



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Institut für Anorganische Chemie



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5

für das Verbundvorhaben

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

Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen

**Technische Universität Bergakademie
Freiberg**

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

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

BGE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55
D-31224 Peine

Projektleiter: Philipp Herold

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

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

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Freiberg - März 2021

Unter der Mitarbeit der folgenden FuE-Auftragnehmer:

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG)



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



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



TS Bau GmbH, Niederlassung Jena
Geschäftsbereich Bergbau



Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und
Sicherungsgesellschaft mbH



GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH
& Co. KG



INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS.....	3
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	4
TABELLENVERZEICHNIS	8
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	9
VERZEICHNIS DER AUSFÜHRLICHEN TEILBERICHTE	10
VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND INDIZES.....	11
1 VORBEMERKUNGEN.....	12
1.1 ARBEITSSCHRITTE UND BETEILIGTE PERSONEN.....	12
1.2 VORBEMERKUNG ZU DEN EINIGEN BODENMECHANISCHEN PARAMETERN	12
2 WEITERENTWICKLUNG VON ASPHALTDICHTUNGEN (AP 4.5).....	15
2.1 ALLGEMEINES	15
2.2 BOHRLOCHVERSUCHE IM SALINARGEbirge.....	16
2.2.1 Versuchsaufbau BIT-1.....	18
2.2.2 Messprogramm und Ergebnisse des Versuches BIT-1	21
2.2.3 Versuchsaufbau BIT-2.....	24
2.2.4 Messprogramm und Ergebnisse des Versuches BIT-2	27
2.2.5 Rückbau der Bohrlochversuche mit Bitumen im Steinsalz	29
2.2.6 Versuchsaufbau ASP-1	35
2.2.7 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-1	39
2.2.8 Versuchsaufbau ASP-2	46
2.2.9 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-2	48
2.3 BOHRLOCHVERSUCHE IM TONGEBIRGE	51
2.3.1 Versuchsaufbau BIT-3.....	52
2.3.2 Messprogramm und Ergebnisse Versuch BIT-3.....	55
2.3.3 Versuchsaufbau ASP-3	58
2.3.4 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-3	62
2.3.5 Versuchsaufbau ASP-4	67
2.3.6 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-4	71
2.3.7 Rückbau und Nachuntersuchung der Bohrlochversuche im Ton.....	75
2.4 VERGLEICH DER VERSUCHSERGEBNISSE	78
2.4.1 Vergleich der Temperaturentwicklung	78
2.4.2 Vergleich der Druckbeaufschlagung.....	84
2.5 ZUSAMMENFASSENDE WERTUNG ZUM ARBEITSSCHRITT 4.5.....	86
LITERATURVERZEICHNIS.....	88

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersicht Versuchsnische 2 in Sondershausen.....	16
Abbildung 2: Lage der Bohrlochversuche in der Versuchsnische 2.....	17
Abbildung 3: Herstellung der Versuchsbohrlöcher in der Versuchsnische 2	17
Abbildung 4: Lage des Versuchs BIT-01 in der Versuchsnische 2	18
Abbildung 5: Aufbau BIT-01	19
Abbildung 6: Schematische Position der Sensoren im Bitumen (Bit-1)	20
Abbildung 7: Fertig gestellte Druckkammer und die positionierten Temperatugeber der unteren Sperrbitumenschicht	20
Abbildung 8: Detailansicht des Temperatursensors an der Bohrlochwandung für die untere Sperrbitumenschicht	20
Abbildung 9: Verguss des Abdichtbitumens AZALT 70/100	21
Abbildung 10: Oberfläche der abgekühlten oberen Sperrschicht	21
Abbildung 11: Temperaturverlauf im Versuch BIT-1	22
Abbildung 12: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-1 bei einer Gasdruckbelastung von 0,12 MPa.....	22
Abbildung 13: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-1 bei einer Gasdruckbelastung von 1,05 MPa.....	23
Abbildung 14: Lage des Versuchs BIT-2 in der Versuchsnische 2	24
Abbildung 15: Aufbau BIT-2	24
Abbildung 16: Rundkornschotter in der Druckkammer	25
Abbildung 17: Oberfläche der abgekühlten unteren Sperrschicht aus STELOX 85/25	25
Abbildung 18: Oberfläche des Abdichtbitumens AZALT 70/100 ca. 4 h nach Einbau	26
Abbildung 19: Oberfläche der abgekühlten oberen Sperrschicht	26
Abbildung 20: Aufbau der Kontrollkammer aus Kies 2/4 mm.....	26
Abbildung 21: Betonage des Widerlagers	26
Abbildung 22: Gemessener und angepasster Druckverlauf in der Druckkammer und in der Kontrollkammer des Versuchs BIT-2 bei einer Gasdruckbelastung von 1,05 MPa	27
Abbildung 23: gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-2 bei einer Druckbelastung mit Salzlösung von 1,2 MPa	28
Abbildung 24: Abfolge beim Rückbau der Versuche BIT-1 und BIT-2.....	29
Abbildung 25: Frei gefräster Sohlenbereich zwischen den Bohrlochversuchen BIT-1 und BIT-2	30
Abbildung 26: Überbohren der Versuche BIT-1 und BIT-2	30
Abbildung 27: Entleerte Kontrollkammer mit getrennten Röhrchen der Druckkammer bei BIT-2	30
Abbildung 28: Überbohrte Bitumendichtung beim Versuch BIT-2.....	31
Abbildung 29: Kernsegment mit Bitumendichtung beim Versuch BIT-2	31
Abbildung 30: Flüssigkeitsausbreitung beim Versuch BIT-2 sichtbar am Kernsegment BIT-1.....	31
Abbildung 31: Kernsegment mit Bitumendichtung beim Versuch BIT-1	31
Abbildung 32: Freilegen der Bitumendichtung beim Versuch BIT-1	32
Abbildung 33: Freigelegte Bitumendichtung beim Versuch BIT-1.....	32
Abbildung 34: Bitumendichtung bei BIT-1 direkt nach Abschlagen des Segmentes aus dem Salzmantel	33

Abbildung 35: In Kontrollkammer hineingepresstes Oxidationsbitumen beim Versuch BIT-1	33
Abbildung 36: Abziehen des anhaftenden Destillationsbitumen vom Salzstück bei BIT-1	33
Abbildung 37: Bitumendichtung bei BIT-1 direkt nach Abschlagen des Segmentes aus dem Salzmantel	34
Abbildung 38: In Kontrollkammer hineingepresstes Oxidationsbitumen beim Versuch BIT-2	35
Abbildung 39: Kontaktbereich Destillationsbitumen - Steinsalz beim Versuch BIT-2	35
Abbildung 40: Lage des Versuchs ASP-1 in der Versuchsnische 2	35
Abbildung 41: Aufbau ASP-1	36
Abbildung 42: Druckgeber kombiniert mit Thermoelement	37
Abbildung 43: Oberfläche der abgekühlten unteren Sperrschicht mit dem teilweise eingebauten Schotter und dem Druckgeber D1	37
Abbildung 44: Schematische Position der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-1)..	38
Abbildung 45: Oberfläche des eingebauten Schotterelements mit dem Druckgeber D2.....	38
Abbildung 46: Position des Thermoelements T4 an der Bohrlochkontur	38
Abbildung 47: Frisch vergossener Schotter mit AZALT 70/100	39
Abbildung 48: Betonage des Widerlagers	39
Abbildung 49: Gemessene Temperaturverlauf während des Einbaus der Bitumenschichten (ASP-1)..	40
Abbildung 50: Gemessene Temperaturverläufe während der ersten Minuten des Heißvergusses des Schotters.....	41
Abbildung 51: Gemessene Temperaturverläufe während der ersten Minuten des Heißvergusses der oberen Sperrschicht.....	42
Abbildung 52: Verlauf des gemessenen Drucks während des Heißvergusses des Schotters	42
Abbildung 53: Verlauf des gemessenen Drucks während des Heißeinbaus der oberen Sperrschicht..	43
Abbildung 54: Verlauf des gemessenen Drucks während des Einbaus der Kontrollkammer und des Frischbetons	44
Abbildung 55: Verlauf des gemessenen Drucks während der Hydratation des MgO-Betons im Vergleich zur gemessenen Hydratationstemperatur	44
Abbildung 56: Gemessener und angepasster Druckverlauf des Versuchs ASP-1 bei einer Gasdruckbelastung mit von 0,2 MPa.....	45
Abbildung 57: Lage des Versuchs ASP-2 in der Versuchsnische 2	46
Abbildung 58: Aufbau ASP-2.....	47
Abbildung 59: Schematische Position der Sensoren im Steinasphalt (ASP-2).....	48
Abbildung 60: Temperaturverlauf im Versuch ASP-2	49
Abbildung 61: Temperaturverlauf nach dem Verguss der oberen Sperrschicht (ASP-2)	49
Abbildung 62: Druckverlauf am Sensor D1 im Versuch ASP-2.....	50
Abbildung 63: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs ASP-2 bei einer Gasdruckbelastung mit von 0,23 MPa.....	51
Abbildung 64: Versuchsanordnung der Teilversuche im Ton	51
Abbildung 65: Herstellung der Bohrlöcher.....	52
Abbildung 66: Aufbau BIT-3	52
Abbildung 67: Zusammenstellung der Kornfraktionen	53
Abbildung 68: eingebaute Thermoelemente	53
Abbildung 69: Schematische Position der Sensoren im Bitumen (BIT-3).....	54

Abbildung 70: heißes Destillationsbitumen kurz nach dem Einguss.....	54
Abbildung 71: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der unteren Sperrbitumenschicht.....	55
Abbildung 72: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse.....	56
Abbildung 73: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur.....	56
Abbildung 74: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton.....	58
Abbildung 75: Aufbau ASP-3.....	59
Abbildung 76: Schematische Position der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-3)..	60
Abbildung 77: Druckkammer ASP-3.....	61
Abbildung 78: abgestufter Kies ASP-3.....	61
Abbildung 79: abgekühlte untere Sperrschicht.....	61
Abbildung 80: Randbereich der unteren Sperrschicht.....	61
Abbildung 81: eingebauter Schotter des Dichtelements.....	62
Abbildung 82: bitumenverfüllte Schottersäule.....	62
Abbildung 83: ASP-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse.....	63
Abbildung 84: ASP-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur.....	63
Abbildung 85: APS-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton.....	64
Abbildung 86: APS-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der oberen Sperrschicht im Bohrloch.....	65
Abbildung 87: ASP-3 Druckganglinie bei 50 kPa.....	66
Abbildung 88: ASP-3 Druckganglinie bei 100 kPa.....	66
Abbildung 89: ASP-3 gemessene und angepasste Druckverläufe bei ca. 50 kPa.....	66
Abbildung 90: zugetretenes Wasser im Bohrloch.....	67
Abbildung 91: abgedeckter Versuch ASP-4.....	67
Abbildung 92: Aufbau ASP-4.....	68
Abbildung 93: Schematische Position der Sensoren im Steinasphalt (ASP-4).....	69
Abbildung 94: Einbau des Steinasphalts.....	70
Abbildung 95: Dichtelement aus Steinasphalt.....	70
Abbildung 96: Einbau der Kontrollkammer.....	70
Abbildung 97: abgestufter Kies in der Kontrollkammer.....	70
Abbildung 98: Trennfolie zwischen Kontrollkammer und Betonwiderlager.....	71
Abbildung 99: Einbau des Betonwiderlagers.....	71
Abbildung 100: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse.....	72
Abbildung 101: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur.....	72
Abbildung 102: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton.....	73

Abbildung 103: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der oberen Sperrbitumenschicht im Bohrloch	74
Abbildung 104: ASP-4 Druckganglinie bei 50 kPa	75
Abbildung 105: ASP-4 Druckganglinie bei 100 kPa	75
Abbildung 106: seitlicher Schurf beim Rückbau des Versuchs ASP-4	76
Abbildung 107: Präparation einer Probe aus dem Konturbereich des Versuchs ASP-4	76
Abbildung 108: geborgenes Asphaltelement des Versuchs ASP-4	77
Abbildung 109: freigelegter Abschnitt des Asphaltelements des Versuchs ASP-3.....	77
Abbildung 110: freigelegte Oberfläche der Sperrbitumenschicht zur Kontrollkammer des Versuchs ASP-4.....	77
Abbildung 111: abgeschlagenes Bruchstück aus der oberen Sperrbitumenschicht des Versuchs ASP-3	77
Abbildung 112: präparierte Scheibe eines Konturbereichs aus dem Versuch ASP-4	78
Abbildung 113: Nahaufnahme eines mit Bitumen verfüllten Risses im Ton	78
Abbildung 114: Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung im Zentrum der Versuche im Steinsalz	80
Abbildung 115: Vergleich der Temperaturentwicklung im Zentrum der Versuche im Ton.....	81
Abbildung 116: Vergleich der Temperaturentwicklung im anstehenden Ton.....	82
Abbildung 117: Vergleich der Versuche mit Bitumen (BIT-1 und BIT-3).....	82
Abbildung 118: Vergleich der bitumenverfüllten Schottersäulen ASP-1 (Steinsalz) und ASP-3 (Ton)..	83
Abbildung 119: Vergleich der Versuche mit Steinaspalt ASP-2 (Steinsalz) und ASP-4 (Ton)	83

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Permeabilitätsmessungen in den Vorbohrungen im Salinar [7]	17
Tabelle 2: Positionen der Sensoren im Bitumen (BIT-1).....	20
Tabelle 3: Positionen der Sensoren in dem mit Bitumen verfüllten Schotterelement (ASP-1)	38
Tabelle 4: Positionen der Sensoren im Steinasphalt (ASP-2).....	48
Tabelle 5: Positionen der Sensoren im Bitumenelement (BIT-3).....	54
Tabelle 6: Temperaturmaxima im Versuch BIT-3	57
Tabelle 7: Positionen der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-3)	60
Tabelle 8: Temperaturmaxima im Versuch ASP-3.....	64
Tabelle 9: Positionen der Sensoren im Steinasphalt (ASP-4).....	69
Tabelle 10: Temperaturmaxima im Versuch ASP-4.....	73
Tabelle 11: Thermische Materialparameter für die Bitumen- und Asphaltversuche	79
Tabelle 12: Einbaumassen und Ausgangstemperaturen der Bitumen- und Asphaltversuche.....	79
Tabelle 13: Übersicht Druckbeaufschlagung der Bitumen- und Asphaltversuche	85

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ALZ	Auflockerungszone (aufgelockerte Zone im konturnahen Gebirge)
AP	Arbeitspaket, Arbeitspunkt
ASP-1	Asphalt-Versuch 1; Bezeichnung für den ersten Versuch zur Untersuchung von Asphalt-dichte-elementen
ASP-2	Asphalt-Versuch 2; Bezeichnung für den zweiten Versuch zur Untersuchung von Asphalt-dichte-elementen
ASP-3	Asphalt-Versuch 3; Bezeichnung für den dritten Versuch zur Untersuchung von Asphalt-dichte-elementen
ASP-4	Asphalt-Versuch 4; Bezeichnung für den vierten Versuch zur Untersuchung von Asphalt-dichte-elementen
B80	alte Bezeichnung der Bitumensorte 70/100
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
BIT-1	Bitumen-Versuch 1; Bezeichnung für den ersten Versuch zur Untersuchung von Bitumen-dichte-elementen
BIT-2	Bitumen-Versuch 2; Bezeichnung für den zweiten Versuch zur Untersuchung von Bitumen-dichte-elementen
BIT-3	Bitumen-Versuch 3; Bezeichnung für den dritten Versuch zur Untersuchung von Bitumen-dichte-elementen
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
ELSA	Akronym für "Endlager-Schachtverschlüsse"
FKZ	Förderkennzeichen (im vorliegenden Fall Projektnummer eines vom BMWi geförderten FuE-Vorhabens)
FuE	Forschung und Entwicklung
IfBuS	Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, TU Bergakademie Freiberg
IfAC	Institut für Anorganische Chemie, TU Bergakademie Freiberg
Ma%	Masse %
TU BAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg

VERZEICHNIS DER AUSFÜHRLICHEN TEILBERICHTE

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

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

Der vorliegende Teilbericht behandelt ausführlich die im Arbeitsschritt 4.5 des Arbeitspaket 4 *Halbtechnische Versuche* erarbeiteten Ergebnisse. Der Bericht ergänzt den Abschnitt 4.4 des *Zusammenfassenden Abschlussberichts*. Die TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau war in diesem Arbeitspaket federführend.

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

VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND INDIZES

c	spezifische Wärmekapazität
m	Masse
m_{tr}	Masse Trockenrückstand
m_w	Masse Wasser
n	Porosität
ΔQ	Wärmeenergie
V_p	Porenvolumen
V_0	Gesamtvolumen
w	Wassergehalt
ΔT	Temperaturdifferenz
ρ	Dichte
ρ_{tr}	Trockendichte des Materials, auch als Trockenrohddichte bezeichnet
ρ_0	Korndichte des Materials

1 VORBEMERKUNGEN

1.1 Arbeitsschritte und beteiligte Personen

Im Teilbericht wird folgender Arbeitsschritt erläutert:

- Arbeitsschritt 4.5: Halbtechnische Versuche zur Weiterentwicklung von Asphaltabdichtungen.

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

BGE TECHNOLOGY GmbH
(vormals DBE TECHNOLOGY GmbH)

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

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der
TU Bergakademie Freiberg

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

Institut für Anorganische Chemie der
TU Bergakademie Freiberg

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

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG)

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

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

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

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

Dr. Katja Emmerich
Dr. Rainer Schuhmann
Franz Königer

TS Bau GmbH, Niederlassung Jena
Geschäftsbereich Bergbau

Olaf Einicke
Jürgen Schrade
Toni Schmidt

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

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

Weiterhin haben an einzelnen Maßnahmen mitgewirkt:

TERRA-MIX Bodenstabilisierungs GmbH
 Martin Müller

IBU-tec advanced materials AG
 Dr. Steffen Römhild

Stephan Schmidt Meißen GmbH
 Thomas Wolf

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

1.2 Vorbemerkung zu den einigen bodenmechanischen Parametern

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Formel 2

n	Porosität	[%]
V_p	Porenvolumen	[m ³], [cm ³]
V_0	Gesamtvolumen	[m ³], [cm ³]
ρ_{tr}	Trockendichte des Materials	[kg/m ³], [g/cm ³]
ρ_0	Korndichte des Materials	[kg/m ³], [g/cm ³]

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

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

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

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

2 WEITERENTWICKLUNG VON ASPHALTDICHTUNGEN (AP 4.5)

2.1 Allgemeines

Neben Salzgrus, Bentonit und Magnesiabaustoffen steht mit Bitumen ein weiteres Dicht- und Bindemittel für untertägige Abdichtelemente zur Verfügung. Dem Grundsatz der redundanten Diversität in einem Abdichtsystem wird damit Rechnung getragen.

Im Rahmen der Versuche wurden Abdichtelemente auf Basis von Bitumen und Asphalt im halbtechnischen Maßstab in söhligem Bohrlöchern mit ca. 1 m Tiefe eingebaut und hinsichtlich ihres Abdichtvermögens untersucht. Die ersten vier Versuche (mit den Bezeichnungen BIT-1, BIT-2, ASP-1 und ASP-2) wurden im Steinsalz in der Grube Sondershausen durchgeführt. Später folgten drei Versuche (mit den Bezeichnungen BIT-3, ASP-3 und ASP-4) in der Tongrube Wiesa.

