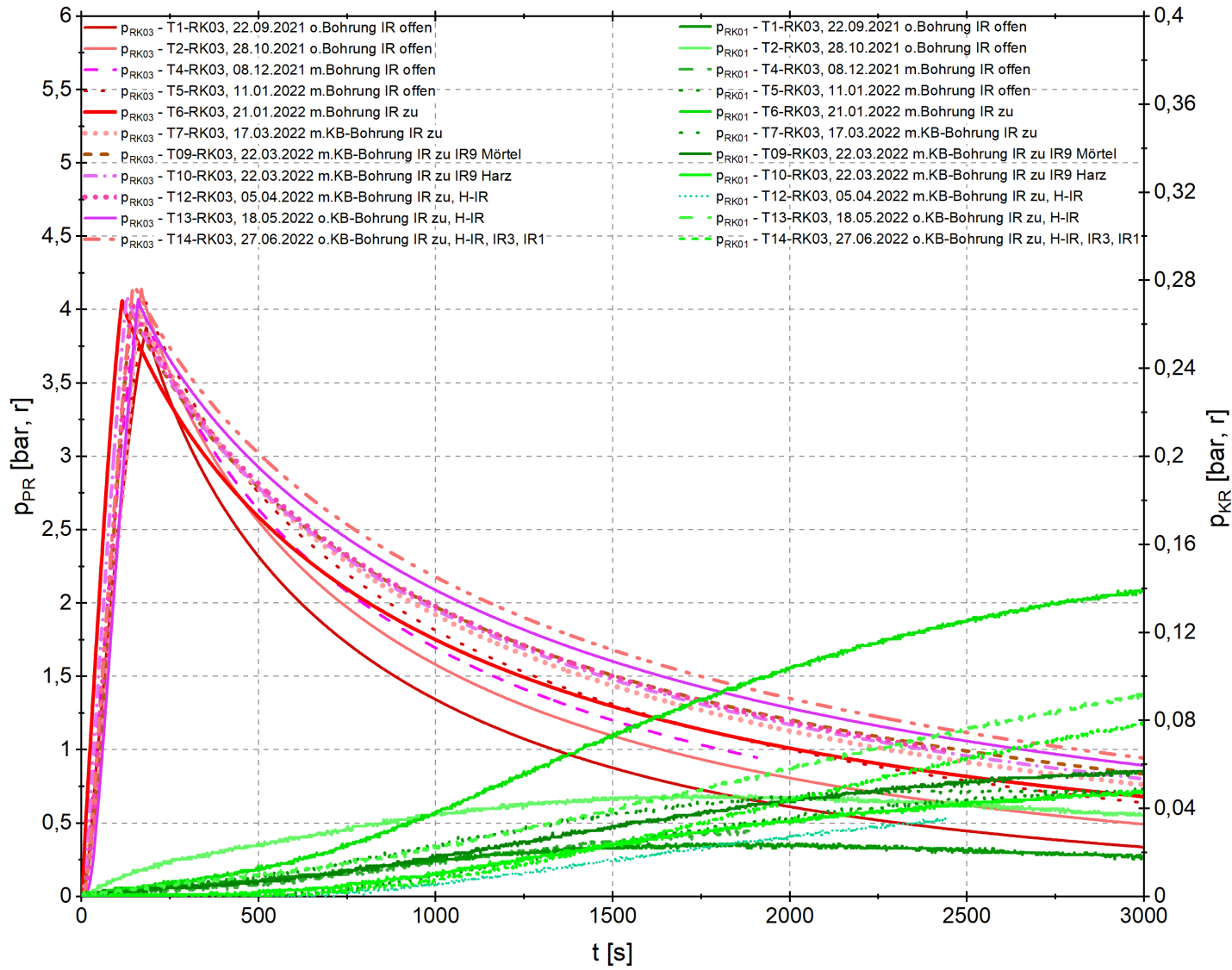


## Anlage 12.2.4 Test RK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2

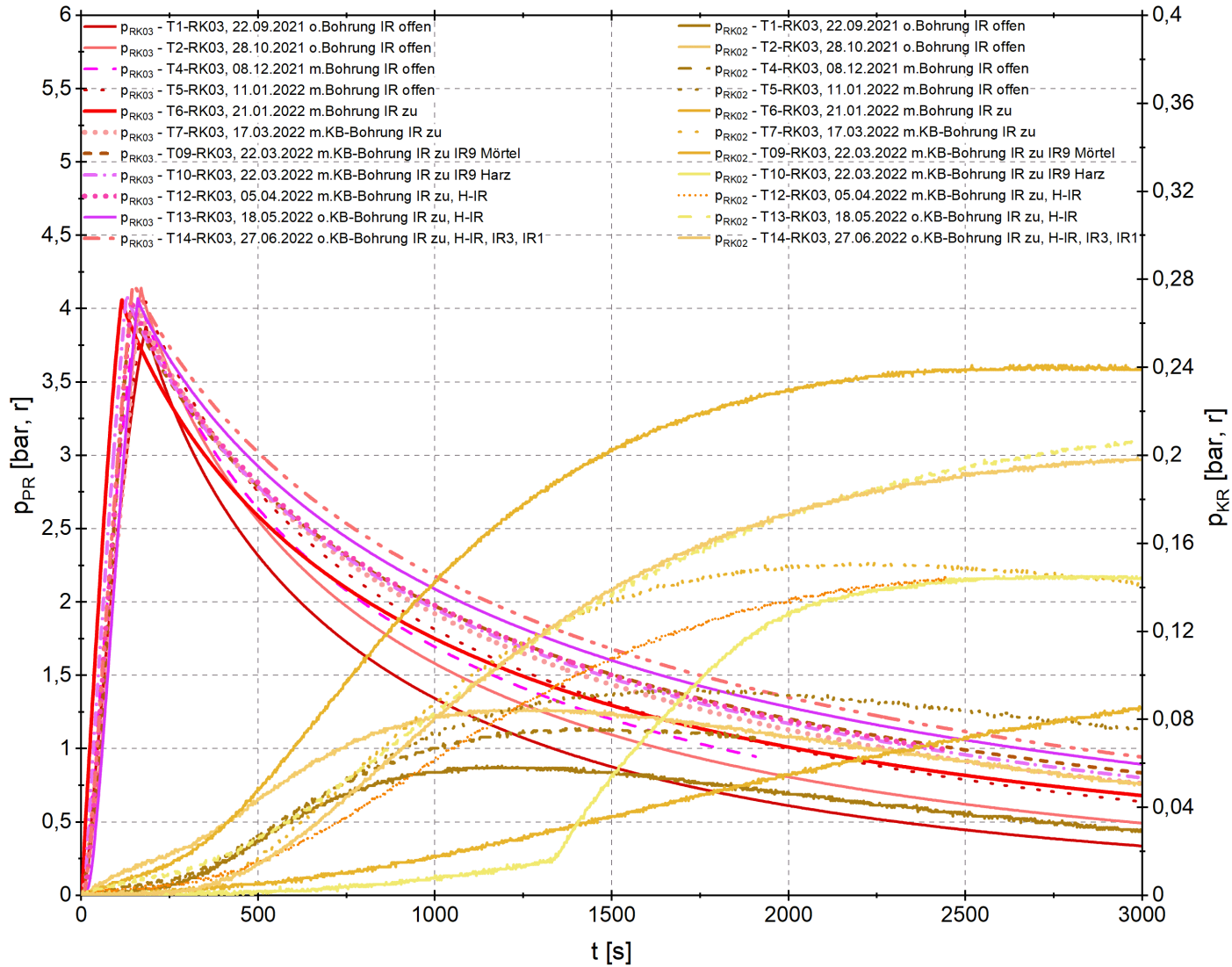


### Anlage 12.3 Alle Tests der Ringkammer 3

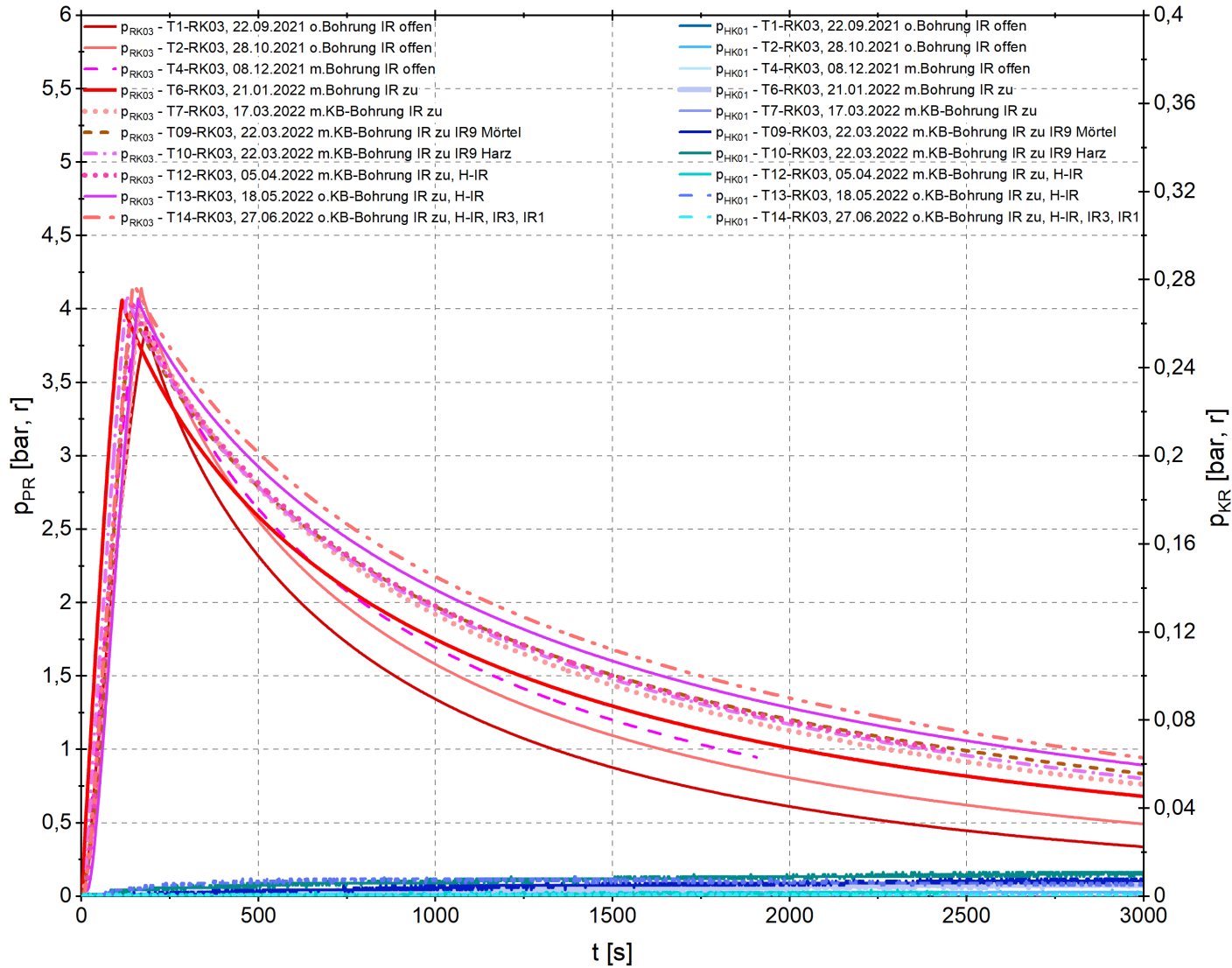
#### Anlage 12.3.1 Test RK03 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1



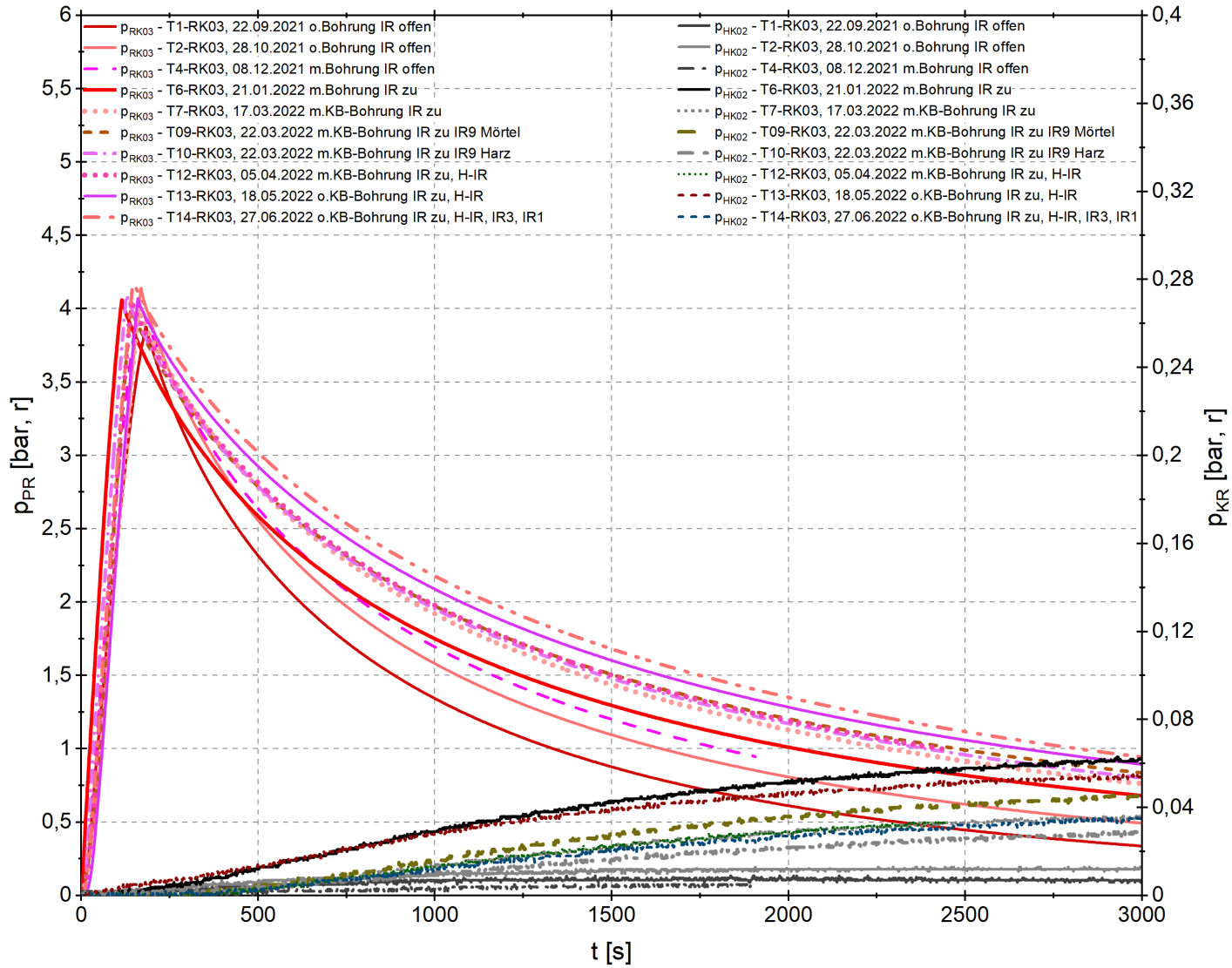
### Anlage 12.3.2 Test RK03 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2