Die Versuche gliederten sich wie folgt:

- Versuch BIT-1 zur Untersuchung des Verhaltens eines reinen Bitumendichtelements im Steinsalz, welches mit Gas druckbeaufschlagt wurde.
- Versuch BIT-2 zur Untersuchung des Verhaltens eines reinen Bitumendichtelements im Steinsalz, welches mit Lösung druckbeaufschlagt wurde.
- Versuch BIT-3 zur Untersuchung des Verhaltens eines reinen Bitumendichtelements im Ton. Dieser Versuch wurde in Anlehnung an den Versuch BIT-2 aus dem Steinsalz gestaltet.
- Versuch ASP-1 zur Untersuchung des Verhaltens einer mit Bitumen verfüllten Schottersäule unter Verwendung eines Brechkornschotters BK 32/63 im Steinsalz.
- Versuch ASP-2 zur Untersuchung des Verhaltens eines Dichtelements aus einem vorgemischtem Asphalt mit kantengerundetem Schotter RK-20/40 im Steinsalz.
- Versuch ASP-3 zur Untersuchung des Verhaltens einer mit Bitumen verfüllten Schottersäule unter Verwendung eines Brechkornschotters BK 32/63 im Ton. Dieser Versuch wurde in Anlehnung an den Versuch ASP-1 aus dem Steinsalz durchgeführt.
- Versuch ASP-4 zur Untersuchung des Verhaltens eines Dichtelements aus einem vorgemischtem Asphalt mit kantengerundetem Schotter RK-20/40 im Ton. Dieser Versuch wurde in Anlehnung an den Versuch ASP-2 aus dem Steinsalz realisiert.

Der Versuchsaufbau wurde so gestaltet, dass die Teilversuche im Ton mit den vorangegangenen Versuchen im Steinsalz weitgehend vergleichbar sind. Auf einen Teilversuch im Ton analog zum BIT-1 wurde verzichtet.

Nachfolgend wird der generelle Aufbau der Abdichtelemente beschrieben. Die spezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchen werden in den jeweiligen Abschnitten zum Versuchsaufbau erläutert.

Im Bohrlochtiefsten wurde granulares Material (Kies) eingefüllt. Der Porenraum des Kieses diente als Druckkammer, welche bei den Versuchen mit Gas- oder Flüssigkeit druckbeaufschlagt wurde.

Oberhalb der Druckkammern wurden die Verschlusselemente aus Bitumen bzw. Asphalt eingebaut. Um eine Orts- bzw. Lagestabilität des weichen Abdichtbitumens (Destillationsbitumen AZALT 70/100 mit einer dynamischen Viskosität von ca. $6 \cdot 10^4$ Pas bei 25 °C) zu gewährleisten, wurde dieses immer zwischen 2 relativ dünne „Sperrschichten“ aus einem vergleichsweise zähen

Oxidationsbitumen (STELOX 85/25 mit einer dynamischen Viskosität von ca. $8,8 \cdot 10^8$ Pas bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$) eingebaut. Das Bitumen der Sperrschichten war damit um Faktor 15.000 zäher als das Abdichtbitumen. Andernfalls wäre das Destillationsbitumen tief in die jeweilige Druckkammer eingedrungen. Dieses Prinzip wird auch als „harte Schale, weicher Kern“ bezeichnet.

Oberhalb der Abdichtungen wurde weiterhin eine Kontrollkammer, ebenfalls aus einem granularen Material, angeordnet. In den Kontrollkammern sollte das Prüfmedium bei einer eventuellen Umströmung der Abdichtung erfasst werden.

Als statische Widerlager wurden im oberen Bereich der Bohrlöcher Pfropfen aus Beton errichtet. Im Salz wurde hierfür auf einen Magnesiabaustoff zurückgegriffen. Im Ton wurde ein Portlandzement eingesetzt.

2.2 Bohrlochversuche im Salinargebirge

Die ersten vier Versuche (BIT-1, BIT-2, ASP-1 und ASP-2) befanden sich in einer Versuchsnische in der Grube Sondershausen. Der Standort befand sich im Salinargebirge und wurde intern als Versuchsnische 2 bezeichnet (Versuchsnische 1 wurde für Verdichtungsversuche mit Salzgrus-Ton-Gemischen verwendet, vgl. Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1). Eine Übersicht der Versuchsnische zeigt Abbildung 1. Ein Foto des Standortes ist als Abbildung 2 eingefügt.

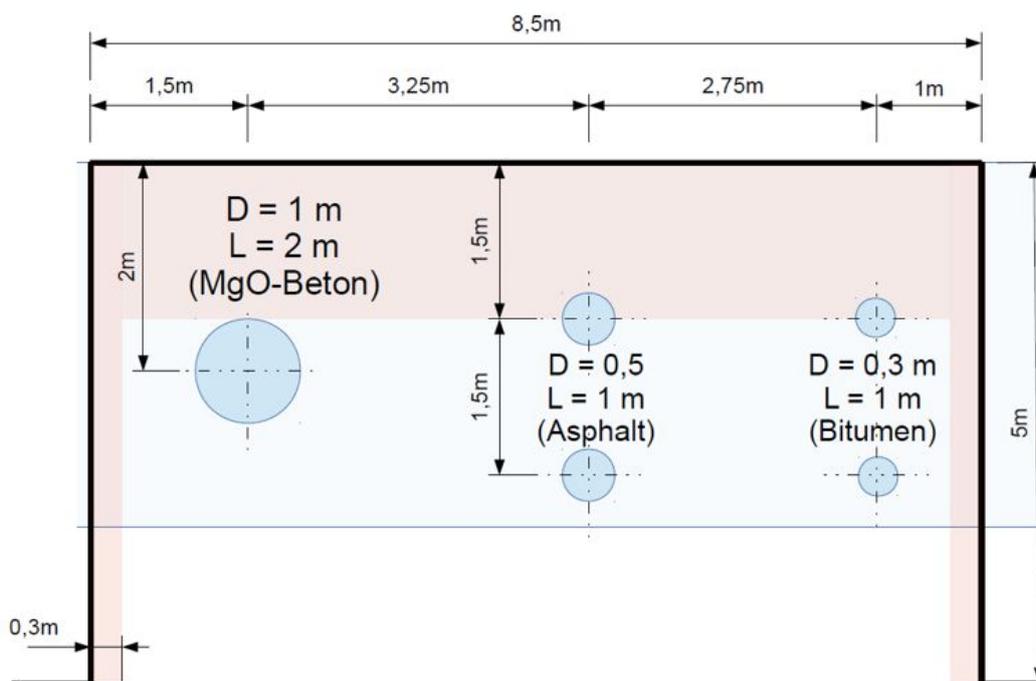


Abbildung 1: Übersicht Versuchsnische 2 in Sondershausen



Abbildung 2: Lage der Bohrlochversuche in der Versuchsnische 2

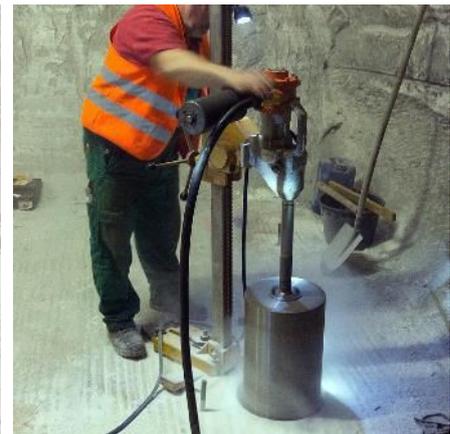


Abbildung 3: Herstellung der Versuchsbohrlöcher in der Versuchsnische 2

Die Bohrlöcher für die Einzelversuche wurden von der TS-Bau Jena in der Sohle der Versuchsnische 2 erstellt (Abbildung 3). Dafür wurden zunächst vier Vorbohrungen zur Ermittlung der Steinsalzpermeabilität im jeweiligen Bohransatzpunkt der Einzelversuche gestoßen. Die Vorbohrungen dienten danach zur Zentrierung des Bohrgeräts. Mit dem Überbohren der Vorbohrungen wurden zwei Bohrlöcher mit Durchmesser 30 cm für die Bitumenversuche und zwei Bohrlöcher mit Durchmesser 50 cm für die Asphaltversuche geschaffen. Die Bohrungen erfolgten trocken unter Verwendung einer Druckluftspülung. Die Kerne wurden anschließend gebrochen und gezogen.

In jeder Vorbohrung wurde die Permeabilität in zwei Messintervallen durch die IBeWa bestimmt: zwischen 0,36 m und 0,50 m Teufe sowie zwischen 0,90 m und 1,00 m Teufe. Dies entsprach der Lage der späteren Druck- und Kontrollkammern.

Im Ergebnis der Untersuchung wurde folgende Gaspermeabilität gemessen:

Tabelle 1: Permeabilitätsmessungen in den Vorbohrungen im Salinar [7]

Messpunkt (Bezeichnung IBeWa)	Teufe	Permeabilität	Bemerkungen
BIT01-042-G	0,36 m - 0,50 m	$k < 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Kontrollkammer
BIT01-090-G	0,90 m - 1,00 m	$k = 6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Druckkammer
BIT02-042-G	0,36 m - 0,50 m	$k = 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Kontrollkammer
BIT02-090-G	0,90 m - 1,00 m	$k = 5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Druckkammer
ASP01-042-G	0,36 m - 0,50 m	$k = 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Kontrollkammer
ASP01-090-G	0,90 m - 1,00 m	$k = 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Druckkammer
ASP02-042-G	0,36 m - 0,50 m	$k < 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Kontrollkammer
ASP02-090-G	0,90 m - 1,00 m	$k = 10^{-22} \text{ m}^2$	Bereich der späteren Druckkammer

Insgesamt haben sich alle gemessenen Bereiche als praktisch hydraulisch dicht erwiesen ($k < 10^{-21} \text{ m}^2$). In zwei Fällen lag die Permeabilität an der Messgrenze. Als Höchstwert wurde für die Vorbohrung BIT-1 im Testintervall zwischen 0,90 m und 1,00 m Teufe eine Permeabilität von

$k = 6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ gemessen. Der Mittelwert von $k = 2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ der in den Vorbohrungen gemessenen Werte ist geringer als der Mittelwert von $k = 1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ der in der Erkundungsbohrung VB3-13 gemessenen Permeabilität (vgl. Abschnitt 2.2 im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1). Die Bohrlöcher waren damit für die Versuche geeignet.

Aufgrund der angenommenen niedrigen integralen Permeabilität der Abdichtungen wurden später in den fertig installierten Versuchen instationäre Impulstests durchgeführt. Dabei wurde das bekannte Volumen der Druckkammer instantan unter einen gewissen Prüfdruck gebracht und in Abhängigkeit von der Zeit der Druckabfall in Zeiträumen von bis zu 80 Tagen aufgezeichnet. Anhand des Druckabfallverlaufs wurde die integrale Permeabilität des Gesamtsystems „umgebendes Salinargebirge und Abdichtung“ bestimmt. Durch den Vergleich der Wirtsgesteinspermeabilität, welche in den Vorbohrungen ermittelt wurde, mit der integralen Permeabilität des Abdichtsystems in den Bohrlöchern wurde bei jedem Versuch die Wirksamkeit der eingebauten Abdichtungen bewertet. Die Ergebnisse sind jeweils in den Durchführungsbeschreibungen der Einzelversuche aufgeführt.

2.2.1 Versuchsaufbau BIT-1

Für den ersten Versuch mit Bitumen (BIT-1) wurde ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,3 m und 1 m Teufe genutzt. In der Abbildung 4 ist die Lage des Versuchsbohrlochs relativ zur Versuchsnische 2 dargestellt.

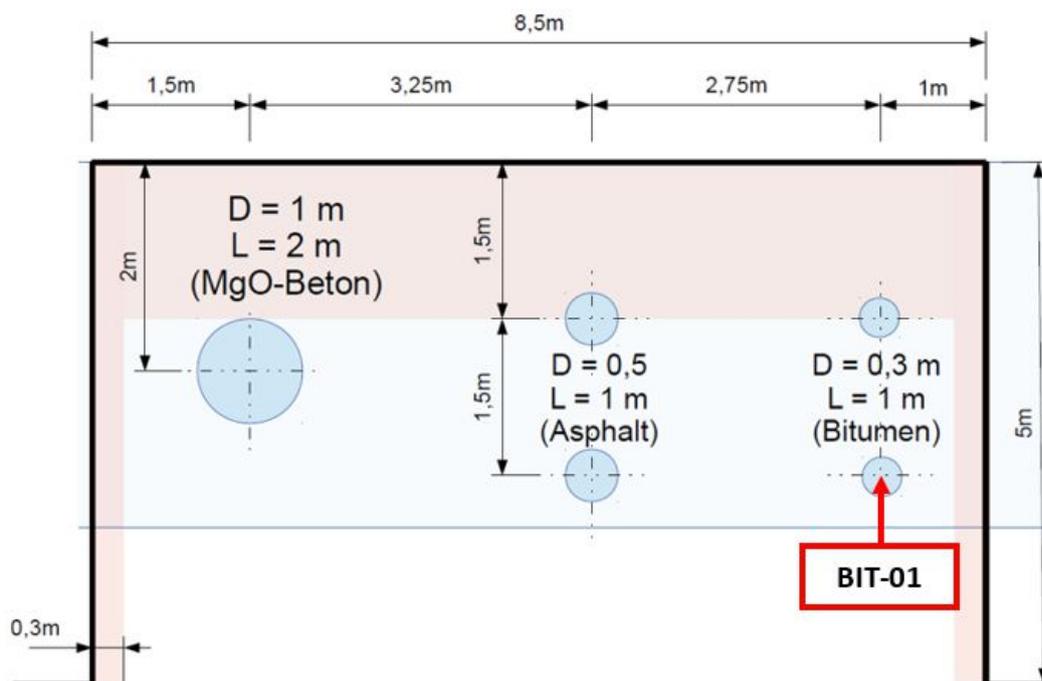


Abbildung 4: Lage des Versuchs BIT-01 in der Versuchsnische 2

Der Aufbau orientierte sich an den Anforderungen einer Beaufschlagung mit Gasdruck und ist in Abbildung 5 aufgezeigt. Deshalb sind die Druck- und Kontrollkammer jeweils mit einer Anschlussleitung versehen. Der Einbau des Versuchs BIT-1 erfolgte im Dezember 2014, wobei das Bohrloch zuvor ca. 2 Wochen offen stand.

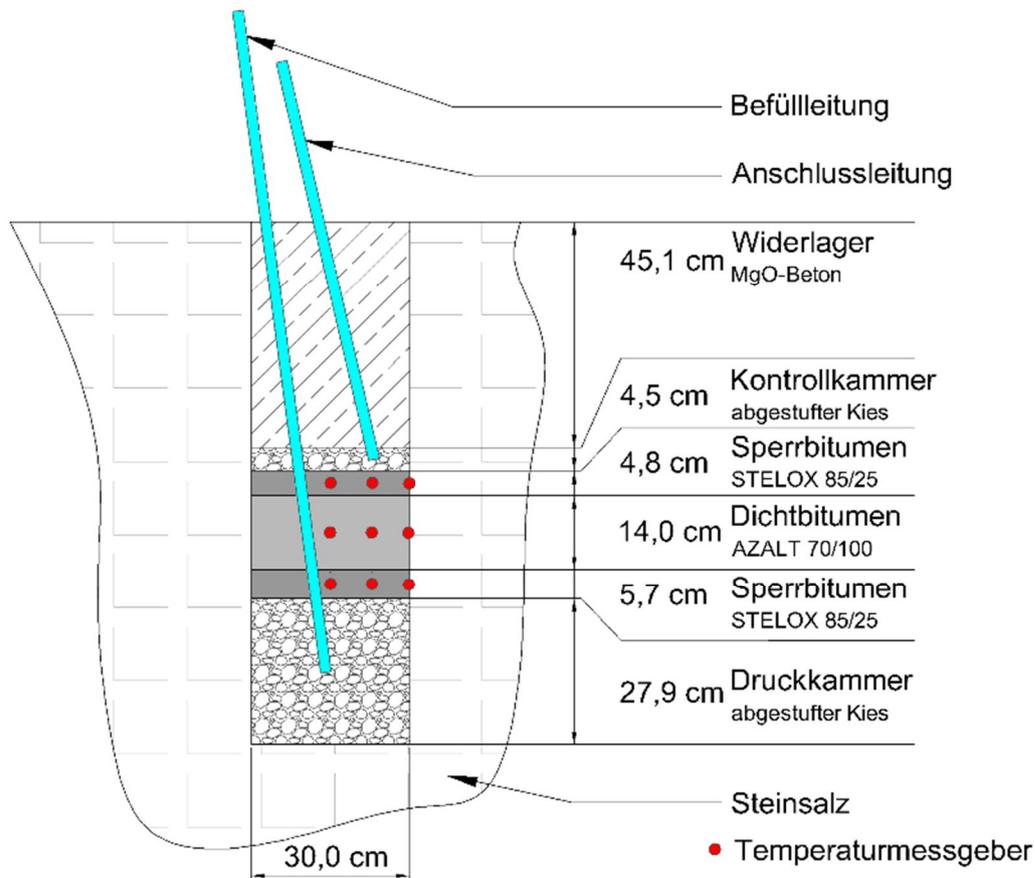


Abbildung 5: Aufbau BIT-01

Die Druckkammer bestand aus abgestuftem Kies, wobei der obere Bereich der Druckkammer aus einem Kies 2/4 aufgebaut wurde. Durch die Korngröße wurde sichergestellt, dass das heiß eingegossene Oxidationsbitumen (STELOX 85/25) der unteren Sperrschicht nicht maßgeblich in den Kies der Druckkammer eindrang. Durch Vorversuche im Technikum des IfBuS wurde dies vorher verifiziert.

Der Porenanteil der Druckkammer betrug 38,8 %. Zusammen mit dem Volumen des Anschlussrohres betrug das Volumen der Druckkammer 7802 cm³. Daraus ließ sich später die Permeabilität des Systems unter Berücksichtigung der Kompressibilität des Prüfgases während der Druckbeaufschlagung berechnen.

Über der Druckkammer wurden nacheinander eine Sperrbitumenschicht, eine Schicht aus Abdichtbitumen und eine weitere Sperrbitumenschicht eingebaut. In der Mitte jeder der 3 Bitumenschichten wurde die Temperatur bei einem Bohrlochradius gleich 0 cm (Mitte bzw. Bohrlochachse), 7,5 cm und 15 cm (Bohrlochwandung, Detailansicht in Abbildung 6) gemessen. Dazu wurden Thermoelemente (Typ T) an Stäben aus Glasfaser befestigt und an den entsprechenden Positionen in das Bohrloch geklemmt. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die entsprechend eingebauten Thermoelemente der unteren Sperrschicht oberhalb der fertiggestellten Druckkammer abgebildet.

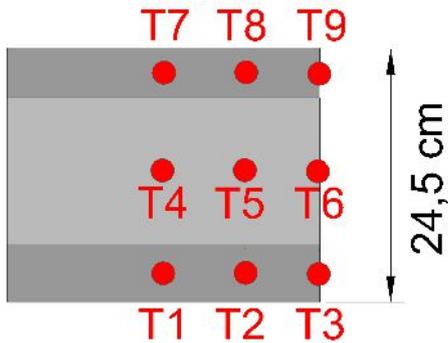


Abbildung 6: Schematische Position der Sensoren im Bitumen (Bit-1)

Tabelle 2: Positionen der Sensoren im Bitumen (BIT-1)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe im Bitumenelement [cm]
T1	69,5	0	21,9
T2	69,5	7,5	21,9
T3	69,5	15	21,9
T4	59,8	0	12,2
T5	59,8	7,5	12,2
T6	59,8	15	12,2
T7	50,1	0	2,5
T8	50,1	7,5	2,5
T9	50,1	15	2,5



Abbildung 7: Fertig gestellte Druckkammer und die positionierten Temperaturgeber der unteren Sperrbitumenschicht

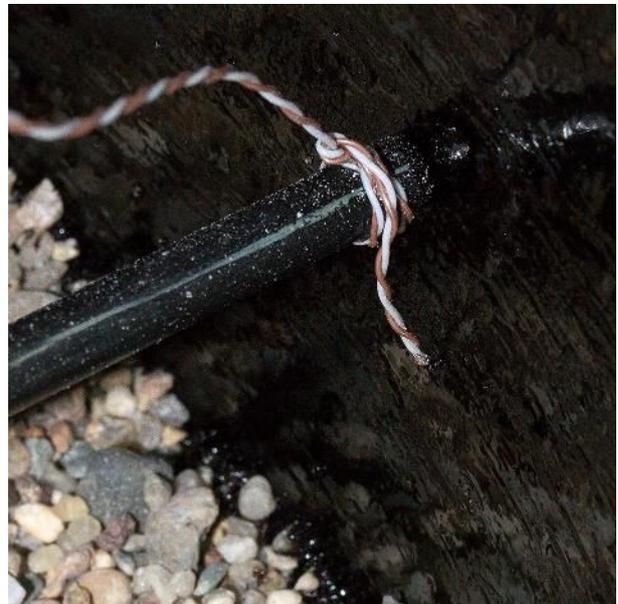


Abbildung 8: Detailansicht des Temperatursensors an der Bohrlochwand für die untere Sperrbitumenschicht

Um die Anbindung der Bitumenschichten an das Wirtsgestein und an das hindurchgeführte Anschlussrohr der unteren Druckkammer zu verbessern, wurde ein spezieller Voranstrich auf Basis einer Bitumenlösung auf die Bohrlochwand und das Stahlrohr aufgetragen.

Die untere Sperrschicht aus einem Oxidationsbitumen STELOX 85/25 mit ca. 5,6 cm Stärke wurde mit einer Temperatur von ca. 150 °C heiß eingegossen. Nach ca. 2 h wurde das Abdichtbitumen AZALT 70/100 mit ca. 140 °C heiß eingegossen (Abbildung 9). Die Schichtmächtigkeit betrug rund 14 cm. Am Folgetag (etwa 20 Stunden nach Messbeginn) wurde die obere Sperrschicht aus Oxidationsbitumen STELOX 85/25 mit ca. 150 °C mit 4,8 cm Schichtstärke eingegossen.



Abbildung 9: Verguss des Abdichtbitumens AZALT 70/100



Abbildung 10: Oberfläche der abgekühlten oberen Sperrschicht

In der Abbildung 10 ist die Oberfläche der abgekühlten oberen Sperrbitumenschicht dargestellt. In der Abbildung schemenhaft erkennbar ist der Befestigungsstab der eingebauten Thermoelemente, da sich das Bitumen während der Abkühlung stark zusammenzieht. Deutlich sichtbar waren Luftblasen auf der abgekühlten Bitumenoberfläche.

24 Stunden nach dem Einguss des unteren Bitumenabschnittes herrschten nahezu stationäre Temperaturverhältnisse in den Bitumenschichten, sodass die obere Kontrollkammer mit 4,4 cm Mächtigkeit aus Kies 2/4 eingebaut wurde. Der Porenanteil der Kontrollkammer zwischen 45 und 50 cm Teufe betrug 31,3 %. Zusammen mit dem Volumen des Anschlussrohres betrug das Volumen der Kontrollkammer 1088 cm³.

Oberhalb der Kontrollkammer wurde das Widerlager aus rund 70 kg MgO-Beton der Rezeptur C3 eingebaut. Die Länge des Widerlagers betrug ca. 45 cm.

2.2.2 Messprogramm und Ergebnisse des Versuches BIT-1

Der Temperaturverlauf wurde während des Bitumenverguss und während des anschließenden Abkühlens des Bitumens gemessen. Die Temperatur wurde durch neun Thermoelemente erfasst. Der Verlauf ist in Abbildung 11 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Vergusszeitpunkte der einzelnen Schichten. Dabei steigt die Temperatur an den in die jeweilige Schicht eingebetteten Thermoelementen sprunghaft auf die Vergusstemperatur von ca. 140°-150°C. Zwei Stunden nach dem Verguss der unteren Sperrschicht wurde das Dichtbitumen eingebracht, was zu einer Wärmeabgabe an das bereits auf 80°C abgekühlte Sperrbitumen führte und dessen weitere Abkühlung verzögerte. Der Einbau der oberen Sperrschicht induzierte in ähnlicher Weise einen zeitlich leicht verzögerten Wiederanstieg der Temperatur in der darunterliegenden Schicht. Insgesamt kühlte sich das Bitumen nach rund 24 Stunden näherungsweise auf die Umgebungstemperatur ab.

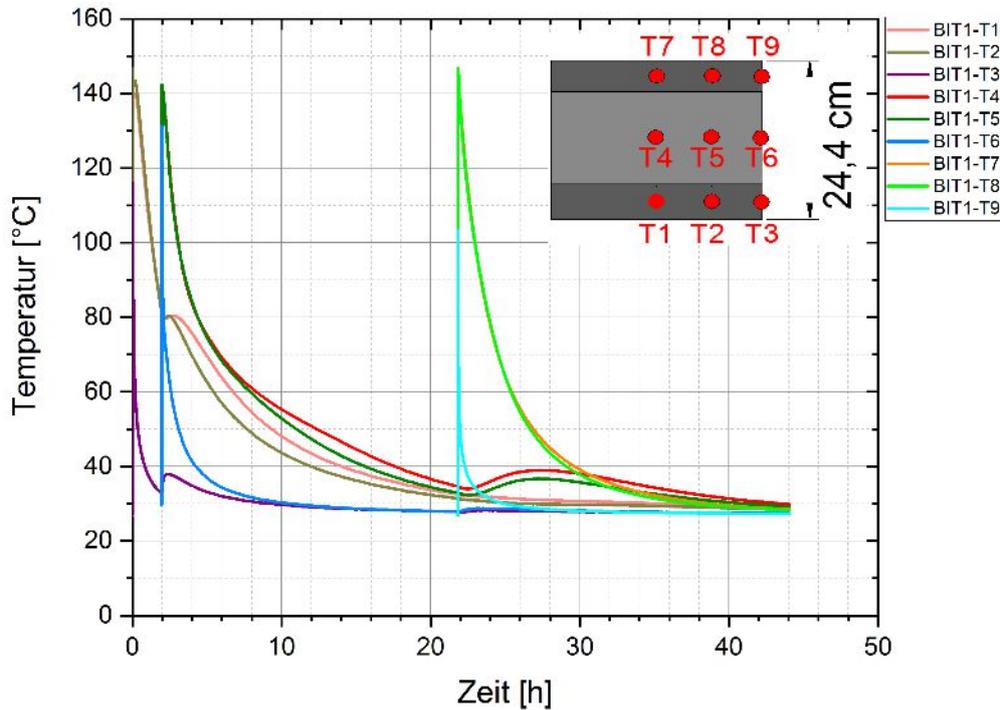


Abbildung 11: Temperaturverlauf im Versuch BIT-1

Später wurde die Druckkammer des Versuchs BIT-1 durch die IBeWa mit trockener Druckluft (dotiert mit FREON) mit ca. 0,12 MPa unter Überdruck gesetzt. Danach wurde über einen Zeitraum von 80 Tagen der Druckabfall in der Druckkammer und der Druckverlauf in der Kontrollkammer aufgezeichnet (Abbildung 12). Kurz nach der Druckbeaufschlagung war am gesamten Versuchsaufbau das Tracergas FREON nirgendwo detektierbar.

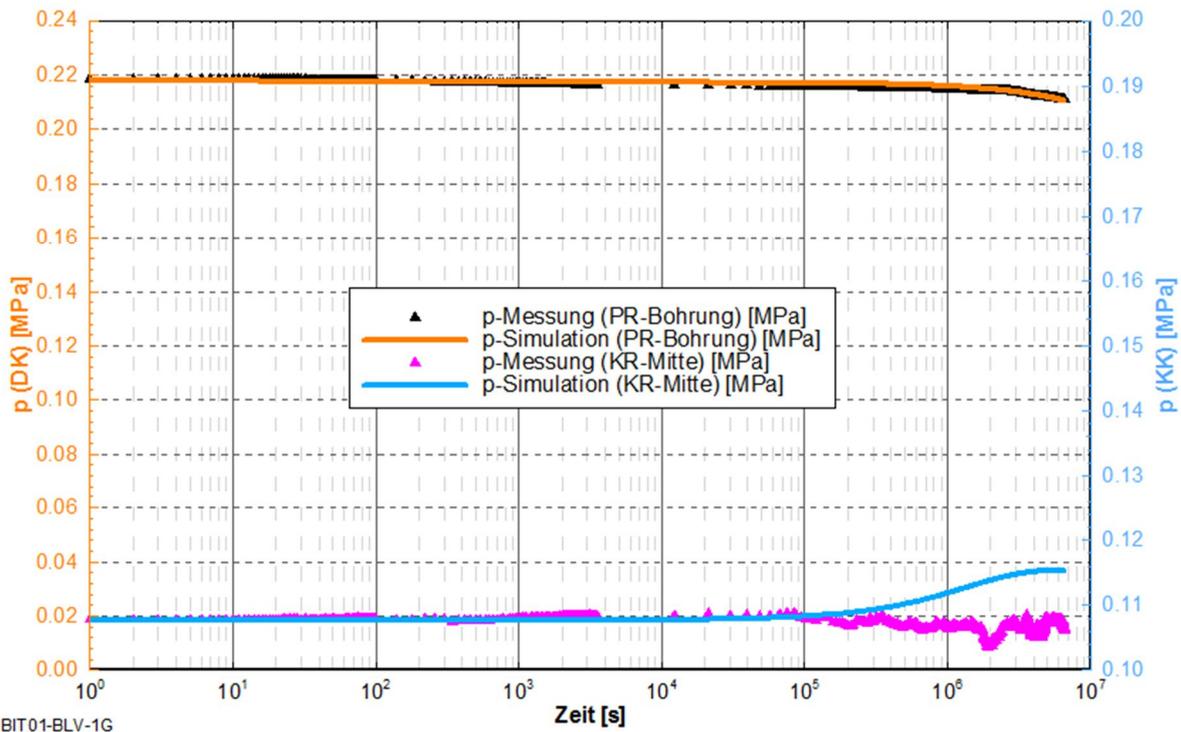


Abbildung 12: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-1 bei einer Gasdruckbelastung von 0,12 MPa

Der gemessene Druckverlauf wurde mit einem strömungstechnischen Modell des Versuchsaufbaus angepasst und dabei eine integrale Permeabilität von $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ bestimmt. Auffallend ist dabei, dass der gemessene Druck in der Kontrollkammer bei mehr als 10^5 Sekunden (= 28 Tage) unter dem prognostizierten Druck in der Kontrollkammer liegt. Der durch das Modell prognostizierte Druckverlauf konnte damit nicht bestätigt werden. Die Ursache liegt wahrscheinlich in einem eher radialen Abströmen des Prüfmediums Druckluft in das umliegende Gebirge.

Nach der ersten Druckstufe mit ca. 0,12 MPa wurde der Prüfdruck auf ca. 1,05 MPa Überdruck erhöht und danach die Druckkammer abgeriegelt. Die Druckverläufe in der Druckkammer und in der Kontrollkammer wurden abermals für 23 Tage aufgezeichnet (Abbildung 13). Die Auswertung ergab eine integrale Permeabilität von $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$, wobei auch dabei die Druckverläufe in der Kontrollkammer mit dem Modell nicht beschreibbar waren. Hinsichtlich der Stabilität des sohlennahen Einbaus der Druckkammer in der Versuchsnische ist der Prüfdruck von ca. 1 MPa Überdruck als grenzwertig zu betrachten, da die Einspannung des Salzgebirges mit max. 70 cm Überdeckung gering war.

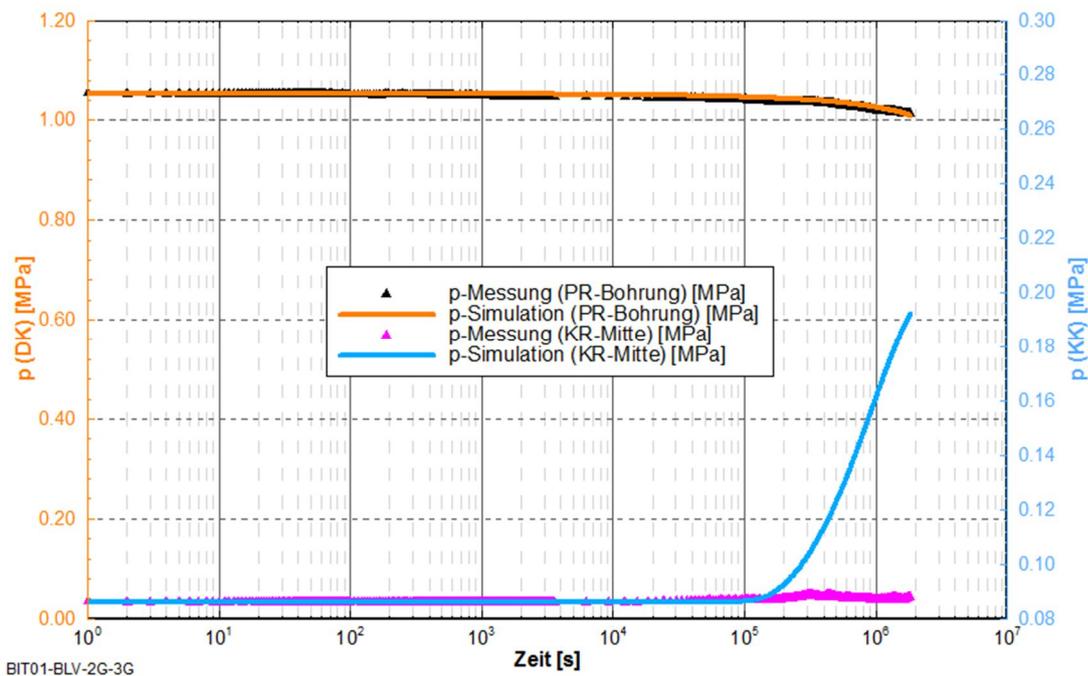


Abbildung 13: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-1 bei einer Gasdruckbelastung von 1,05 MPa

Im Vergleich zur lokalen Ausgangspermeabilität des Wirtsgesteins von $6 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ wurde eine integrale Permeabilität der Abdichtung des Versuchs BIT-1 von $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ (bei Prüfdruck 0,12 MPa) von $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ (bei 1,05 MPa Prüfdruck) gemessen. Diese sind ca. um den Faktor 5 bzw. den Faktor 30 höher als die Ausgangspermeabilität des Wirtsgesteins. Die maximal gemessene Permeabilität des Gesamtsystems mit $2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ist jedoch immer noch sehr gering.

Eine grobe Abschätzung der Permeabilität des Kieses in der Kontrollkammer nach CARMAN-KOZENY ergab eine Permeabilität in der Größenordnung von $5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$. Je nachdem wie stark das zähe Oxidationsbitumen unter dem anliegenden Prüfdruck in den Porenraum der Kontrollkammer penetriert, wird sich das Volumen der Kontrollkammer mit der Zeit ändern. Aufgrund der hohen dynamischen Viskosität des Oxidationsbitumens sollte dieser Einfluss jedoch zu vernachlässigen sein.

2.2.3 Versuchsaufbau BIT-2

Im Gegensatz zum Versuch BIT-1 sollte beim Versuch BIT-2 das Abdichtsystem nach einer Messung mit Gas hauptsächlich mit Salzlösung druckbelastet werden. Dabei galt es, eine vergleichende Untersuchung hinsichtlich des angreifenden Prüfmediums durchzuführen. Auf eine Messung der Temperatur wurde verzichtet. Die Lage ist in Abbildung 14 verzeichnet.

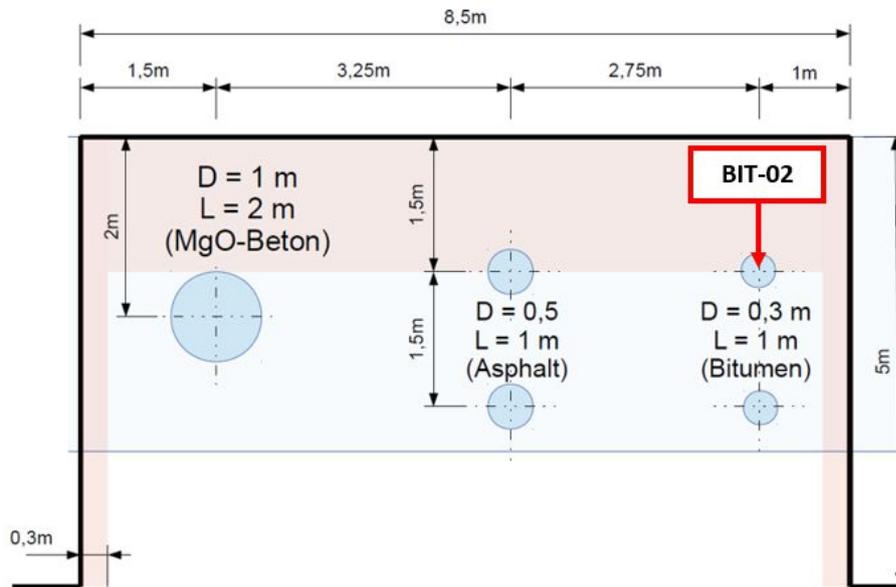


Abbildung 14: Lage des Versuchs BIT-2 in der Versuchsniische 2

Der Aufbau erfolgte nahezu analog BIT-1 im März 2015, nachdem das Bohrloch ca. 3 Monate offen gestanden hatte. Es wurde eine kombinierte Bitumendichtung aus hartem und weichem Bitumen eingebaut. Der Versuchsaufbau des Versuchs BIT-2 ist in der Abbildung 15 dargestellt.

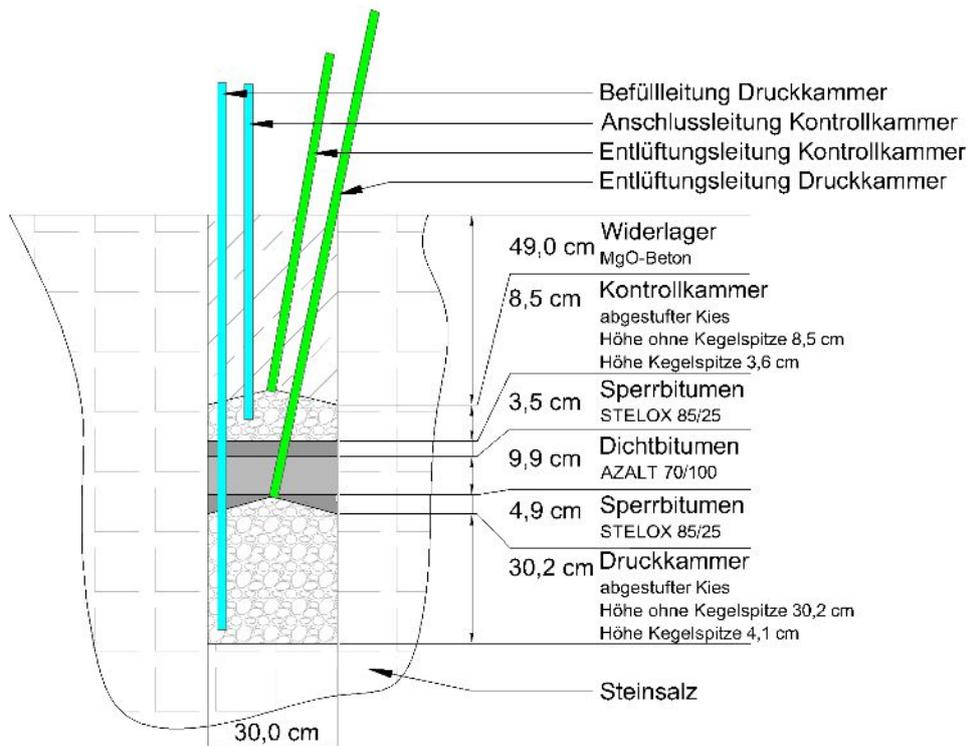


Abbildung 15: Aufbau BIT-2

In der Abbildung 16 ist der Einbau der Druckkammer aus einem Rundkornsotter RK-20/40 dargestellt. Darauf wurden filterstabil abgestufte Kiese eingebaut. Die Druckkammer wurde mit 2 Stahlrohren angeschlossen, wobei ein Rohr zur Befüllung und ein Rohr zur Entlüftung verwendet wurde. Um die Entlüftung zu optimieren, wurde das Material der Druckkammer kegelförmig eingebaut, sodass eventuell verbliebene Gasphasen nicht in Kontakt mit der Grenzfläche Bitumen-Gebirge kommen.