### Anlage 12.3.3 Test RK03 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1

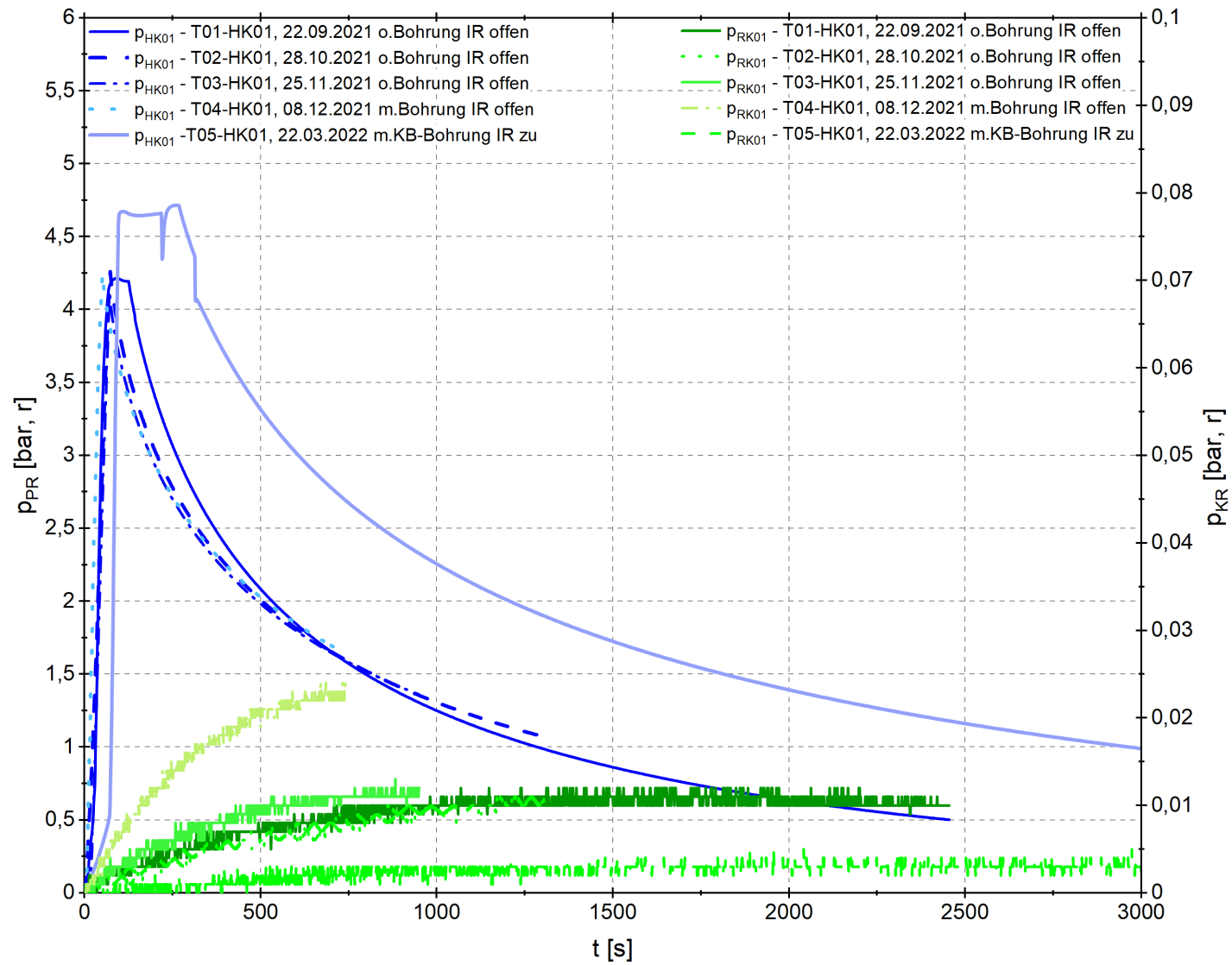


### Anlage 12.3.4 Test RK03 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2

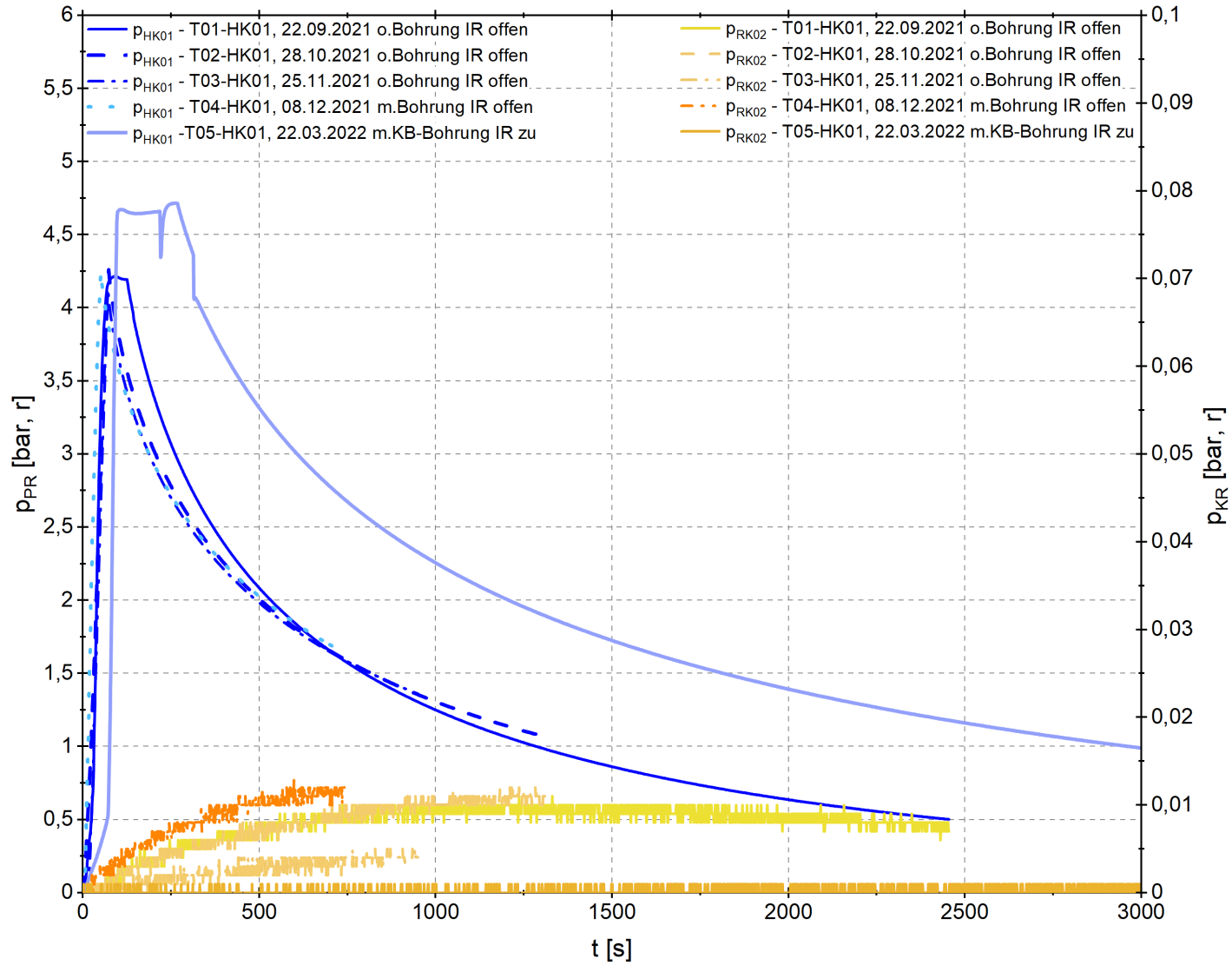


## Anlage 12.4 Alle Tests der Horizontalkammer 1

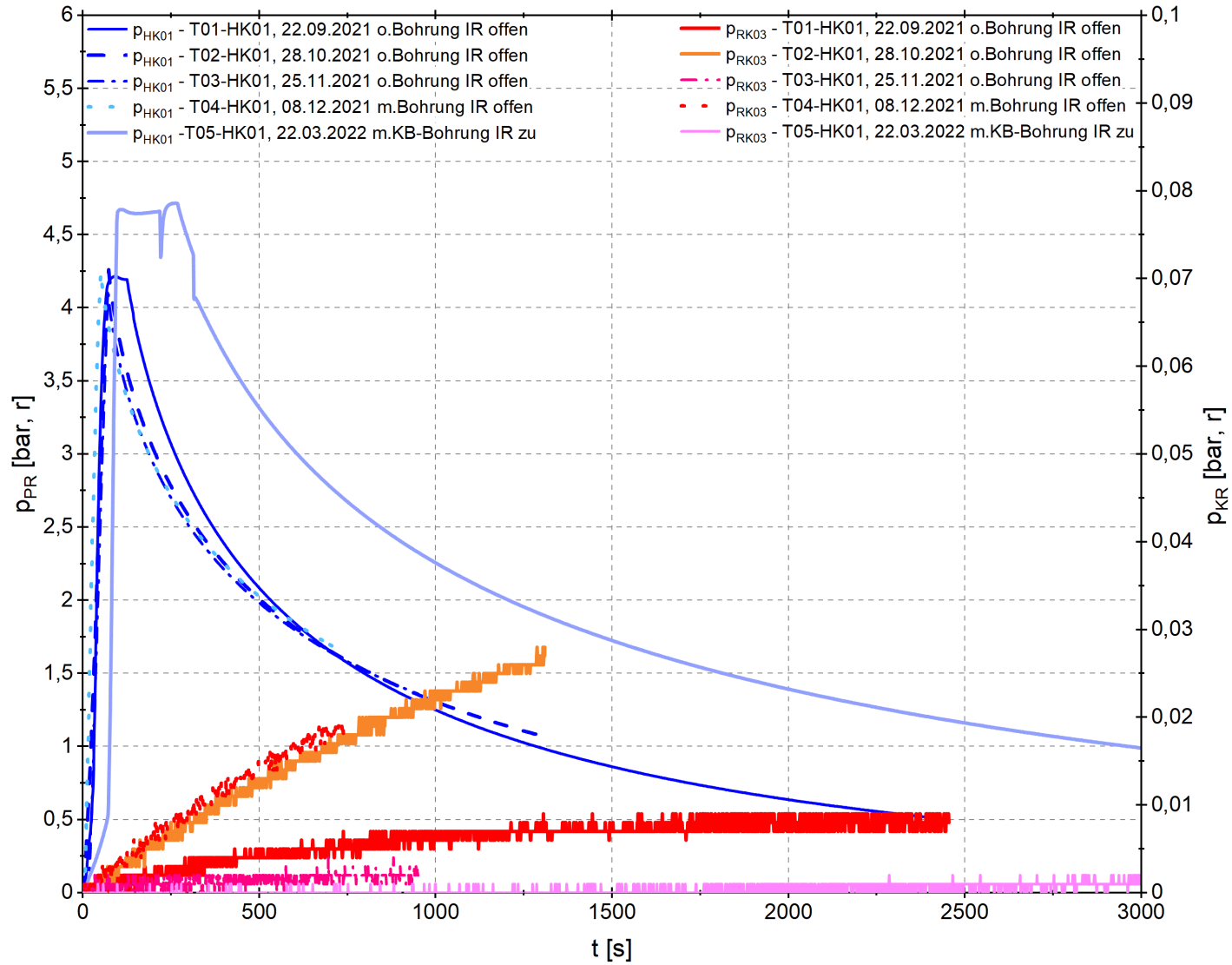
### Anlage 12.4.1 Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1



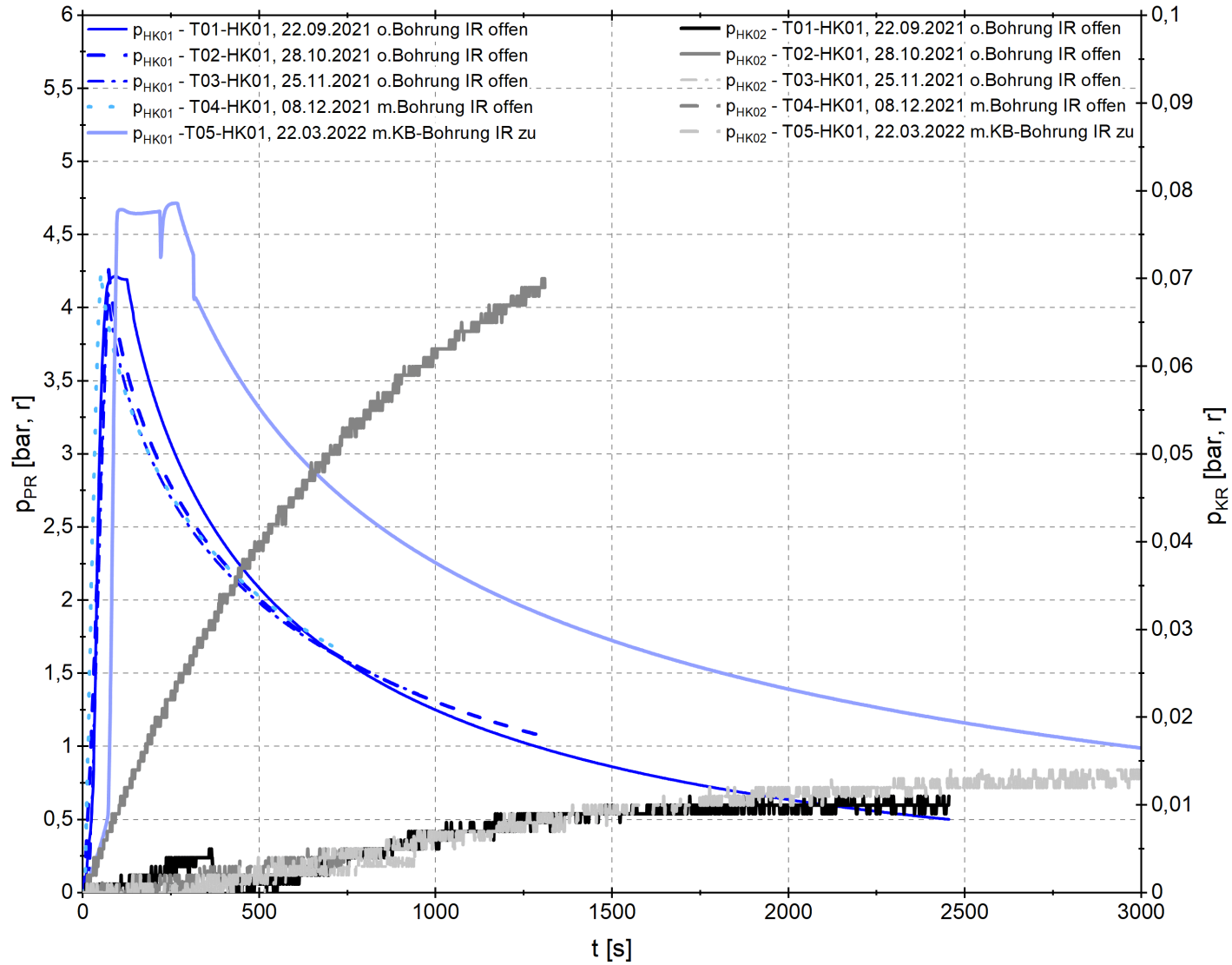
### Anlage 12.4.2 Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2