Der Porenanteil der Druckkammer ab ca. 76 cm Teufe betrug 34,5 %. Zusammen mit dem Volumen der Anschlussrohre betrug das Volumen der Druckkammer 7896 cm³.



Abbildung 16: Rundkornsotter in der Druckkammer



Abbildung 17: Oberfläche der abgekühlten unteren Sperrschicht aus STELOX 85/25

In der Abbildung 17 ist die Oberfläche der abgekühlten unteren Sperrschicht aus Oxidationsbitumen (STELOX 85/25) dargestellt. Die Einbautemperatur des Oxidationsbitumens lag bei ca. 180 °C. Die Zuleitungen der unteren Druckkammer führten durch die untere Sperrschicht hindurch. Die Mächtigkeit der Sperrschicht betrug im Randbereich ca. 4,5 cm, während im Bereich der kegelförmigen Spitze der Druckkammer die Überdeckung des Sperrbitumens nur ca. 5 mm betrug. In den Reflexionen auf der glatten Bitumenschicht nach dem Abkühlen des Bitumens in Abbildung 17 kann der kegelförmige Aufbau der darunterliegenden Druckkammer ansatzweise nachvollzogen werden. Es zeigte sich eine ungleichförmige Oberfläche des abgekühlten Oxidationsbitumens infolge des thermischen Schrumpfens bei der Abkühlung. Durch die hohe Zähigkeit des Oxidationsbitumens stellt sich kein weitgehend horizontaler Bitumenspiegel ein.

Ca. 20 Stunden nach dem Einbau der unteren Sperrschicht wurde das Abdichtbitumen mit ca. 170 °C mit einer Stärke von ca. 9 cm eingegossen. In der Abbildung 18 ist die Oberfläche des abgekühlten Abdichtbitumens dargestellt. Aufgrund der geringen Zähigkeit des Abdichtbitumens stellte sich ein gleichmäßiger horizontaler Bitumenspiegel im Bohrloch ein.



Abbildung 18: Oberfläche des Abdichtbitumens AZALT 70/100 ca. 4 h nach Einbau



Abbildung 19: Oberfläche der abgekühlten oberen Sperrschicht

Nach 4 h Abkühlzeit des Abdichtbitumens wurde eine ca. 3,5 cm mächtige Sperrschicht aus Oxidationsbitumen mit ca. 170 °C eingegossen. In der Abbildung 19 ist die Oberfläche der abgekühlten Sperrschicht dargestellt. Die Kontrollkammer wurde in gleicher Weise wie die Druckkammer mit 2 Röhren angeschlossen und besteht aus Kies 2/4 mm (Abbildung 20).

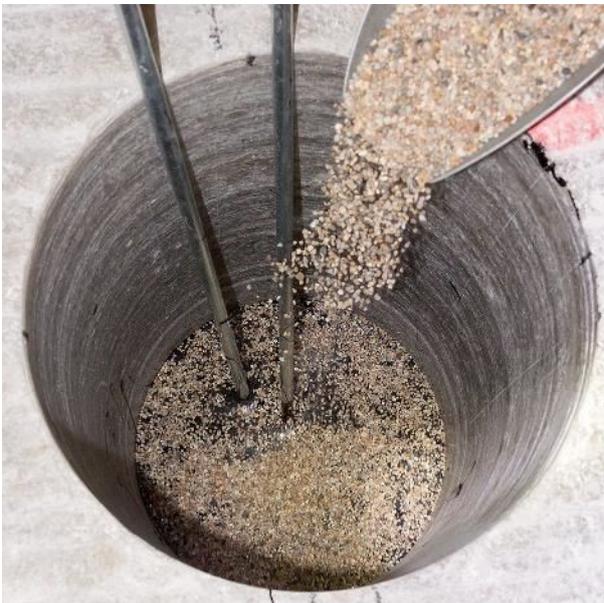


Abbildung 20: Aufbau der Kontrollkammer aus Kies 2/4 mm



Abbildung 21: Betonage des Widerlagers

Der Porenanteil der Kontrollkammer (zwischen 49 und 58 cm Teufe) betrug 35,4 %. Zusammen mit dem Volumen der Anschlussrohre betrug das Volumen der Kontrollkammer 2512 cm³.

Oberhalb der Kontrollkammer wurde das Widerlager aus ca. 80 kg MgO-Beton der Rezeptur C3 eingebaut (Abbildung 21). Die Länge des Widerlagers betrug ca. 50 cm.

2.2.4 Messprogramm und Ergebnisse des Versuches BIT-2

Zwei Wochen nach dem Einbau wurde mit der Messung der integralen Permeabilität begonnen. Zuerst wurde die Druckkammer mit bis zu 1,05 MPa Gasdruck (FREON-dotierte Druckluft) belastet und die initiale Dichtheit des eingebauten Abdichtsystems überprüft. Kurz nach der Druckbeaufschlagung war am gesamten Versuchsaufbau das Tracergas FREON nirgendwo detektierbar. Abbildung 22 zeigt die gemessenen und angepassten Druckverläufe bei einer 5-tägigen Versuchsdauer mit ca. 1 MPa Überdruck zum Versuchsstart.

Der gemessene Druckverlauf wurde ebenfalls mit einem strömungstechnischen Modell des Versuchsaufbaus angepasst und dabei eine integrale Permeabilität von $6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Gleichfalls wie beim Versuch BIT-1 ist dabei auffallend, dass der gemessene Druckverlauf in der Druckkammer durch den prognostizierten Druckverlauf in der Druckkammer nicht bestätigt werden konnte. Die Ursache liegt wahrscheinlich auch hier in einem eher radialen Abströmen des Prüfmediums (Druckluft) in das umliegende Gebirge.

Die gemessene integrale Gaspermeabilität von $6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ liegt in der gleichen Größenordnung wie beim Versuch BIT-1 ($2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$).

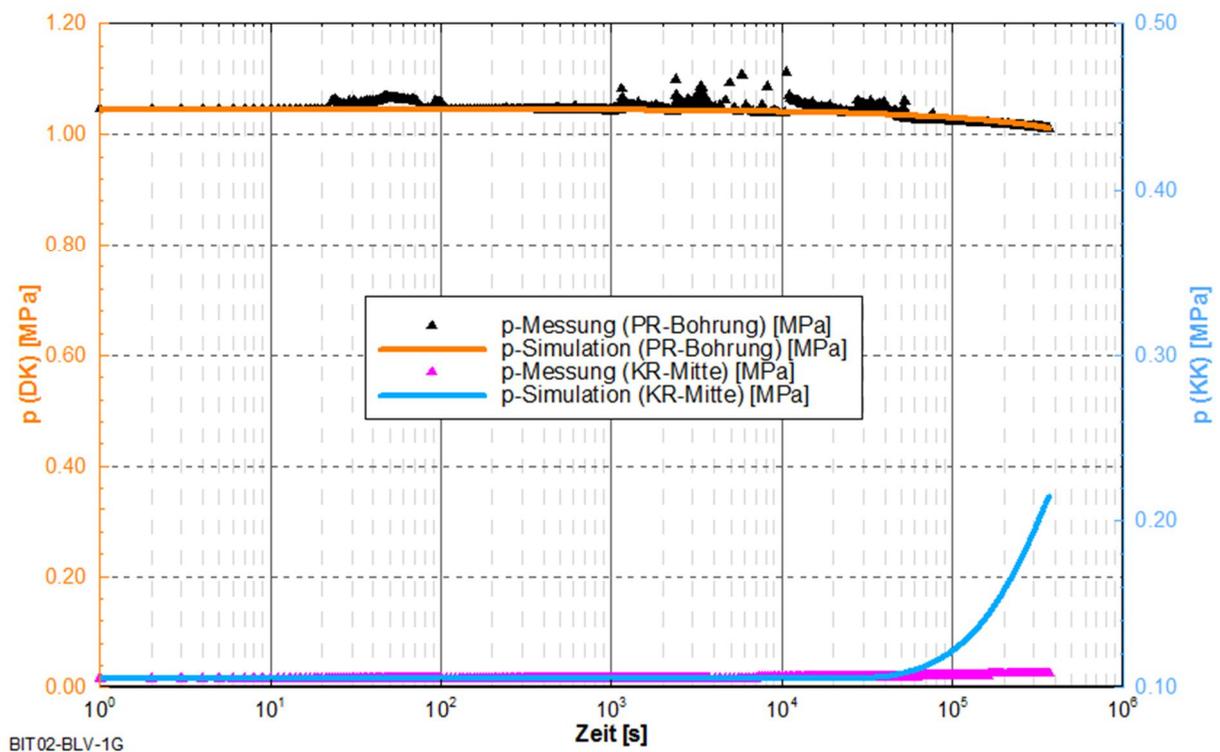


Abbildung 22: Gemessener und angepasster Druckverlauf in der Druckkammer und in der Kontrollkammer des Versuches BIT-2 bei einer Gasdruckbelastung von 1,05 MPa

Nach dem Versuch mit Gas wurden die Druck- und Kontrollkammer mit gesättigter Salzlösung aufgesättigt (KW 14, 2015). Unterstützend wurden vorher die Druck- und Kontrollkammern mit CO_2 gespült. Der Grubenbetreiber GSES hatte vorher in Absprache mit dem Bergamt die untertägige Anwendung des CO_2 unter Auflagen genehmigt. Unter Ausnutzung der guten Löslichkeit des Kohlendioxids konnte eine hohe Sättigung der Druck- und Kontrollkammer mit Salzlösung erreicht werden.

Dabei war aufgefallen, dass die Kontrollkammer überraschenderweise fast vollständig mit der Anmachlauge des MgO-Betons (Rezeptur C3) gefüllt war. Für den Einbau des MgO-Betons unter den genannten Versuchsrandbedingungen war die verwendete Rezeptur C3 wahrscheinlich nicht ausreichend sedimentationsstabil, sodass die Rezeptur für die folgenden Untersuchungen in geringem Maße angepasst wurde.

Nach der Sättigung der Druck- und Kontrollkammer wurde die Druckkammer mit 1,1 MPa Flüssigkeitsdruck durch eine Handpumpe beaufschlagt. Bereits während der Druckbeaufschlagung war feststellbar, dass die Bitumendichtung zwischen der Druck- und Kontrollkammer wie eine flexible Membran reagiert. Durch die geringe Kompressibilität des Prüfmediums Salzlösung reagierte das Gesamtsystem der Abdichtung und der Prüfkammern sehr sensitiv auf Volumenänderungen.

Durch die Druckerhöhung in der Druckkammer wurde die Bitumendichtung membranartig gegen den Kies der Kontrollkammer gepresst. Dadurch kommt es unweigerlich zu einer Nachkompaktion des Kieses und damit zu einer Verringerung des Porenvolumens in der Kontrollkammer. Der damit verbundene Druckanstieg in der Kontrollkammer wurde verhindert, indem während der Druckerhöhung in der Druckkammer das verdrängte Prüfmedium aus der Kontrollkammer frei abströmen konnte. Erst mit Erreichen des vollen Prüfdruckes in der Druckkammer wurde die Zuleitung der Kontrollkammer verschlossen und die Aufzeichnung des Druckverlaufes gestartet. Da keine Vorrichtung verwendet wurde, die den Druck der Salzlösung konstant hält, resultiert in Abhängigkeit von der Kompressibilität des Prüfmediums (Salzlösung + verbliebene Gasphasen) und der integralen Permeabilität ein Druckabfall.

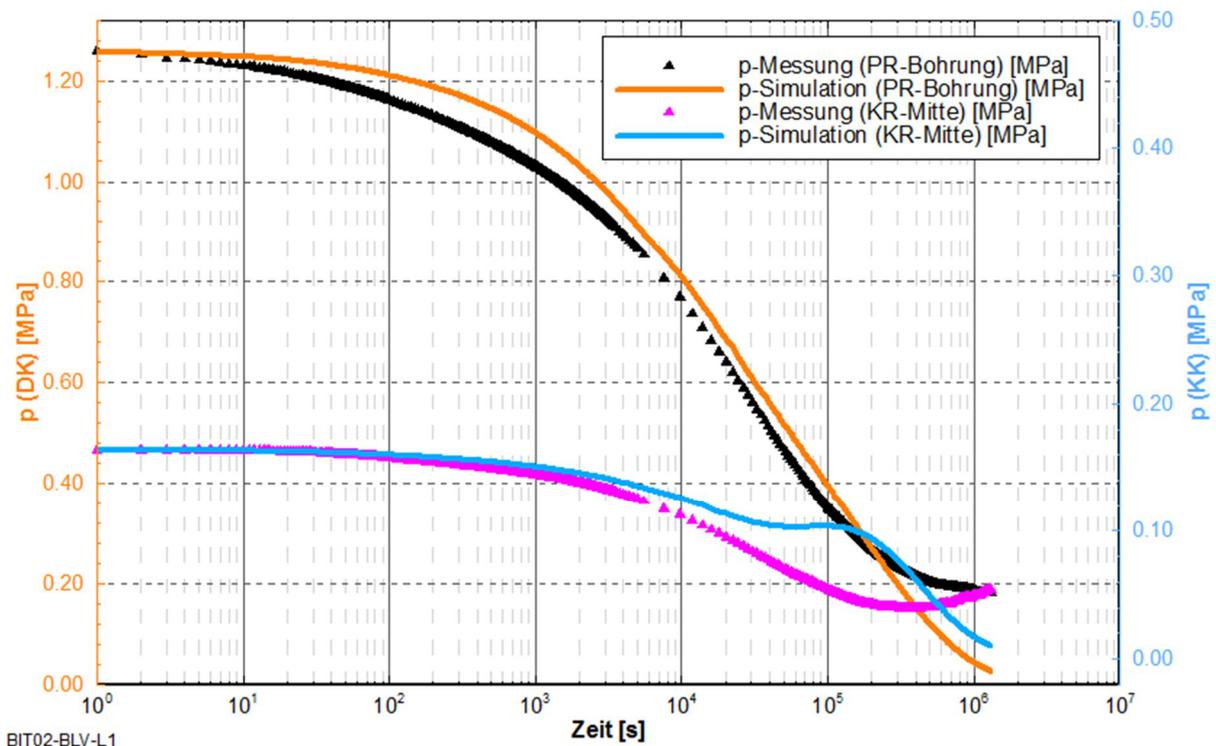


Abbildung 23: gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs BIT-2 bei einer Druckbelastung mit Salzlösung von 1,2 MPa

In der Abbildung 23 sind die gemessenen und angepassten Druckverläufe bei einer 12-tägigen Versuchsdauer mit ca. 1 MPa Überdruck der Salzlösung dargestellt. Die gemessenen Druckverläufe wurden ebenfalls mit einem strömungstechnischen Modell des Versuchsaufbaus angepasst und dabei eine integrale Permeabilität von $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt.

In den Messdaten der Salzlösungsbeaufschlagung fällt auf, dass der Druckabbau bei ca. 0,1 MPa Überdruck stagnierte. Die Ursache konnte nicht eindeutig identifiziert werden. Vermutlich beeinflussten Kapillarspannungseffekte die Druckverläufe maßgeblich.

Die bestimmte integrale Permeabilität des Versuchs BIT-2 unter Gasdruck und Salzlösungsdruck liegt in der Größenordnung von 10^{-20} m^2 und ist im Vergleich zur lokalen Ausgangspermeabilität des Salinars zwischen $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ und $5 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ (siehe Abschnitt 2.2 im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1) ca. 2 Größenordnungen höher. Wie beim Versuch BIT-1 ist jedoch die gemessene integrale Permeabilität von 10^{-20} m^2 bei Salzlösungsdruckbeaufschlagung mit 1,2 MPa für das Gesamtsystem aus Bitumendichtung und umgebendem Gebirge sehr gering.

2.2.5 Rückbau der Bohrlochversuche mit Bitumen im Steinsalz

Neben dem Nachweis der Dichtheit gegenüber den Prüfmedien Druckluft und Salzlösung sollte das Verhalten des Bitumens (z.B. Penetration ins Gebirge oder in die Kontrollkammer) mittels eines gezielten Rückbaus untersucht werden. Besonderes Interesse galt dem Kontaktbereich der Bitumendichtung zum Steinsalz und des Sperrbitumens zur Kontrollkammer. Um ungestörte Proben aus diesen Bereichen zu gewinnen, musste zunächst die Bitumendichtung, eingeschlossen im angrenzenden Steinsalz und zwischen den Sperrbitumenschichten, als Ganzes gewonnen werden. Das sollte durch Überbohren der Bohrlöcher geschehen. So sollte verhindert werden, dass das Bitumen aufgrund seines Fließverhaltens seine Lage verändert. Abbildung 24 zeigt schematisch die Vorgehensweise beim Rückbau der Bitumenbohrlochversuche.

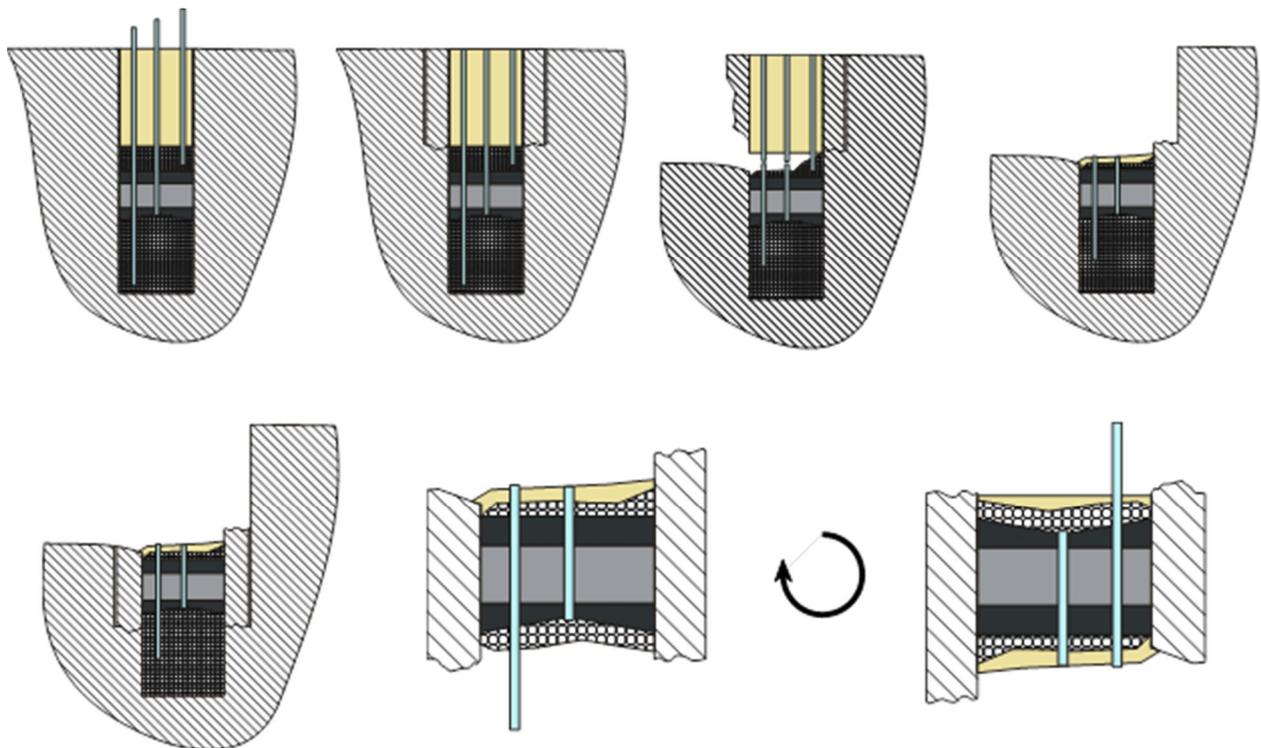


Abbildung 24: Abfolge beim Rückbau der Versuche BIT-1 und BIT-2

Der Rückbau der Versuche BIT-1 und BIT-2 erfolgte Ende Oktober 2015. Mit einer im Durchmesser 0,5 m großen Bohrkronen wurde zunächst jeweils das MgO-Betonwiderlager überbohrt (Schritt 1). Um das Widerlager entfernen zu können, wurden alle Stahlröhrchen, die durch die Bitumendichtung führten, unterhalb des Widerlagers getrennt (Schritt 2). Dazu war es erforderlich einen seitlichen Zugang in Höhe der Kontrollkammer zu schaffen. Vor dem Ausbau der Versuche wurde hierzu eine Grube in die Sohle zwischen den Versuchsorten gegräst, die in Abbildung 25 zu sehen ist. Abbildung 26 zeigt beide Versuche beim Rückbau. Das Betonwiderlager von BIT-01 ist in der Abbildung bereits entfernt.

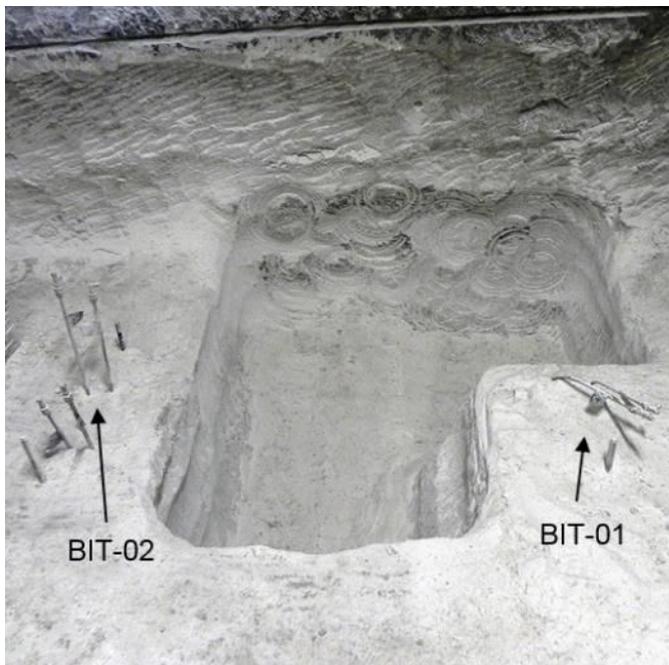


Abbildung 25: Freigegräster Sohlenbereich zwischen den Bohrlochversuchen BIT-1 und BIT-2



Abbildung 26: Überbohren der Versuche BIT-1 und BIT-2



Abbildung 27: Entleerte Kontrollkammer mit getrennten Röhrchen der Druckkammer bei BIT-2

Nach Entnahme des Widerlagers wurde der Bereich der Bitumendichtung überbohrt. Um zu verhindern, dass sich die Lage der Bitumenschicht verändert, wurden Schichtober- und Unterseite mit Magnesiasuspension fixiert (Schritte 3 und 5).

Durch die Druckbeaufschlagung mit Salzlösung beim Versuch BIT-2 war das Salz im Nahbereich des Versuches aufgeweicht. Der interkristalline Verbund im Salz war geschwächt, sodass beim Herausziehen des Kernsegmentes mit der Bitumendichtung das Salz aufgebrochen ist (Abbildung 28). Dadurch konnte während der Standzeit das Dichtbitumen herausfließen (Abbildung 29).



Abbildung 28: Überbohrte Bitumendichtung beim Versuch BIT-2



Abbildung 29: Kernsegment mit Bitumendichtung beim Versuch BIT-2

Am Kernsegment des Versuches BIT-1 wurde nachträglich eine lokale Feuchtstelle festgestellt. Es ist davon auszugehen, dass infolge der Druckbeaufschlagung beim Versuch BIT-2 sich die Salzlauge horizontal im Salz ausgebreitet hat, sodass der Bereich des Versuchsortes BIT-1 erreicht wurde, so wie es am gewonnenen Kernsegment des Versuches BIT-1 sichtbar ist (Abbildung 30).



Abbildung 30: Flüssigkeitsausbreitung beim Versuch BIT-2 sichtbar am Kernsegment BIT-1

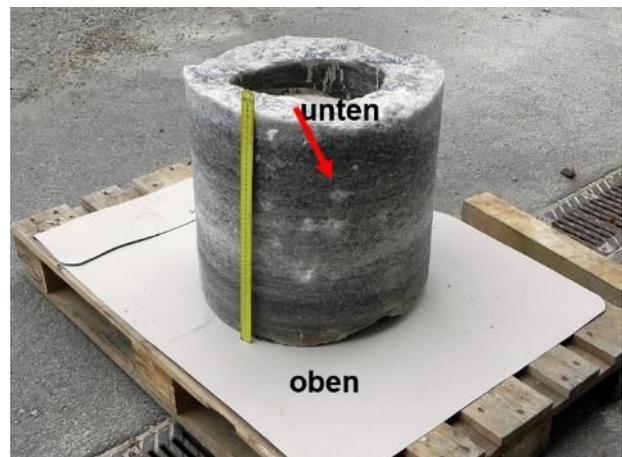


Abbildung 31: Kernsegment mit Bitumendichtung beim Versuch BIT-1

Beide Kernsegmente wurden nach Freiberg transportiert. Nach 2 Wochen Lagerung (in Plastikfolie eingeschlagen) ist die lokale Feuchtstelle am Salz kaum noch sichtbar (siehe Abbildung 31).

In Freiberg wurde dann die Bitumendichtung von der Mantelfläche her freigelegt (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33). Der Salzmantel wurde dazu an 2 Stellen parallel zur Bohrachse aufgesägt. Durch kräftiges Schlagen auf die Stirnfläche konnte das freigelegte Segment von der Bitumendichtung abgeschlagen werden, ohne dabei die Dichtung zu verändern.



Abbildung 32: Freilegen der Bitumendichtung beim Versuch BIT-1



Abbildung 33: Freigelegte Bitumendichtung beim Versuch BIT-1

Der freigelegte Bereich in Abbildung 33 lässt die Schichtenfolge deutlich erkennen: unten die Sperrschicht aus Oxidationsbitumen, in der Mitte die Dichtung aus Destillationsbitumen und darüber die obere Sperrschicht aus Oxidationsbitumen.

Direkt nach dem Entfernen des Salzsegmentes aus dem Kernmantel war im unteren Bereich der weichen Destillationsbitumenschicht ein faustgroßer Hohlraum zu erkennen (grüner Pfeil in Abbildung 34). Es ist davon auszugehen, dass sich die Bitumenschichten während der Lagerung der Kernprobe und beim schonenden Ausbau nicht verschoben haben, sodass der Hohlraum während des Versuches entstanden sein muss. Außerdem wurden in der Mantelfläche der unteren Oxidationsbitumenschicht fingerabdruckgroße, runde Vertiefungen festgestellt. Die Abdrücke dieser Vertiefungen sind auch auf der Anstrichoberfläche des Salzstückes zu erkennen (rote Pfeile in Abbildung 34). Es wird davon ausgegangen, dass im Kontaktbereich zwischen Oxidationsbitumenschicht und Salzstoß Gas teilweise bis zur Unterseite des Destillationsbitumens durchgedrungen ist. Dabei wurde auch Gas im Kontaktbereich zwischen Oxidationsbitumenschicht und Salzstoß eingeschlossen und sind als „Dellen“ im Sperrbitumen sichtbar. Der Gasdruck konnte von dieser Stelle aus direkt auf die Unterseite der Destillationsbitumenschicht einwirken. Da das Oxidationsbitumen der oberen Sperrschicht infolge des anhaltenden Druckes langsam in die Kontrollkammer kriechen konnte, hat sich auf der Seite der Destillationsbitumenschicht eine Gasblase gebildet, die im Laufe der Druckbeaufschlagung immer größer geworden ist. Es ist aber darauf hinzuweisen, dass die Sperrbitumenschicht lediglich die Funktion hat, ein Abpressen des deutlich weicheren Destillationsbitumens zu minimieren. Auf Grund der hohen Permeabilität des Materials der Kontrollkammer, konnte das Abpressen trotz des zähen Oxidationsbitumens nicht ganz verhindert werden.

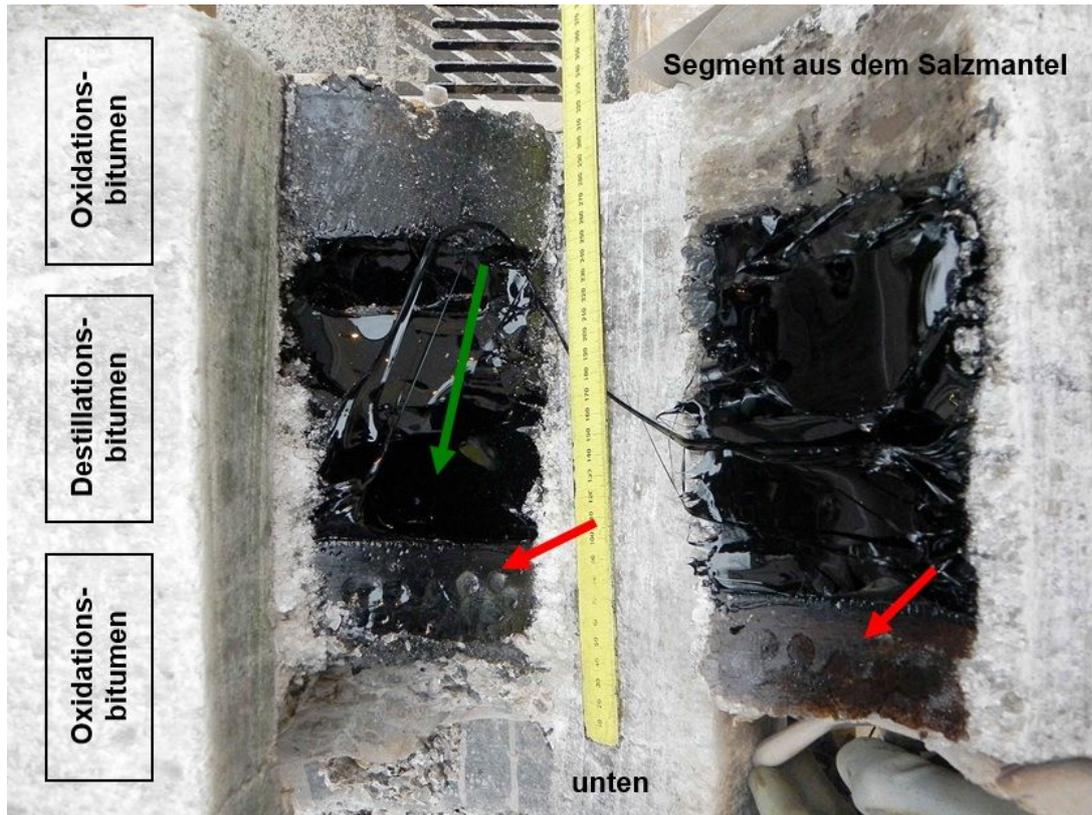


Abbildung 34: Bitumendichtung bei BIT-1 direkt nach Abschlagen des Segmentes aus dem Salzmantel

Infolge der anhaltenden Druckbeaufschlagung wurde das Oxidationsbitumen ca. 15 – 30 mm in die Kiesschüttung der oberen Kontrollkammer hineingedrückt, wie in Abbildung 35 an der freigelegten Stelle in der Kontrollkammer zu sehen ist.



Abbildung 35: In Kontrollkammer hineingepresstes Oxidationsbitumen beim Versuch BIT-1



Abbildung 36: Abziehen des anhaftenden Destillationsbitumens des Salzstückes bei BIT-1

Beim Abschlagen des Salzsegmentes haftete das Destillationsbitumen teilweise am Salzmantel. Das Bitumen konnte jedoch ohne größeren Aufwand per Hand von der glatten Salzoberfläche abgezogen werden (siehe Abbildung 36). Bei der Betrachtung des Mantelsegments fällt auf, dass

das Bitumen beim Eingießen und während der Druckbeaufschlagung in feine Risse des Salzes eingedrungen ist. An den Stellen solcher Risse ist das Bitumen beim Abziehen am Salz haften geblieben und deutlich als schwarze Linien erkennbar. Es ist anzunehmen, dass sich die Risse vor allem durch die Druckbeaufschlagung aufgetan haben.

Der am Salzstoß aufgebrachte Bitumenvoranstrich konnte gemeinsam mit dem Bitumen abgezogen werden. Im Bereich der oberen Sperrschicht ist der Anstrich auch am Bitumen haften geblieben, dagegen haftet der Anstrich im Bereich der unteren Sperrschicht am Salz, wie deutlich an der braunen Färbung des Salzes in Abbildung 36 zu erkennen ist. Der Grund für das unterschiedliche Haftungsverhalten könnte darin liegen, dass die untere Oxidationsbitumenschicht eingebaut wurde, bevor der Anstrich getrocknet war.

Auf die gleiche Weise, wie beim Versuch BIT-1, wurde auch beim Versuch BIT-2 die Bitumendichtung freigelegt. Dadurch, dass der Kernmantel beim Rückbau aufgebrochen ist, ist ein Großteil des Destillationsbitumens herausgelaufen. Die Bitumenschichten haben sich dadurch stark verschoben. Zeitweise lagerte das Kernstück „auf dem Kopf“, sodass sich die untere Oxidationsbitumenschicht nach oben verschoben hat und sich dabei schief gestellt hat (siehe Abbildung 37). Das geschah innerhalb der Zeit, als die Magnesiasuspension noch nicht ausgehärtet war, welche zur Stabilisation der Probe auf der Unterseite der unteren Sperrschicht aufgebracht wurde (Schritt 5).

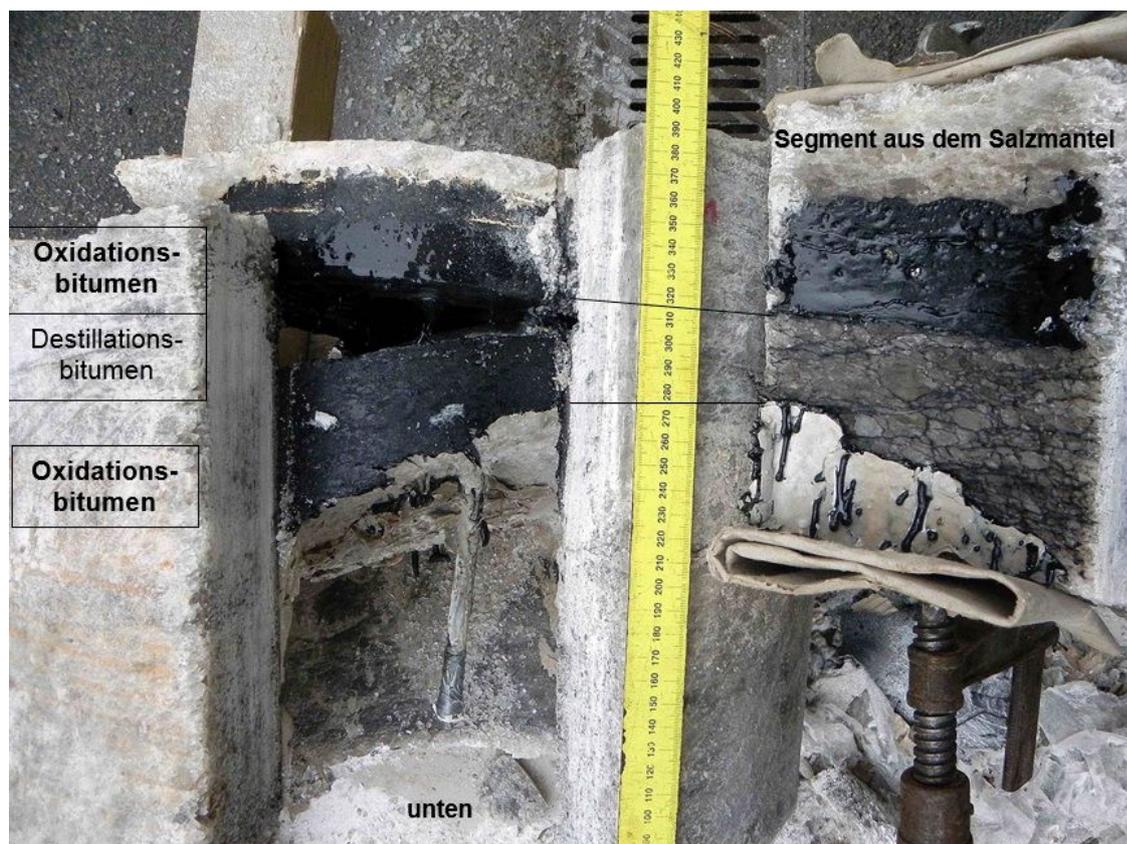


Abbildung 37: Bitumendichtung bei BIT-1 direkt nach Abschlagen des Segmentes aus dem Salzmantel



Abbildung 38: In Kontrollkammer hineingepresstes Oxidationsbitumen beim Versuch BIT-2



Abbildung 39: Kontaktbereich Destillationsbitumen - Steinsalz beim Versuch BIT-2

Das schwarz glänzende Material, das in der Abbildung 37 auf der oberen Sperrschicht zu sehen ist, ist Destillationsbitumen, welches bei der Überkopflagerung aus der Dichtschicht herausgelaufen ist. Auch bei diesem Versuch ist zu sehen, dass das Oxidationsbitumen aus der oberen Sperrschicht infolge der Druckbeaufschlagung ca. 15 mm in die obere Kontrollkammer eingedrungen ist (siehe Abbildung 38) und dass das Destillationsbitumen in das anstehende Salz penetrierte. Später wurde bei Untersuchungen der BGE Technology an Dünnschliffen die Eindringtiefe des Bitumens in das anstehende Steinsalz quantitativ bestimmt. Die Eindringtiefe kann dabei auf max. 5 mm charakterisiert werden (vgl. Anhang A im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1).

2.2.6 Versuchsaufbau ASP-1

Für den Versuch mit ASP-1 wurde ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,5 m und 1 m Tiefe genutzt. In der Abbildung 40 ist die Lage des Versuchsbohrlochs relativ zur Versuchsnische 2 dargestellt.

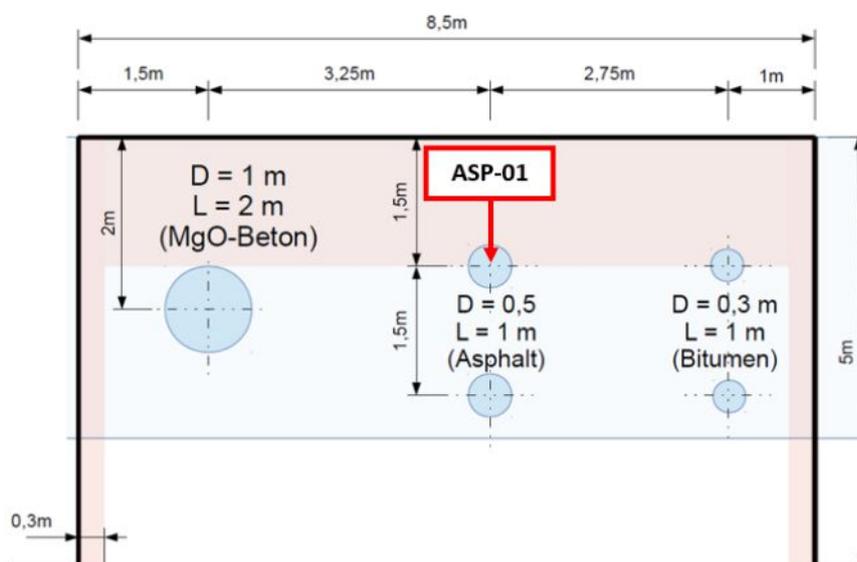


Abbildung 40: Lage des Versuchs ASP-1 in der Versuchsnische 2

Im Versuch ASP-1 sollte die Funktion einer mit Bitumen verfüllten Schottersäule erstmals in situ im halbtechnischen Maßstab untersucht werden. Dafür wurde der Brechkornschotter BK-32/63 (siehe AP 3.5) aus Adelebsen als Stützkorn verwendet. Als Vergussmaterial kam ein Destillationsbitumen ATZALT 70/100 zum Einsatz. Der Einbau erfolgte parallel zum Einbau des Versuchs BIT-2, sodass die später beim Versuch BIT-2 festgestellte Anmachlösung in der Kontrollkammer, wahrscheinlich auch den Versuch ASP-1 betrifft.