### Anlage 12.4.3 Test HK01 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3

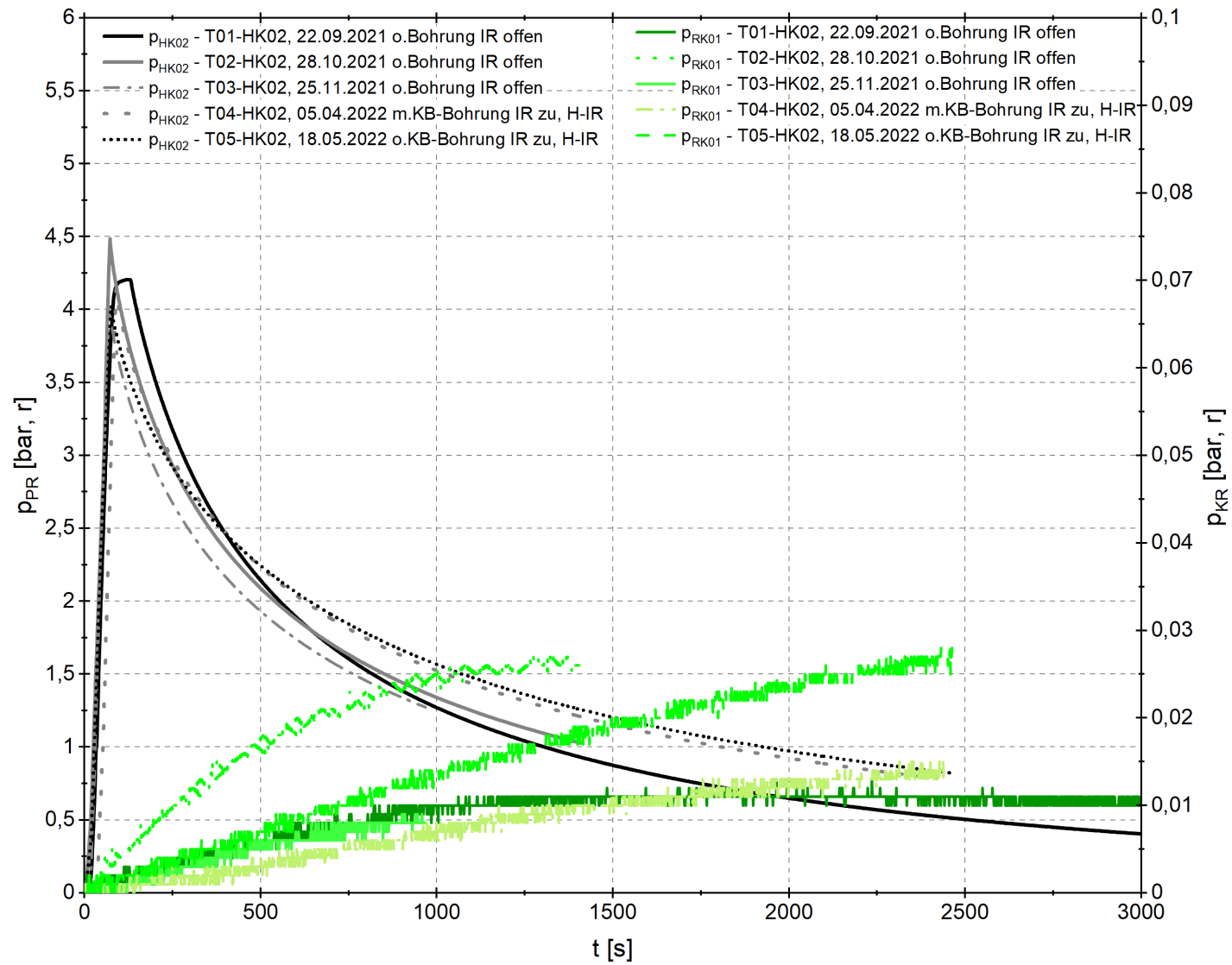


### Anlage 12.4.4 Test HK01 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 2

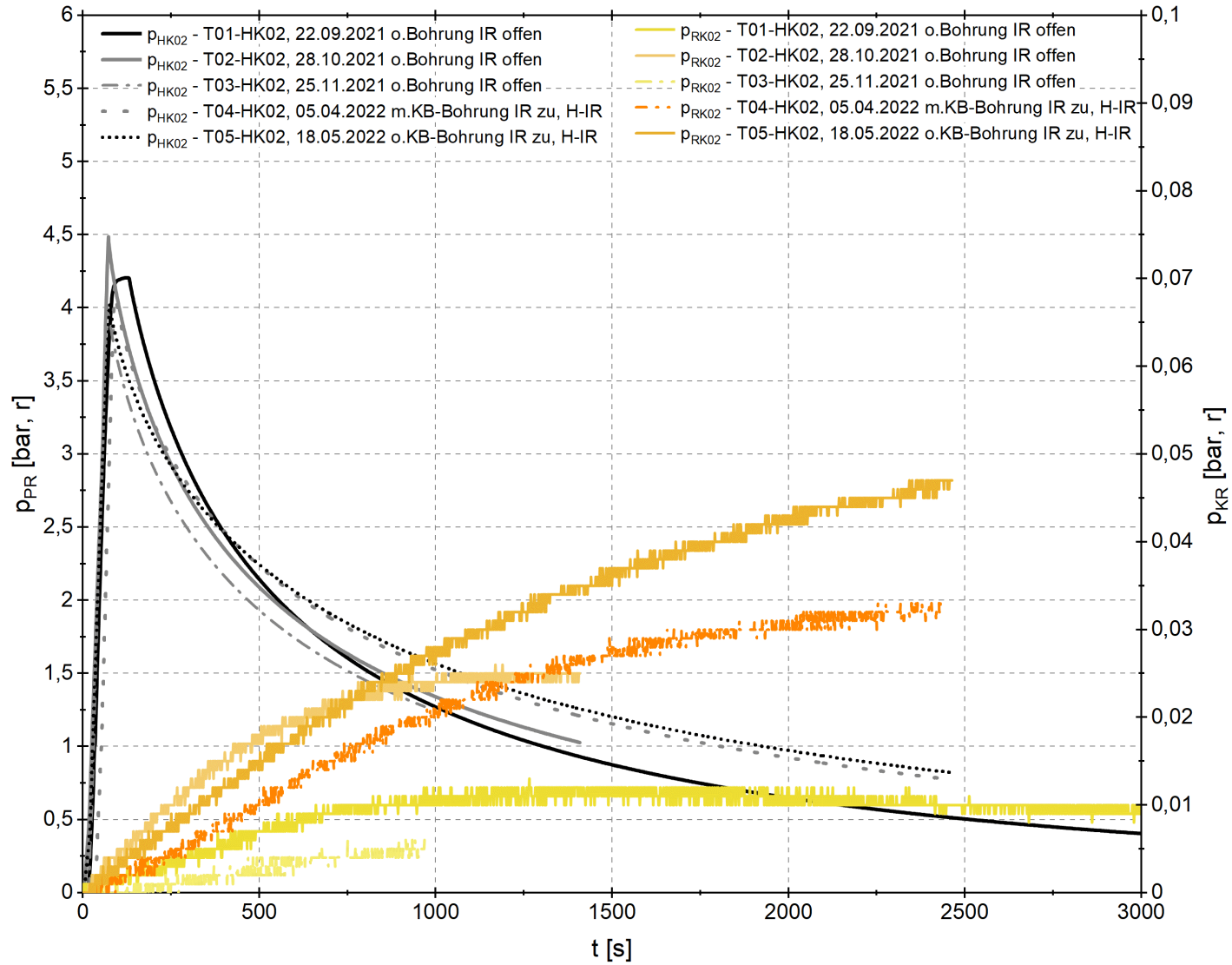


## Anlage 12.5 Alle Tests der Horizontalkammer 2

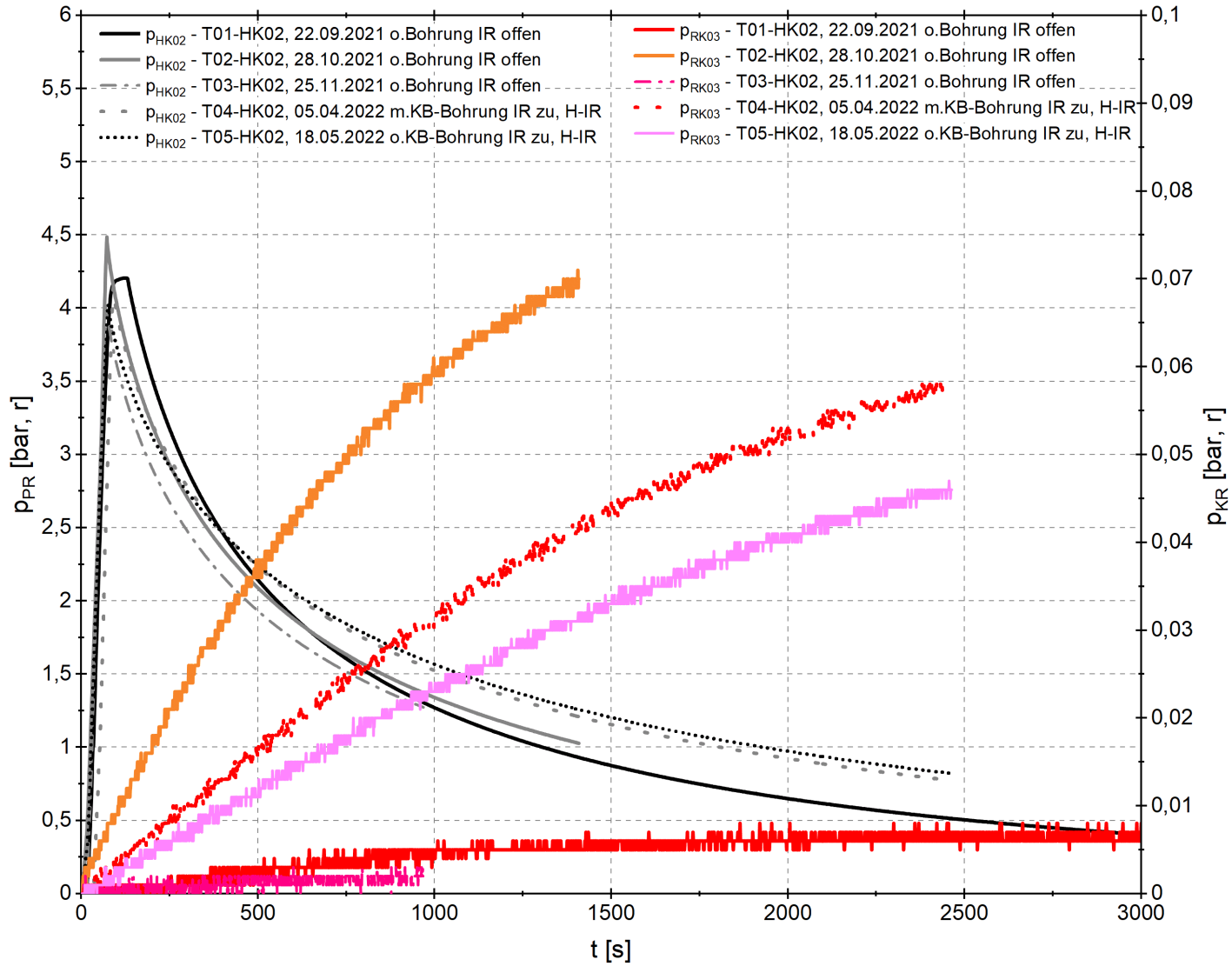
### Anlage 12.5.1 Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 1



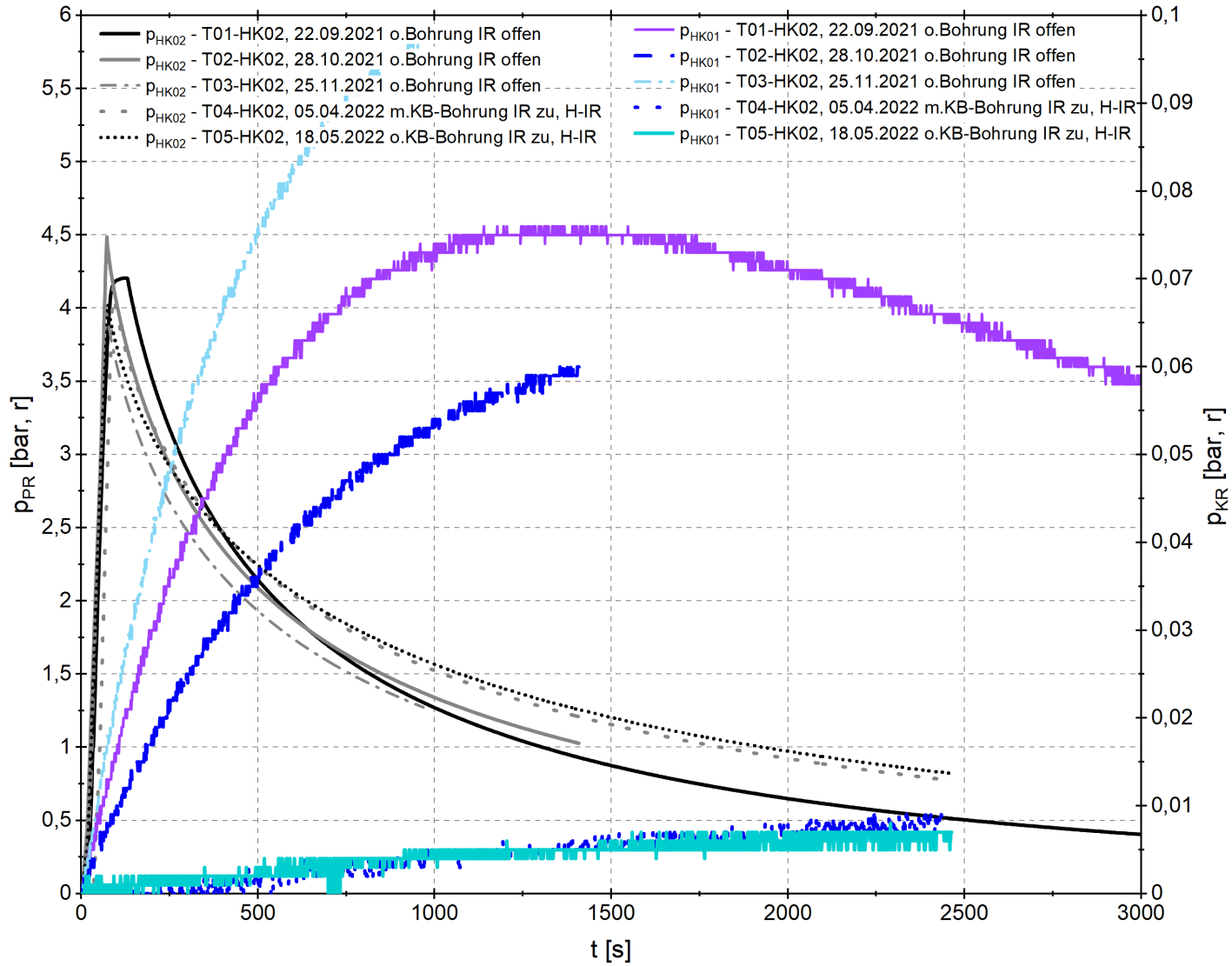
## Anlage 12.5.2 Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 2