Der Versuchsaufbau des Versuchs ASP-1 ist in der Abbildung 41 dargestellt.

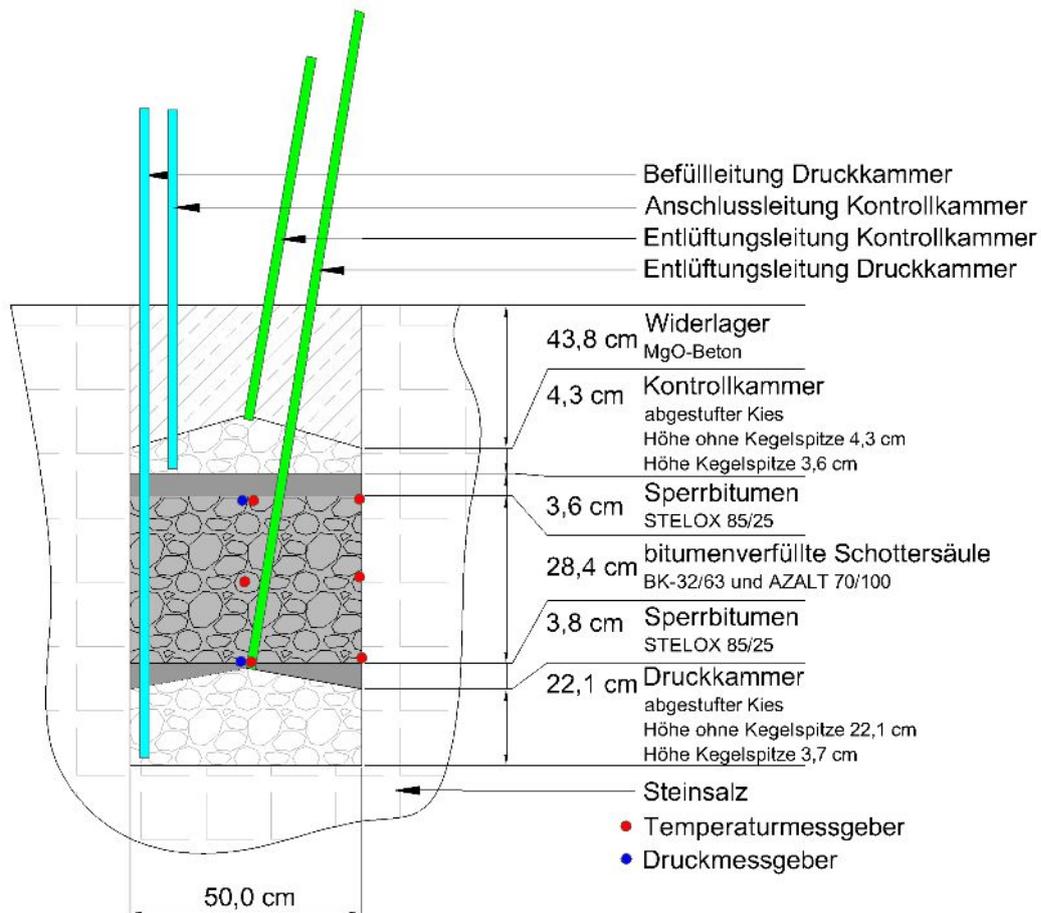


Abbildung 41: Aufbau ASP-1

Im Tiefsten des Versuchsbohrloches wurde eine Druckkammer aus Rundkornschotter und abgestuftem Kies, ähnlich wie bei den Versuchen BIT-1 und BIT-2, aufgebaut. Der Anschluss der Druckkammer erfolgte ebenfalls über 2 Anschlussleitungen, wobei die Druckkammer mit einem kegelförmigen Abschluss am oberen Ende versehen wurde.

Der Porenanteil der Druckkammer ab ca. 80 cm Teufe betrug 37,4 %. Zusammen mit dem Volumen der Anschlussrohre betrug das Volumen der Druckkammer 17554 cm³.

Der Aufbau des Versuchs lässt damit eine Flutung und Druckbeaufschlagung mit Salzlösung zu.

Der Aufbau der Dichtung erfolgte aus einem bitumenverfüllten Schotter BK-32/63. Dabei wurde, um ein Abpressen des verfüllten Bitumens zu limitieren, das weiche Vergussbitumen zwischen 2 dünne Schichten (3,8 cm unten und 3,6 cm oben) aus vergossenem harten Oxidationsbitumen (STELOX 85/25) eingebettet.

Die Einbautemperatur des Oxidationsbitumens in der unteren Sperrschicht lag bei ca. 170 °C. Die Zuleitungen der unteren Druckkammer führten durch die untere Sperrschicht hindurch. Die Mächtigkeit der Sperrschicht betrug im Randbereich ca. 3,8 cm, während im Bereich der kegelförmigen Spitze der Druckkammer die Überdeckung des Sperrbitumens nur ca. 1 mm betrug.

Rund 20 Stunden nach dem Abkühlen der unteren Sperrschicht wurde der trockene Schotter BK-32/63 händisch eingebaut (Abbildung 43). Alle Bereiche der Bohrlochkontur, welche später mit Bitumen in Kontakt kamen, wurden vorher mit einem speziellen Voranstrich auf Basis einer Bitumenlösung [Glaubach et al. 2011] behandelt. Bei einer Schichtstärke von ca. 28,7 cm und einer Einbaumasse von ca. 96 kg ergab sich eine Einbaudichte von ca. 1710 kg/m³, was wiederum einem Porenanteil von ca. 40,9 % entspricht. Abzüglich der Volumina der eingebauten Messtechnik ergab sich ein Porenvolumen im Schotterelement von ca. 22990 cm³.



Abbildung 42: Druckgeber kombiniert mit Thermoelement



Abbildung 43: Oberfläche der abgekühlten unteren Sperrschicht mit dem teilweise eingebauten Schotter und dem Druckgeber D1

Die Temperatur (T1 bis T6) wurde an 6 Stellen (3 am Stoß und 3 in der Mitte des Bohrloches) im Porenraum des Bitumen-Schotterelements während des Heißvergusses gemessen. Zusätzlich wurde der Druck im Schotterporenraum an 2 Stellen (D1 und D2) im Tiefsten und an der Oberfläche des bitumenverfüllten Schotters gemessen. Die schematische Anordnung der Messgeber und die eingemessenen Positionen sind in Abbildung 44 und in Tabelle 3 angegeben.

Die Druckgeber hatten den gleichen Aufbau, wie sie in einem großmaßstäblichen Versuch zur Untersuchung und Optimierung der Einbautechnologie einer mit Bitumen verfüllten Schottersäule angewendet wurden [Glaubach et al. 2013]. Die Druckgeber wurden während des Einbaus des Schotters zwischen den Schotterkörnern positioniert. Ein an den Druckgebern angebrachter Schutzkäfig verhinderte dabei den direkten Kontakt der Schotterkörner mit den Messmembranen der Druckgeber. Des Weiteren wurden die Druckgeber so positioniert, dass die Messmembranen senkrecht zur Richtung des angreifenden Druckes lagen.

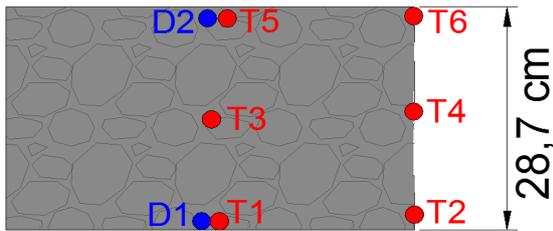


Abbildung 44: Schematische Position der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-1)

Tabelle 3: Positionen der Sensoren in dem mit Bitumen verfüllten Schotterelement (ASP-1)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe in der Schotterschicht [cm]
T1, D1	74	0	26,8
T2	75	0,25	27,8
T3	61	0	13,8
T4	61	0,25	13,8
T5, D2	49	0	1,8
T6	49	0,25	1,8

Das Thermoelement T1 und der Druckgeber D1 wurden zusammen an der gleichen Position eingebaut (vgl. Abbildung 42 und Abbildung 43). Das gleiche gilt auch für das Thermoelement T5 und den Druckgeber D2 (siehe Abbildung 45). Die Anschlussleitungen der einzelnen Thermoelemente wurden mittels Drahts an einzelnen Schotterkörnern befestigt und damit zusammen mit dem Schotter in ihrer Position fixiert (Abbildung 46).



Abbildung 45: Oberfläche des eingebauten Schotterelements mit dem Druckgeber D2



Abbildung 46: Position des Thermoelements T4 an der Bohrlochkontur

Die Messkabel aller Sensoren wurden jeweils in das Innere des Schotterelements gelegt, um etwaige Umläufigkeiten entlang der Messkabel im Bereich der Bohrlochkontur zu verhindern.

Im Anschluss an den Einbau des Schotters wurde dessen Porenraum mit einem Destillationsbitumen AZALT 70/100 bei ca. 170 °C vergossen. Mit einem Vergussvolumen von ca. 23830 cm³ wurde die Schotterschicht mit ca. 850 cm³ etwas „übergossen“ (Abbildung 47). Hinsichtlich der Sättigung des Porenraumes des Schotters mit Bitumen wird von einer nahezu vollständigen Sättigung des Schotterporenraumes ausgegangen.

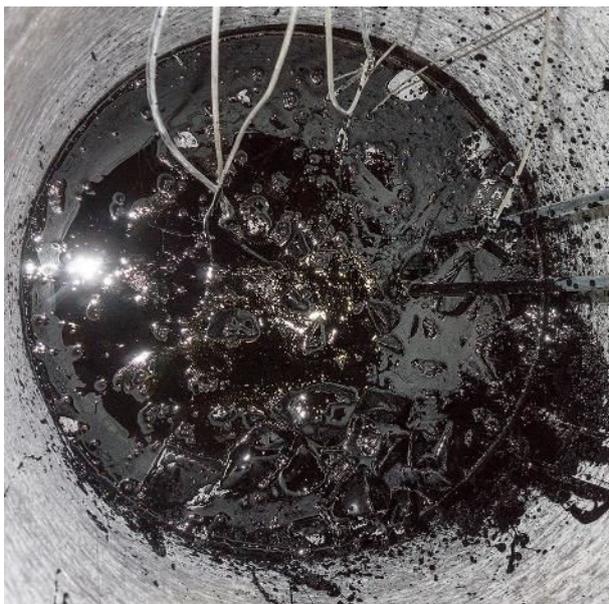


Abbildung 47: Frisch vergossener Schotter mit AZALT 70/100

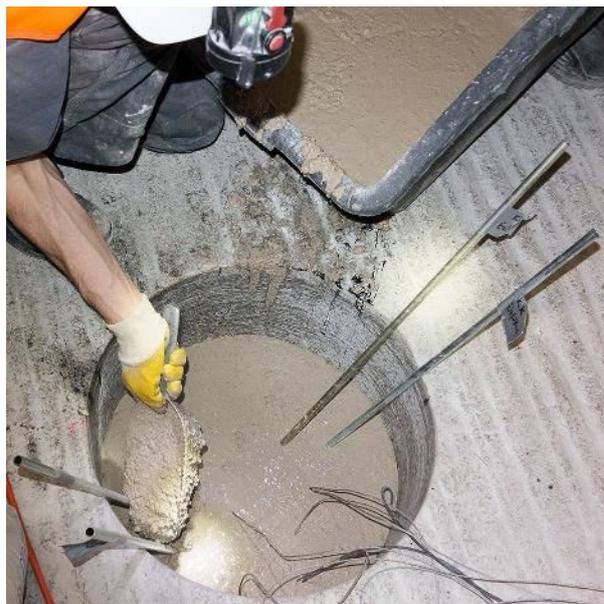


Abbildung 48: Betonage des Widerlagers

Ca. 20 Stunden nach dem Verguss wurde die obere Sperrschicht aus Oxidationsbitumen STELOX 85/25 mit ca. 175 °C eingegossen. Die Mächtigkeit dieser Sperrschicht lag bei ca. 3,6 cm.

Nach weiteren 20 Stunden Abkühlung der oberen Sperrschicht wurde die Kontrollkammer aus abgestuften Kiesen eingebaut. Im Randbereich der oberen Bitumensperrschicht wurde eine 4,4 cm starke Schicht aus Kies 2/4 eingebaut. Der obere Teil der Kontrollkammer wurde wieder kegelförmig ausgeführt. Der Porenanteil der Kontrollkammer betrug 32,9 %. Zusammen mit dem Volumen der Anschlussrohre betrug das Volumen der Kontrollkammer 3764 cm³.

Oberhalb der Kontrollkammer wurde das Widerlager des Versuchsaufbaus aus 180 kg MgO-Beton der Rezeptur C3 eingebaut (Abbildung 48). Die Länge des Widerlagers betrug rund 45 cm. In der Mitte des frisch eingebauten Betons wurde zusätzlich ein Thermoelement positioniert und die den Temperaturverlauf während der Hydratation aufgezeichnete.

2.2.7 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-1

In der Abbildung 49 sind die gemessenen Temperaturverläufe während des Vergusses des Schotters und des Einbaus der oberen Sperrschicht dargestellt.

Wie aus der Abbildung 49 ersichtlich, kühlte das mit 170 °C heißen Bitumen verfüllte Schotterelement schnell ab. Zum Zeitpunkt des Heißeinbaus der oberen Sperrschicht (nach ca. 20 Stunden) betrug die Temperatur im vergossenen Schotterelement ca. 30 °C und war damit weitgehend abgekühlt. Mit dem Verguss der oberen Sperrschicht kommt es zu einer Wiedererwärmung des bereits abgekühlten Schotterelements.

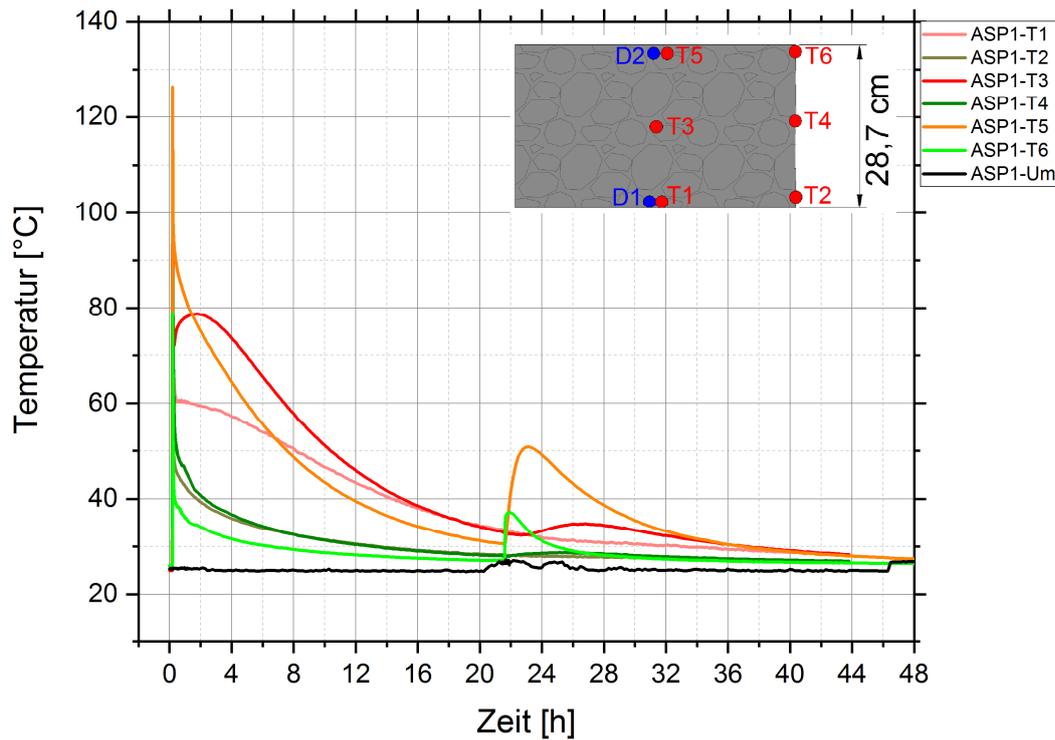


Abbildung 49: Gemessene Temperaturverlauf während des Einbaus der Bitumenschichten (ASP-1)

In der Abbildung 50 sind die gemessenen Temperaturverläufe während der ersten Minuten des Heißvergusses des Schotters dargestellt. Dabei sind an allen Sensoren am Anfang Temperaturmaxima durch das einströmende heiße Bitumen zu verzeichnen. Tendenziell sind die Temperaturspitzen umso niedriger, je tiefer das jeweilige Thermoelement in der Schotterschicht positioniert ist. Tendenziell wurden auch an der Bohrlochkontur jeweils etwas geringere Temperaturmaxima festgestellt. Eine Ausnahme bildet dabei der Sensor T6, welcher an einer Engstelle zwischen einem Schotterkorn und der Bohrlochkontur lag. Dadurch wurde dieser Sensor schlecht durch das heiße Bitumen erreicht, das es sich in dieser Engstelle stärker abkühlte.

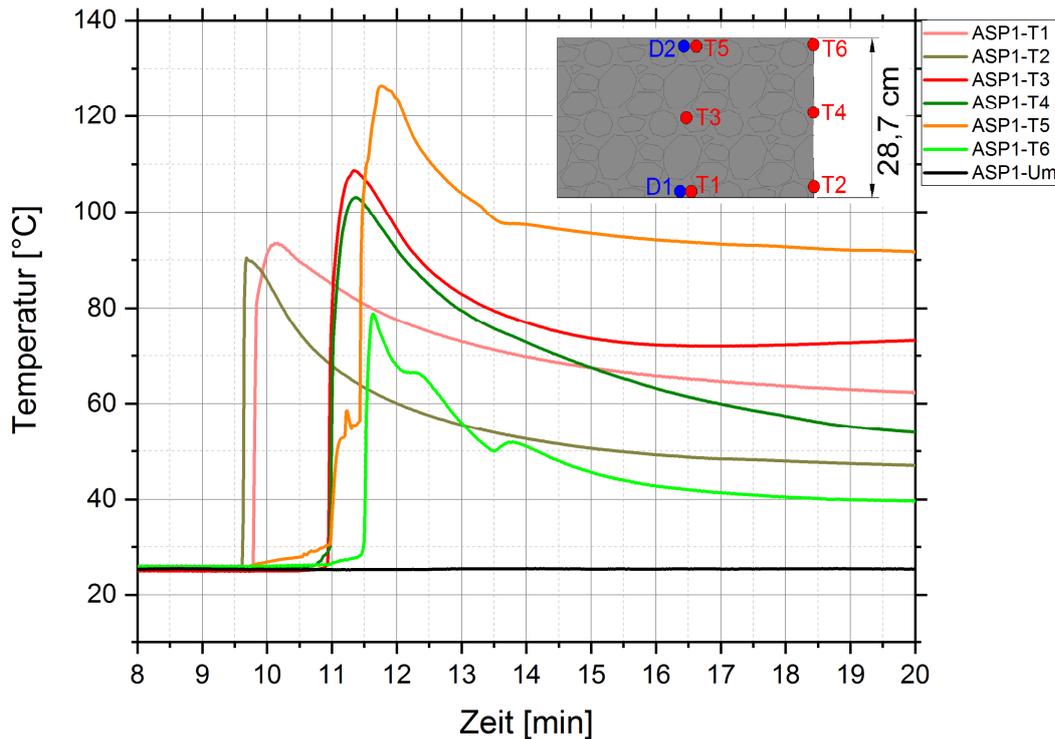


Abbildung 50: Gemessene Temperaturverläufe während der ersten Minuten des Heißvergusses des Schotters

Aus den über die Teufenposition aufgetragenen gemessenen Temperaturmaxima, ergibt sich ein Temperaturabkühlungsgradient von ca. 1,3 K/cm. Dieser Wert steht im Einklang mit den bisher gemachten Erfahrungen.

Nach ca. 10 min ist der Temperaturengleich zwischen dem kalten Schotterkorn, dem angrenzenden Salzgestein und dem heißen Bitumen weitestgehend hergestellt und es stellte sich an der Bohrlochkontur eine Temperatur zwischen 40 °C und 55 °C ein.

In der Abbildung 51 sind die gemessenen Temperaturverläufe während des Eingusses der oberen Sperrschicht dargestellt. Dabei ist augenscheinlich, dass die Sensoren T5 und T6 an der Oberkante des vergossenen Schotterelements nahezu instantan eine Temperaturerhöhung registrierten. Dabei ist bemerkenswert, dass der Sensor T6 am Rand der Bohrlochwandung einen ca. 10-fachen Temperaturanstieg mit 0,3 K/s als der Sensor T5 in der Bohrlochmitte mit ca. 0,03 K/s erfährt. Die Ursache liegt in der guten Wärmeleitfähigkeit des Salzgebirges, welches die Wärme weiterleitet. Dadurch „umströmt“ die Wärmeenergie des Vergusses der oberen Sperrschicht das mit Bitumen verfüllte Schotterelement durch das deutlich besser wärmeleitende Salzgestein.

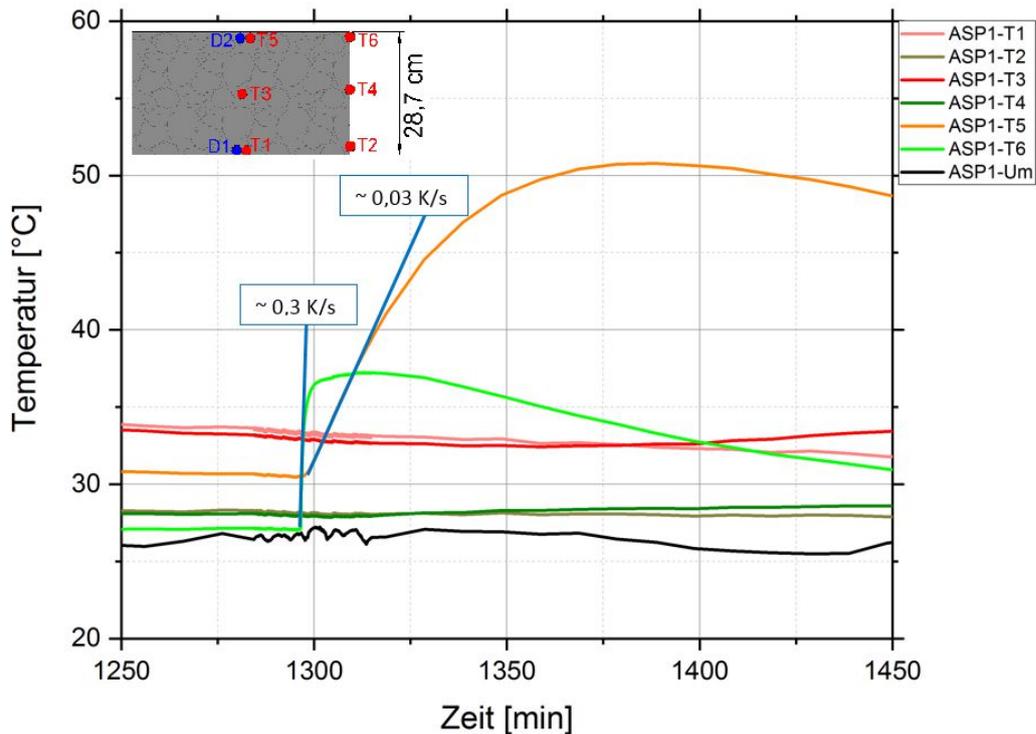


Abbildung 51: Gemessene Temperaturverläufe während der ersten Minuten des Heißvergusses der oberen Sperrschicht

Die eingebauten Druckgeber haben sich ebenfalls in dem Versuchsaufbau bewährt und haben unter den vergleichsweise hohen Vergusstemperaturen im Schotter den sich einstellenden Druck gemessen.

In der Abbildung 52 ist der gemessene Druck im Porenraum des Schotters während des Heißvergusses dargestellt. Die Druckdaten wurden um den lokalen Luftdruck, welcher ebenfalls aufgezeichnet wurde, korrigiert. Neben dem absoluten Druck ist der Druck in Form der hydrostatischen Druckhöhe des Bitumens (Dichte 1010 kg/m^3) angegeben. Danach wurden direkt nach dem Verguss am Sensor D1, welcher bei ca. 26,8 cm Teufe im Schotterelement positioniert war, ca. 27,5 cm Druckhöhe des Bitumens registriert.

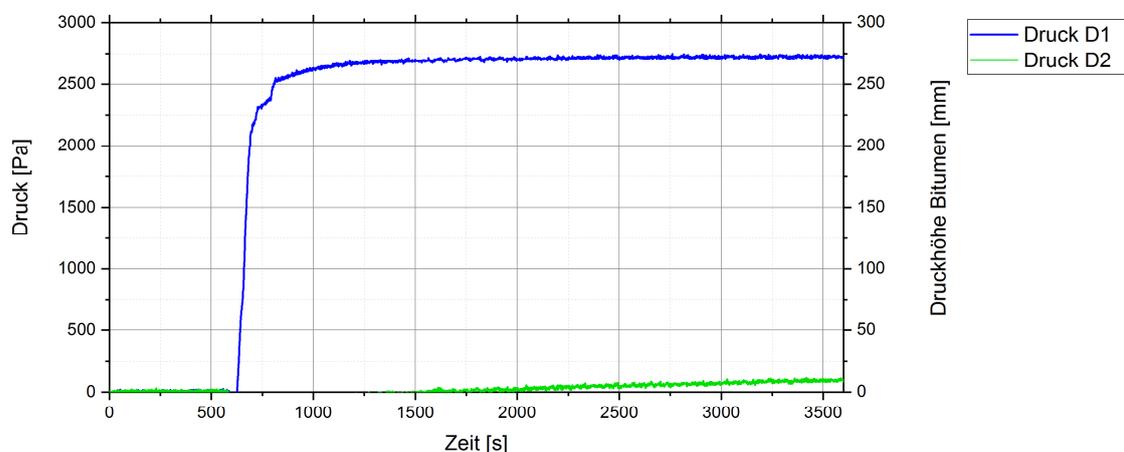


Abbildung 52: Verlauf des gemessenen Drucks während des Heißvergusses des Schotters

Der Sensor D2, welcher bei ca. 1,8 cm Teufe im Schotterelement positioniert war, registrierte eine Druckhöhe des Bitumens von ca. 1,2 cm. Im Rahmen der Genauigkeit der eingesetzten Drucksensoren stellt dies ein nachvollziehbares Ergebnis dar.

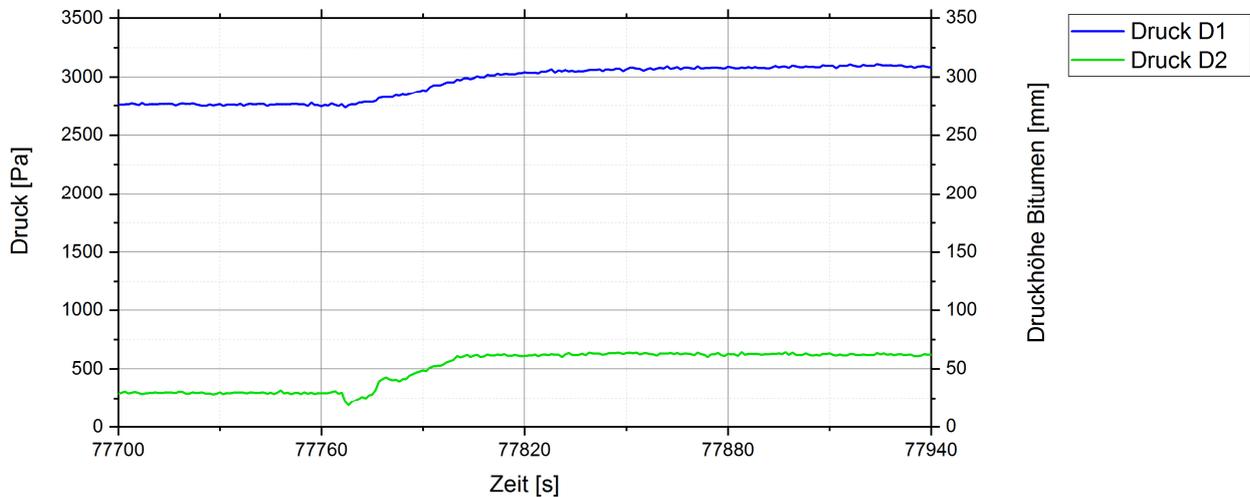


Abbildung 53: Verlauf des gemessenen Drucks während des Heißeinbaus der oberen Sperrschicht

In der Abbildung 53 sind die gemessenen Drücke während des Einbaus der oberen Sperrschicht dargestellt. Auch dabei zeigten die Druckgeber eine nachvollziehbare Reaktion. Der Druck am Sensor D1 stieg dabei um ein Maß, welches einer zusätzlichen Bitumenschicht von ca. 3,2 cm entsprach. Am Sensor D2 wurde eine Druckerhöhe entsprechend 3,4 cm Bitumen registriert. Da tatsächlich 3,6 cm Bitumen in der oberen Sperrschicht eingebaut wurden, sind diese Messergebnisse sehr gut nachvollziehbar.

Die Drücke wurden nahezu instantan und in voller Höhe im bitumenerfüllten Porenraum des Schotters weitergeleitet, was das hydrostatische Verhalten des Bitumens im Schotterporenraum sehr gut belegt.

In der Abbildung 54 ist der gemessene Druckverlauf während des Einbaus der Kontrollkammer und des Frischbetons dargestellt. Am Sensor D1 erhöht sich während des Einbaus der Kontrollkammer der Druck von 3070 Pa auf 4060 Pa. Die Differenz von 990 Pa entspricht bei einer mittleren Einbaudichte von 1815 Kg/m³ und einer mittleren Lasthöhe des Kieses von 5,6 cm. Am Drucksensor 2 wird ein vergleichbarer zusätzlicher Druck von 1050 Pa registriert.

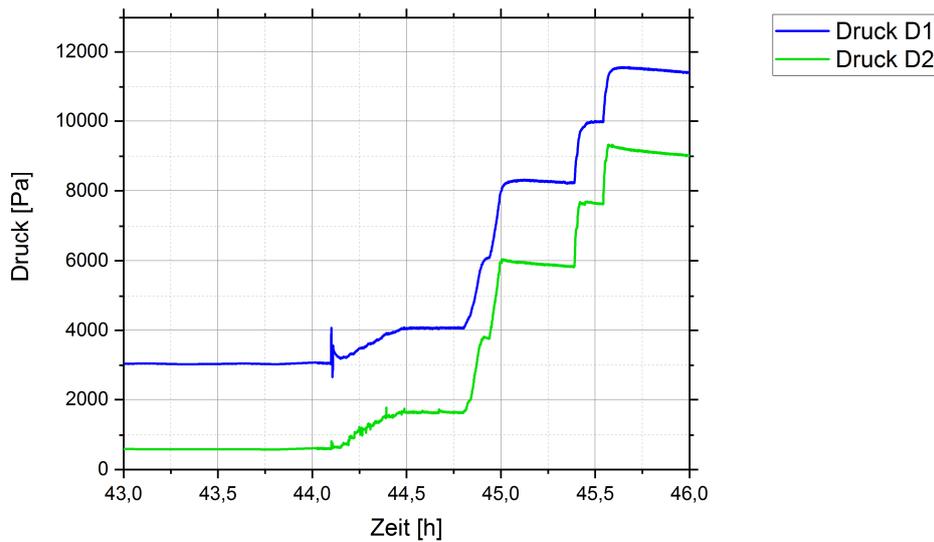


Abbildung 54: Verlauf des gemessenen Drucks während des Einbaus der Kontrollkammer und des Frischbetons

Durch die Betonage wurde im Durchschnitt an beiden Drucksensoren eine Druckerhöhung von 7500 Pa registriert. Bei einer Betondichte von 2300 Kg/m³ ergibt sich damit eine Lasthöhe von 0,34 m, was mit der tatsächlichen Höhe des Betonwiderlagers von 0,45 m nur bedingt vergleichbar ist. Die Ursache konnte nicht zweifelsfrei gefunden werden.

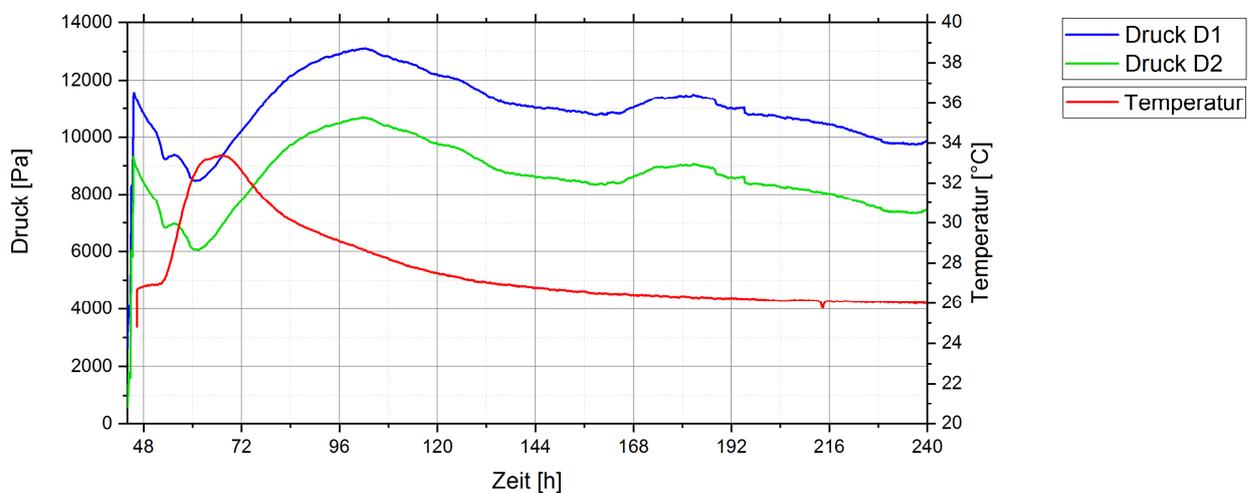


Abbildung 55: Verlauf des gemessenen Drucks während der Hydratation des MgO-Betons im Vergleich zur gemessenen Hydratationstemperatur

In der Abbildung 55 ist der gemessene Druck nach dem Einbau des Frischbetons dargestellt. Danach wird bei beiden Drucksensoren ein anfängliches Abfallen des Drucks registriert. Innerhalb von ca. 15 Stunden fällt der Druck um durchschnittlich 3300 Pa. Gleichzeitig kommt es nach ca. 6 Stunden zu einer Erhöhung der Temperatur im Beton, infolge der einsetzenden Hydratation. Insgesamt steigt die Temperatur in der Mitte des Widerlagers auf ca. 33 °C und damit um ca. 7 K über die umgebende Gebirgstemperatur. Das Maximum wird ca. 21 Stunden nach der Betonage erreicht. Danach fällt die Temperatur im Beton kontinuierlich ab.

Rund 6 Stunden vor Erreichen des Temperaturmaximums im Beton kommt es bei beiden Drucksensoren in der mit Bitumen verfüllten Schottersäule zu einem Ansteigen des Drucks von durchschnittlich 4600 Pa. Das Maximum des gemessenen Drucks wird ca. 42 Stunden nach Beginn des Druckanstieges erreicht. Danach kommt es zu einer langsameren Abnahme des Drucks.

Es ist davon auszugehen, dass mit dem Maximum der Betontemperatur auch die Hydratation des Betons nahezu abgeschlossen war. Damit ist das Widerlager in der Lage zumindest sein Eigengewicht über die Bohrlochwandung abzutragen. Der trotzdem anhaltende Anstieg des Drucks ist eine Folge der Expansion des MgO-Betons. Da jedoch das Material der Kontrollkammer in einem gewissen Maße kompressibel ist, wird der Expansionsdruck des MgO-Betons nur „gedämpft“ in das Bitumen weitergeleitet. Da das Bitumen unter dem Expansionsdruck in den Porenraum der Kontrollkammer penetriert, kommt es wiederum zu einem Druckabbau.

Letztendlich sind alle gemessenen Druckverläufe nahezu plausibel bzw. nachvollziehbar. Die eingesetzten Druckgeber haben sich im Zusammenhang mit dem Versuchsaufbau als brauchbares Hilfsmittel zur Interpretation des komplexen Zusammenspiels der verschiedenen Komponenten des Versuchsaufbaus bewährt.

Ca. 2 Wochen nach der Betonage wurde mit den Messungen der integralen Permeabilität begonnen. Zuerst wurde die Druckkammer mit bis zu 0,1 MPa Gasüberdruck (FREON-dotierte Druckluft) belastet und die Dichtheit des eingebauten Abdichtsystems nachgewiesen. Kurz nach der Druckbeaufschlagung war am gesamten Versuchsaufbau das Tracer gas FREON nirgendwo detektierbar.

In der Abbildung 56 sind die durch die IBeWa gemessenen und angepassten Druckverläufe einer 58-tägigen Versuchsdauer dargestellt.

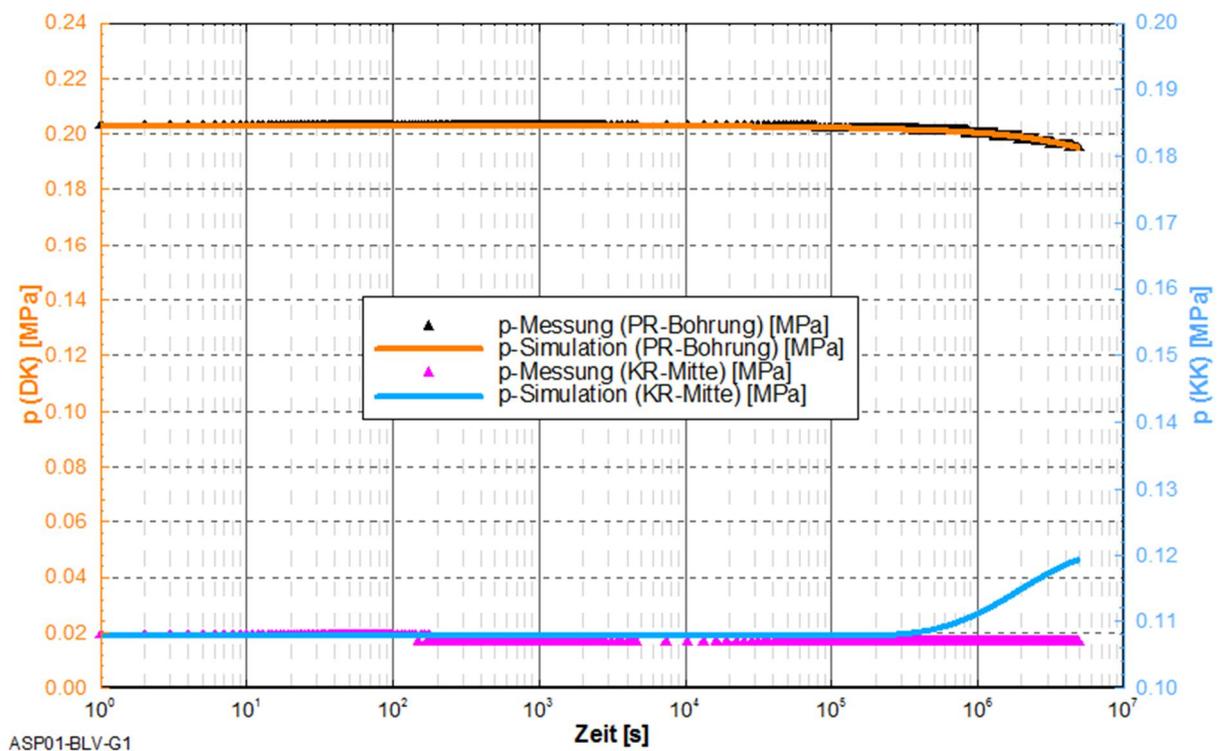


Abbildung 56: Gemessener und angepasster Druckverlauf des Versuchs ASP-1 bei einer Gasdruckbelastung mit von 0,2 MPa

Der gemessene Druckverlauf wurde mit einem strömungstechnischen Modell des Versuchsaufbaus durch die IBeWa angepasst und dabei eine integrale Permeabilität von $4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ bestimmt. Gleichfalls wie bei den Versuchen BIT-1 und BIT-2 ist dabei auffallend, dass der gemessene Druckverlauf in der Kontrollkammer durch den prognostizierten Druckverlauf in der Kontrollkammer nicht bestätigt werden konnte. Die Ursache liegt wahrscheinlich auch hier in einem eher radialen Abströmen des Prüfmediums (Druckluft) in das umliegende Gebirge.