### Anlage 12.5.3 Test HK02 - Alle Reaktionen in Ringkammer 3

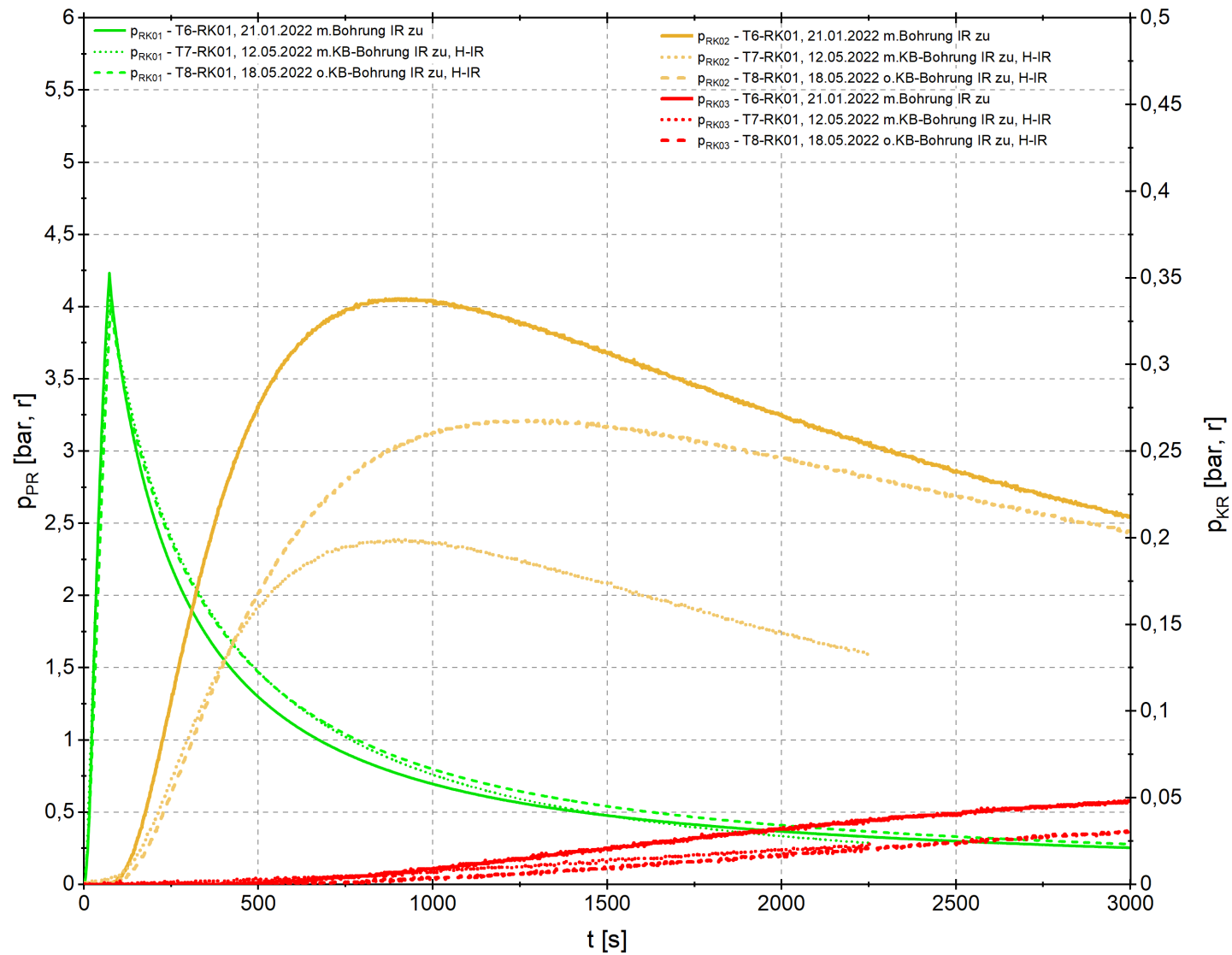


### Anlage 12.5.4 Test HK02 - Alle Reaktionen in Horizontalkammer 1

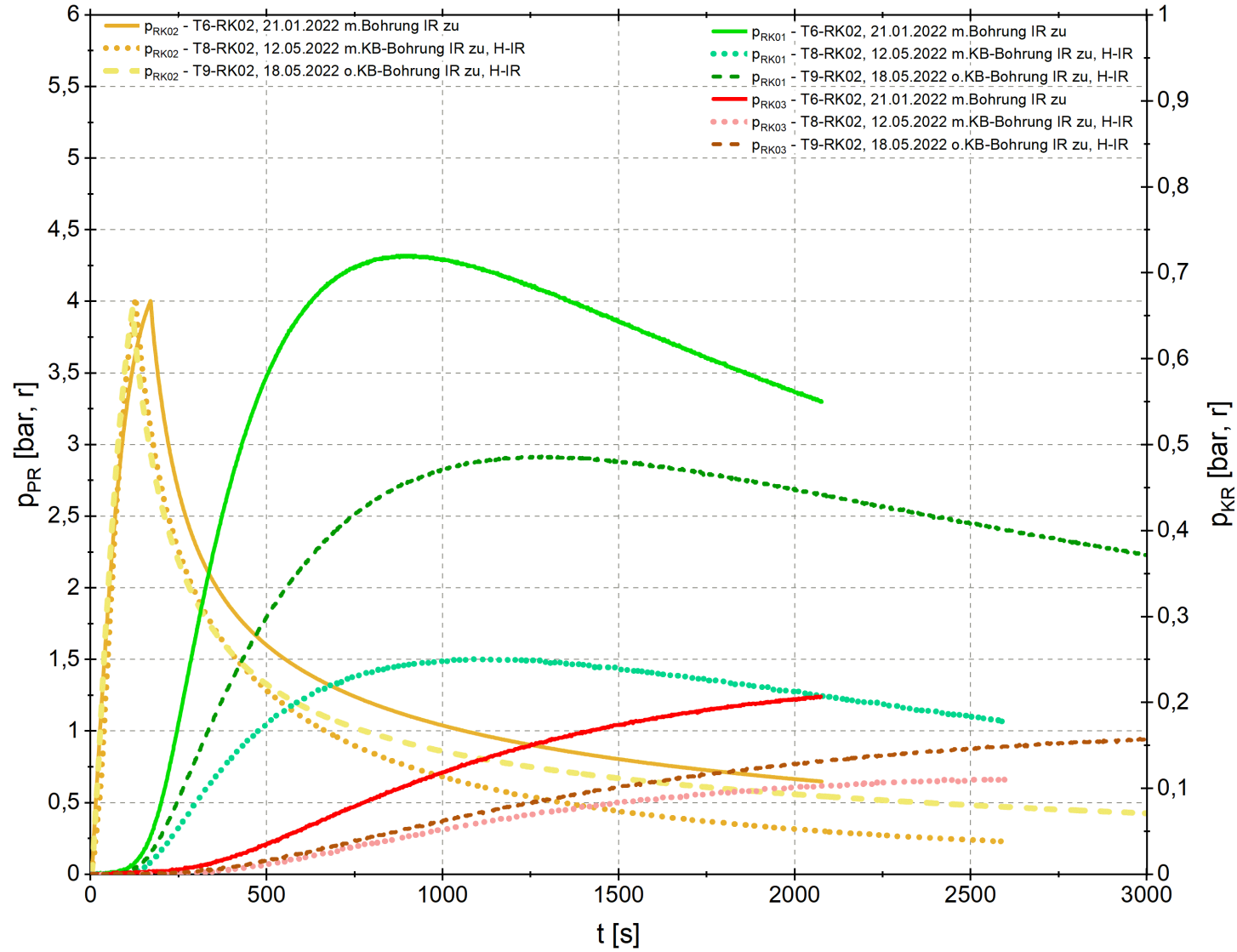


## Anlage 12.6 Ausgewählte Tests zum Einfluss der Erkundungsbohrung B14-164

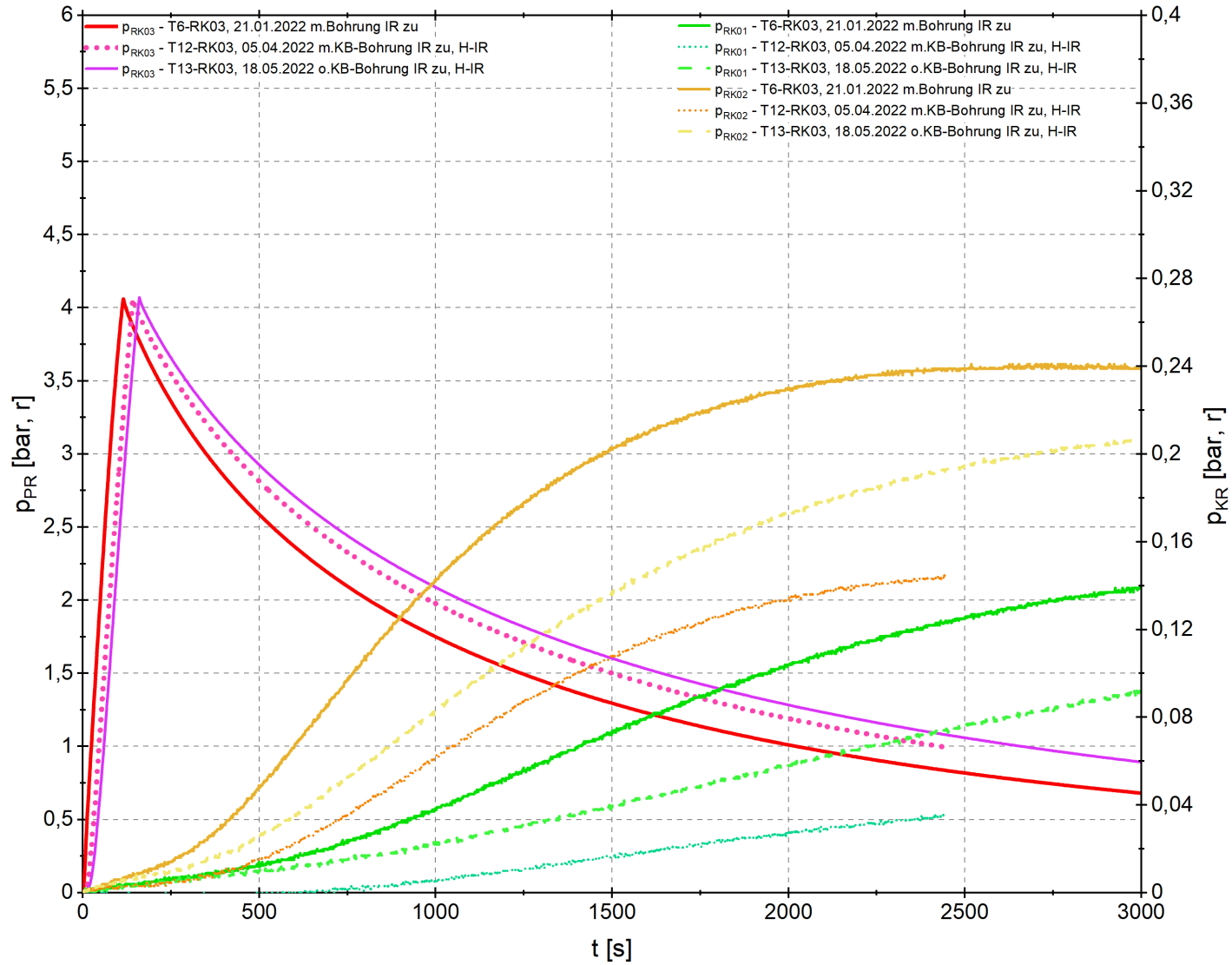
### Anlage 12.6.1 Tests der Ringkammer 1 (RK01)



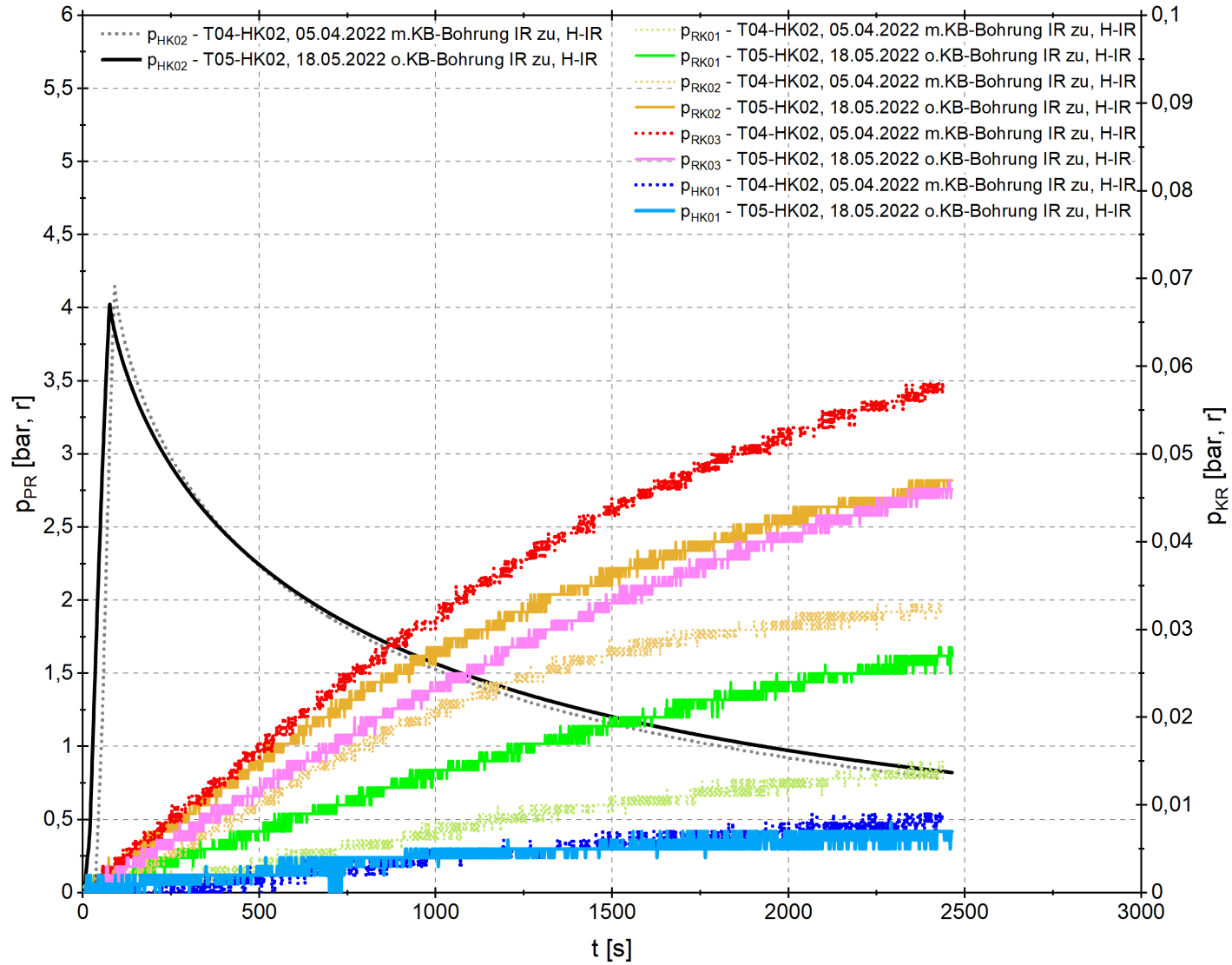
## Anlage 12.6.2 Tests der Ringkammer 2 (RK02)



### Anlage 12.6.3 Tests der Ringkammer 3 (RK03)

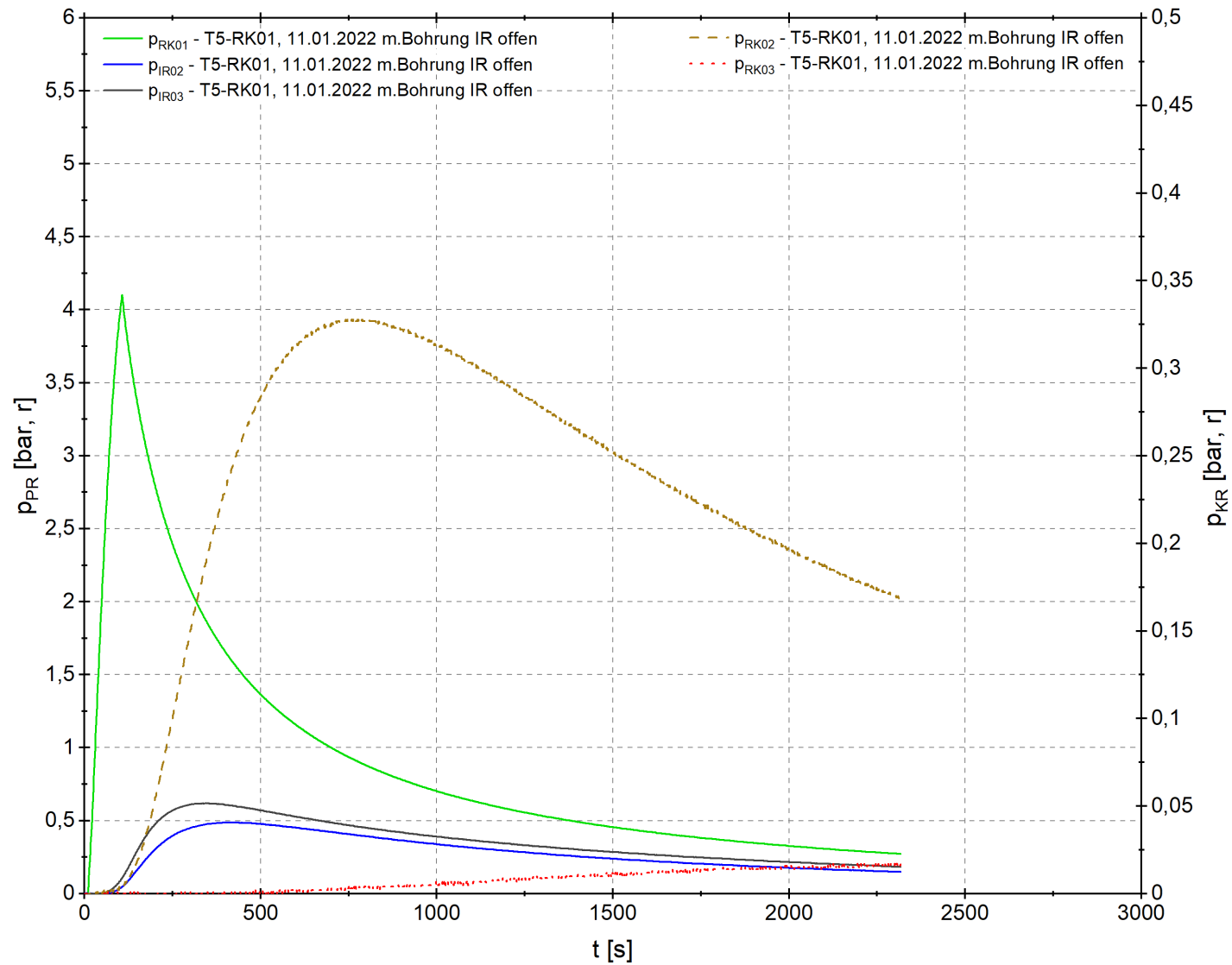


### Anlage 12.6.4 Tests der Horizontalkammer 2 (HK02)

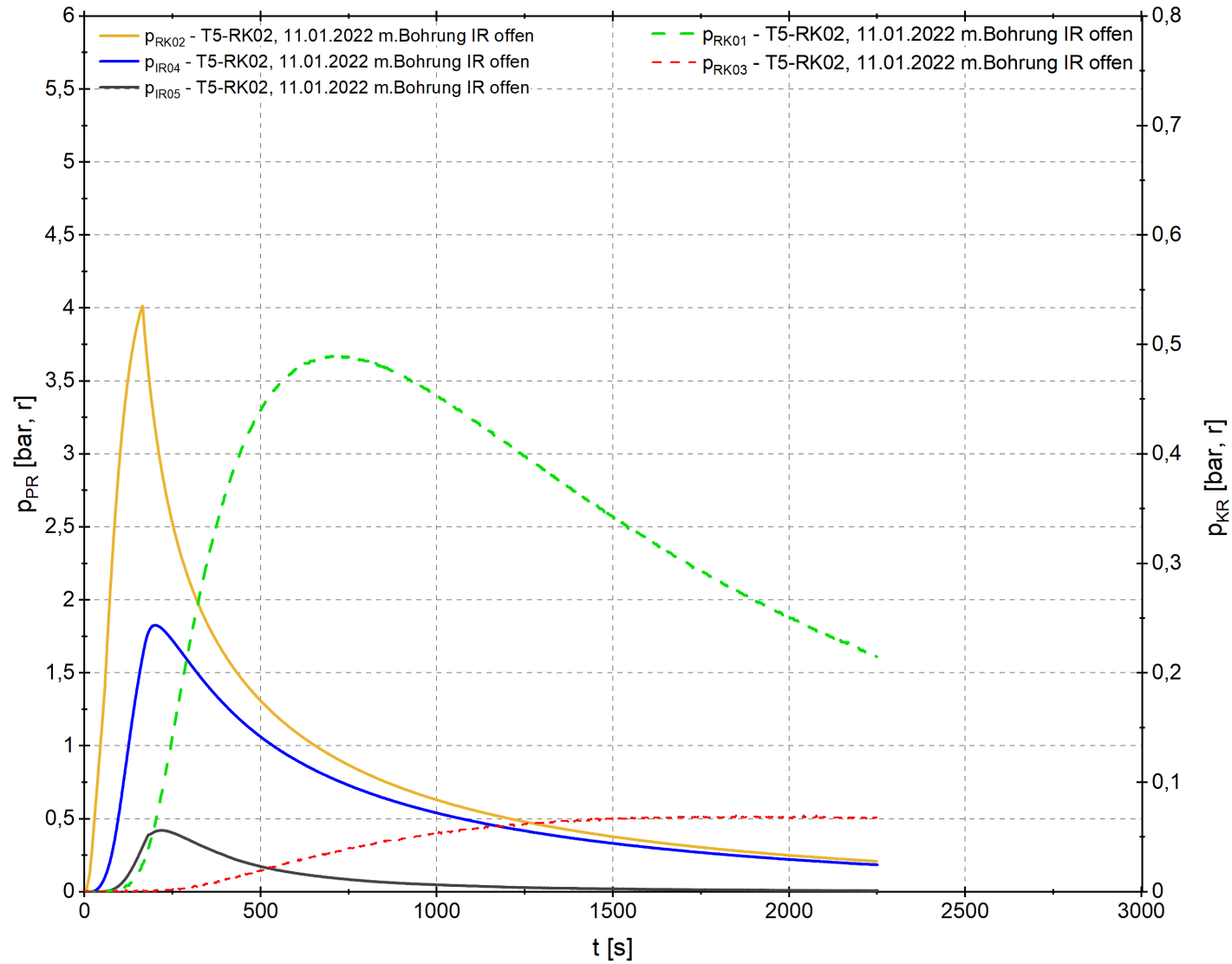


## Anlage 12.7 Druckreaktionen in den angrenzenden Injektionsleitungen

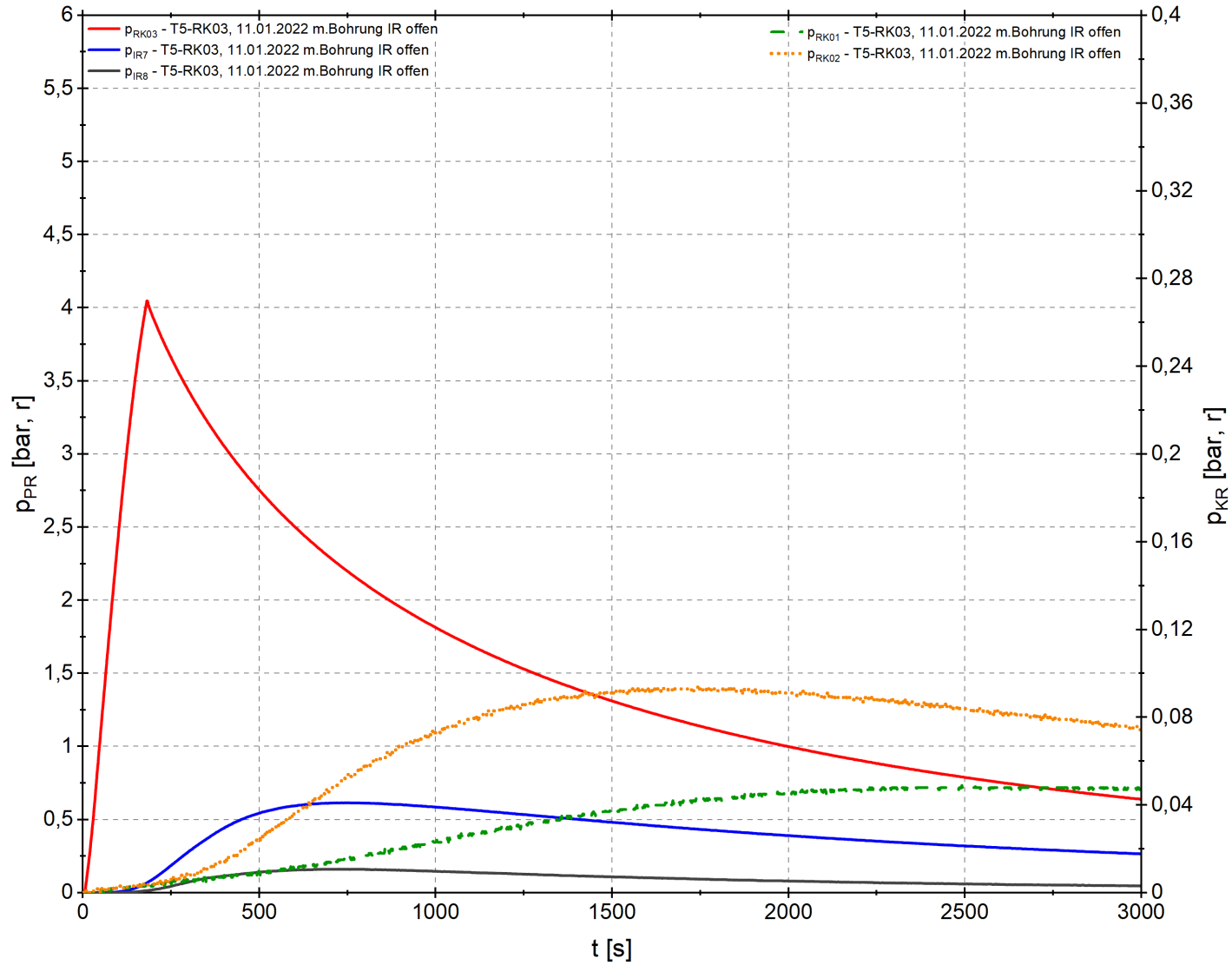
### Anlage 12.7.1 Test der Ringkammer 1 (RK01) – Reaktion in IR02 und IR03



### Anlage 12.7.2 Test der Ringkammer 2 (RK02) – Reaktionen in IR04 und IR05

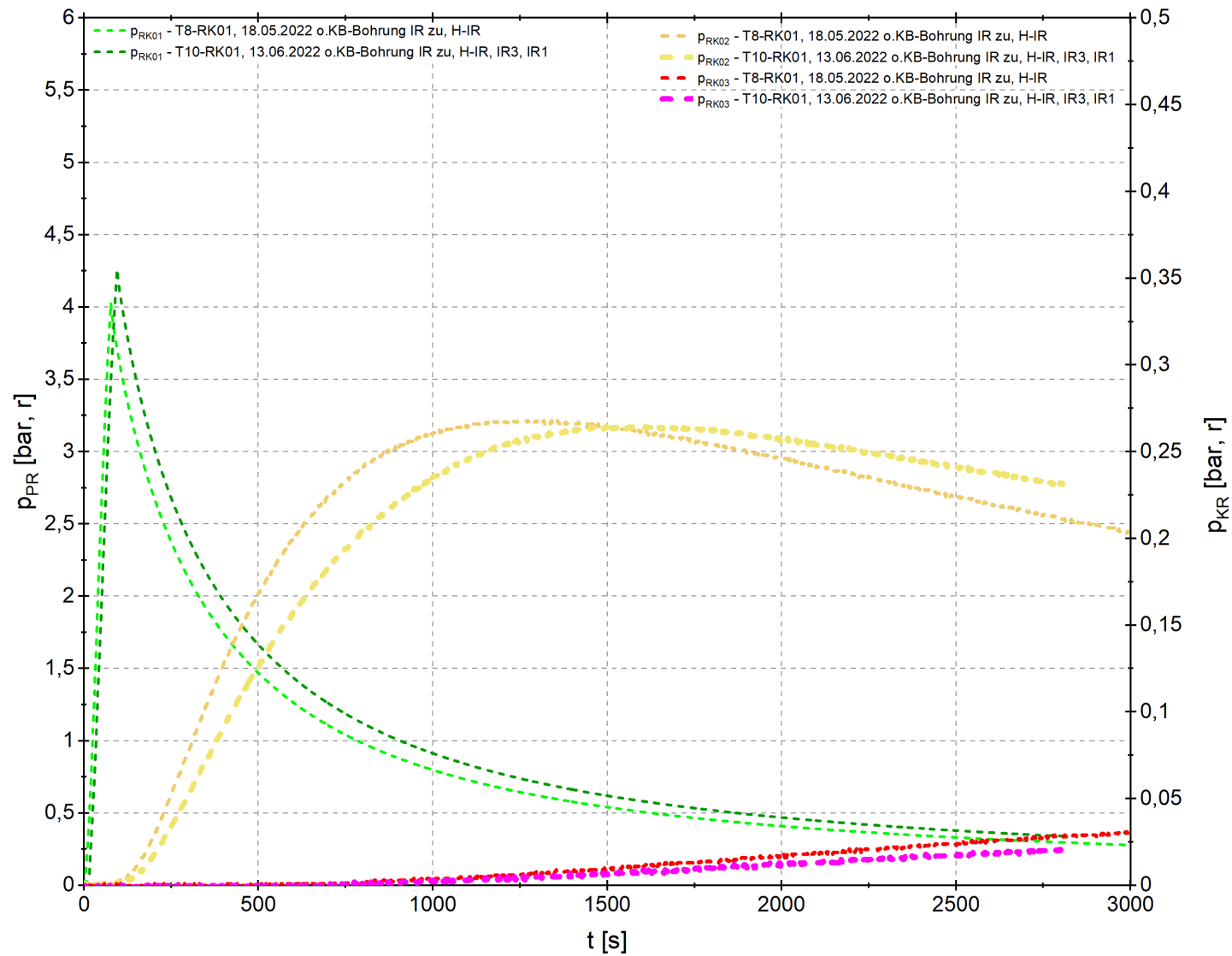


### Anlage 12.7.3 Test der Ringkammer 3 (RK03) – Reaktionen in IR07 und IR08



## Anlage 12.8 Ausgewählte Tests zum Einfluss der Injektionen

### Anlage 12.8.1 Ringkammer 1 (RK01)



## Anlage 12.8.2 Ringkammer 3 (RK03)