Die gemessene integrale Gaspermeabilität des Versuchs ASP-1 ist im Vergleich zur lokalen Ausgangspermeabilität des Wirtsgesteins von $2 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ rund 2 Größenordnungen höher. Im Vergleich zu den Versuchen BIT-1 und BIT-2 liegt sie jedoch in der gleichen Größenordnung (10^{-20} m^2) und ist damit in Anbetracht der geringen absoluten Permeabilität vergleichbar. Die eingebaute Abdichtung auf Basis einer mit Bitumen verfüllten Schottersäule ist damit mit einer Abdichtung aus einer reinen Bitumenschicht vergleichbar.

Ein Rückbau des Versuchs erfolgte nicht.

2.2.8 Versuchsaufbau ASP-2

Für den Versuch ASP-2 wurde ein Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,5 m und 1 m Teufe genutzt. In der Abbildung 57 ist die Lage des Versuchsbohrlochs relativ zur Versuchsnische 2 dargestellt.

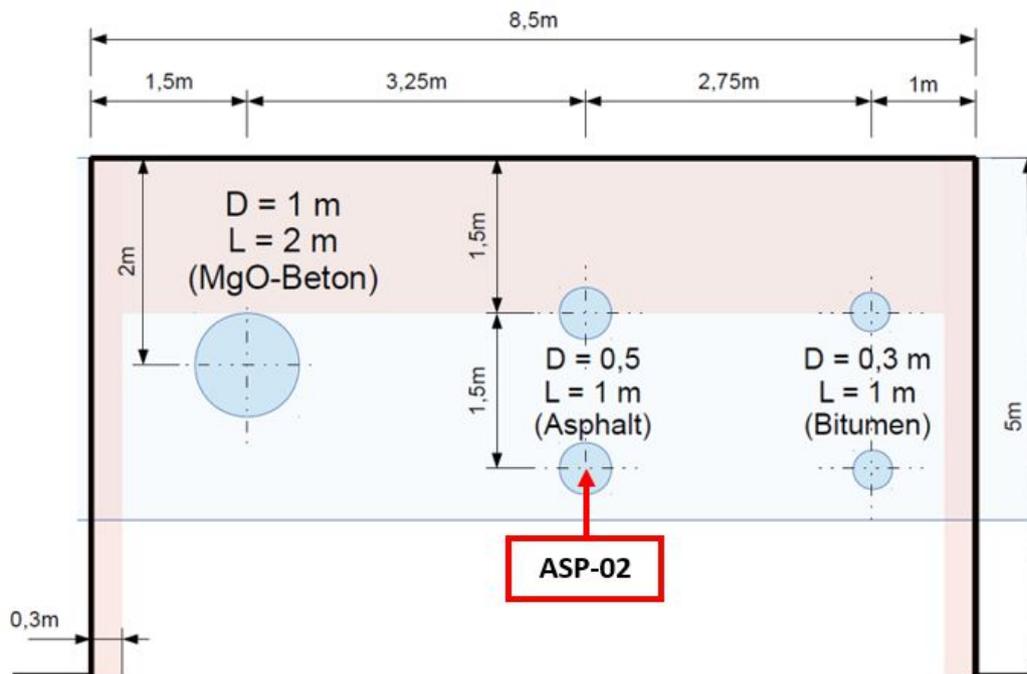


Abbildung 57: Lage des Versuchs ASP-2 in der Versuchsnische 2

Im Versuch ASP-2 wurde der neu entwickelte „Dichte Steinasphalt“ auf Basis eines kantengerundeten Schotters RK-20/40 eingebaut. Zwischen die Steinmatrix wurde Destillationsbitumen ATZALT 70/100 eingebracht. Den Versuchsaufbau des Versuchs ASP-2 zeigt Abbildung 58. Für die Vergleichbarkeit beider Versuche entspricht er dem prinzipiellen Aufbau des Versuches ASP-1. Das Prinzip der Anwendung einer oberen und unteren Sperrschicht („harte Schale-weiher Kern“) wurde beibehalten.

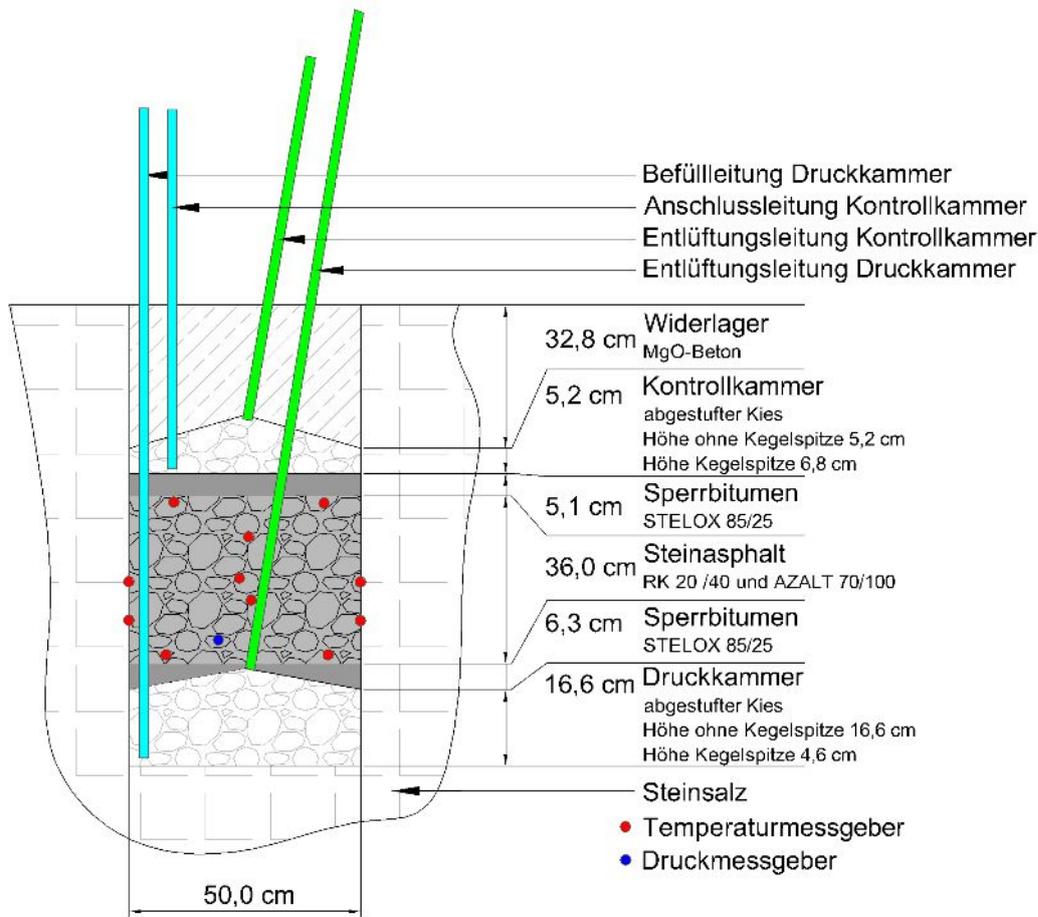


Abbildung 58: Aufbau ASP-2

Im Bohrlochtiefsten ist eine Druckkammer aus abgestuftem Kies angeordnet. Das Porenvolumen der Kammer inkl. Anschlussrohre betrug 12659 cm^3 . Darüber folgte eine Sperrschicht aus dem Oxidationsbitumen STELOX 85/25. Das Oxidationsbitumen für die untere Sperrschicht wurde mit einer Temperatur von rund 181°C eingegossen.

Für den Steinasphalt wurde der Rundkorngschotter mit dem heißem Destillationsbitumen vermischt und in acht Behälter abgefüllt. Die Behälter wurden unter Tage erhitzt und der Steinasphalt anschließend bei einer mittleren Temperatur von $139,6^\circ\text{C}$ eingebaut (Zieltemperatur 140°C). Die Einbaukapazitäten wurden dabei durch den verwendeten Trockenofen limitiert. Daher wurde der Einbau in zwei Phasen geteilt. Der Einbau der unteren Hälfte des Dichtelements erfolgte am 28.01.2016. Die obere Hälfte folgte einen Tag später, nachdem der untere Teil bereits wieder annähernd auf die Umgebungstemperatur abgekühlt war. Beim Einbau bestand zudem das Risiko, dass die heißen Schotterkörner in die untere Sperrschicht einsinken oder diese sogar durchdringen. Das hätte zur Folge, dass das niedriger viskose Destillationsbitumen in die Druckkammer abfließt. Die zeitliche Staffelung des Asphalteinbaus half dieses Risiko zu minimieren.

Der Verguss der oberen Sperrschicht (STELOX 85/25) erfolgte einen Tag nach dem Einbau des Steinasphalts. Die Vergusstemperatur betrug dabei 167°C . Kontrollkammer und Widerlager wurden analog dem Versuch ASP-1 errichtet. Das Porenvolumen der Kontrollkammer bezifferte sich auf 5645 cm^3 .

Das Verschlusselement aus Steinasphalt wurde mit elf Temperatursensoren und einem Drucksensor bestückt. Die Anordnung der Sensoren ist in Abbildung 59 dargestellt. Die genaue Position der Sensoren ist in Tabelle 4 aufgeführt.

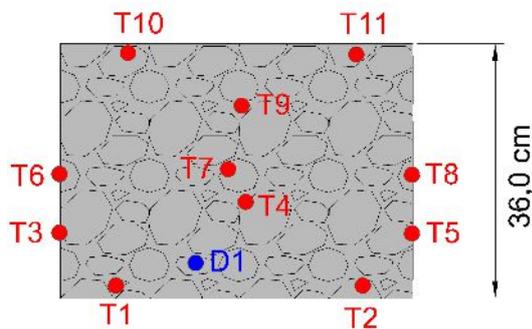


Abbildung 59: Schematische Position der Sensoren im Steinasphalt (ASP-2)

Technologisch gestaltet sich der Heißeinbau des Steinasphalts zeitaufwendiger als der Verguss des Bitumens im Versuch ASP-1, da die Masse der Steinmatrix ebenfalls vorgewärmt wird. Entsprechend wurde eine größere Anzahl an Temperatursensoren und eine andere Anordnung gewählt, was die räumliche und zeitliche Auflösung der Temperaturmessung beim eimerweisen Einbau erhöht.

Tabelle 4: Positionen der Sensoren im Steinasphalt (ASP-2)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe in der Asphaltsschicht [cm]
T1	77,7	19	35,3
T2	77,7	19	35,3
T3	69,1	25	26,7
T4	68,5	1	26,1
T5	68,8	25	26,4
T6	59,8	25	17,4
T7	63,1	2	20,7
T8	60,1	25	17,7
T9	51,9	0	9,5
T10	43,1	14	0,7
T11	43,1	16	0,7
D1	75,1	6	32,7

2.2.9 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-2

Der Temperaturverlauf des Versuchs ASP-2 ist in Abbildung 60 aufgetragen. Deutlich erkennbar ist der gestaffelte Einbau des heißen Steinasphalts, wobei der obere Bereich des Dichtelements einen Tag nach dem unteren Bereich eingebracht wurde.

Im Zeitraum der ersten Einbauphase sind kleinere Ausschläge zu erkennen, welche durch den Versturz der einzelnen mit Steinasphalt gefüllten Behälter erklärt werden. Bereits nach einem Tag kühlte der untere Bereich des Dichtelements von 139 °C Einbautemperatur auf unter 35 °C ab. Die zweite Einbauphase führte zu einem erneuten Wärmeeintrag, was sich an den Messkurven der mittig angeordneten Sensoren ASP2-T4 und ASP2-T7 deutlich zeigt. Weniger stark steigt die Temperatur an den tieferliegenden Sensoren. Ein Wärmeeintrag ist jedoch an allen Sensoren festzustellen. Rund 36 Stunden nach dem Einbau des oberen Abschnitts wurde die Umgebungstemperatur erreicht.

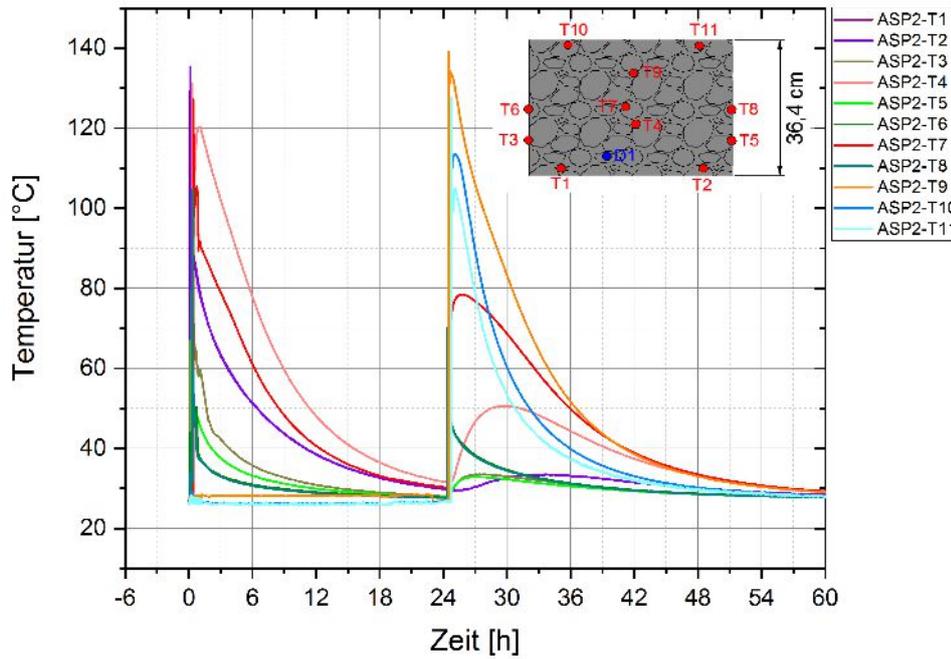


Abbildung 60: Temperaturverlauf im Versuch ASP-2

Die obere Sperrschicht wurde fünf Tage nach der ersten bzw. vier Tage nach der zweiten Einbaustappe des Steinasphalts vergossen. Die Temperatur an den oben positionierten Sensoren ASP2-T10 und ASP2-T11 erhöhte sich dabei am stärksten und erreichte im Maximum 64 °C. Die Temperatur an den unteren Sensoren stieg zwischen fünf und zehn Stunden versetzt um wenige Grad an. Der Verlauf ist in Abbildung 61 zu sehen.

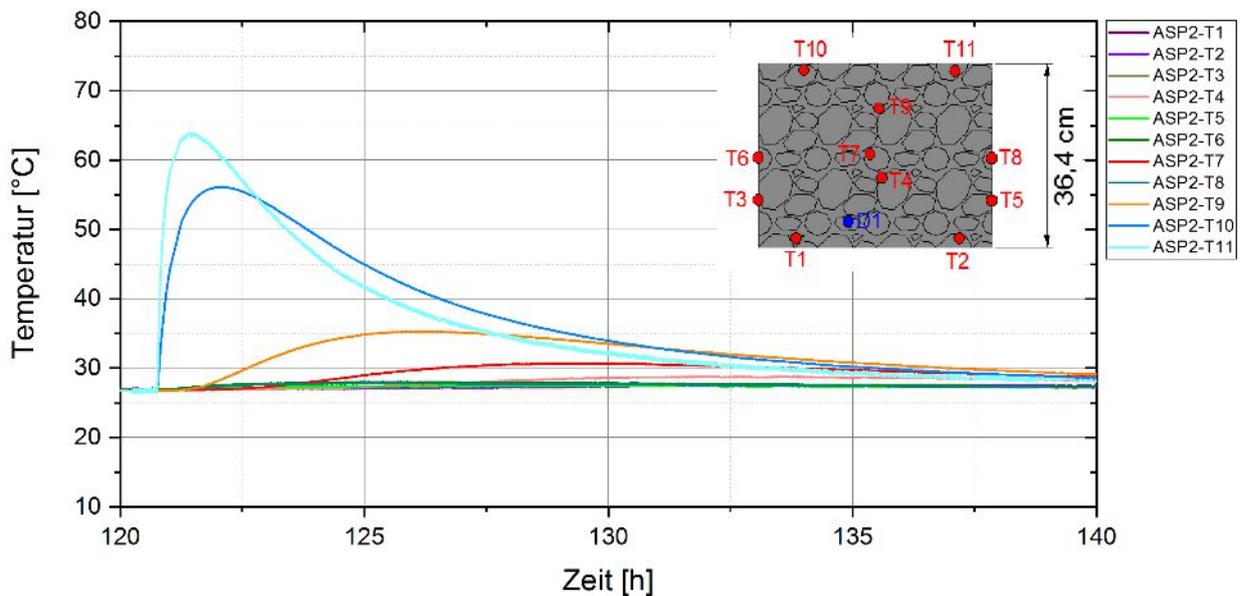


Abbildung 61: Temperaturverlauf nach dem Verguss der oberen Sperrschicht (ASP-2)

Der registrierte Druckverlauf am Sensor D1 ist in Abbildung 62 bildlich dargestellt. Klar erkennbar ist zunächst der Druckanstieg während des Heißeinbaus des Asphalts. Während der ersten Einbauphase stieg der Druck auf 625 Pa über dem Luftdruck, was rechnerisch einer Druckhöhe von rund 6,4 cm im Bitumen entspricht. Mit dem Abkühlen des Asphalts sank auch der Druck ab.

Während der zweiten Einbauphase stieg der Druck abermals und erreichte einen Höchstwert von 5300 Pa bzw. eine theoretische relative Druckhöhe von 54 cm im Bitumen. Danach fiel der Druck, da das Bitumen abkühlte und die Auflast zunehmend über das Korngerüst der Schottermatrix abgetragen wurde.

Die Druckhöhe korrelierte in diesem Versuch nicht mit der tatsächlichen Höhe der Bitumenüberdeckung, was auch nicht mit der temperaturabhängigen Dichteänderung des Bitumens erklärt werden kann. Vielmehr dominierten die Ausprägung des Korngerüsts und damit Zugspannungen im Bitumen die lokale Druckentwicklung. Tendenziell kann der Druckverlauf aber als Indikator für die jeweiligen Arbeitsvorgänge genutzt werden. So kann der Verguss der oberen Sperrschicht an Tag sechs, der darauffolgende Einbau der Kontrollkammer sowie der Einbau des Betonwiderlagers (Tag sieben) am Druckverlauf abgelesen werden.

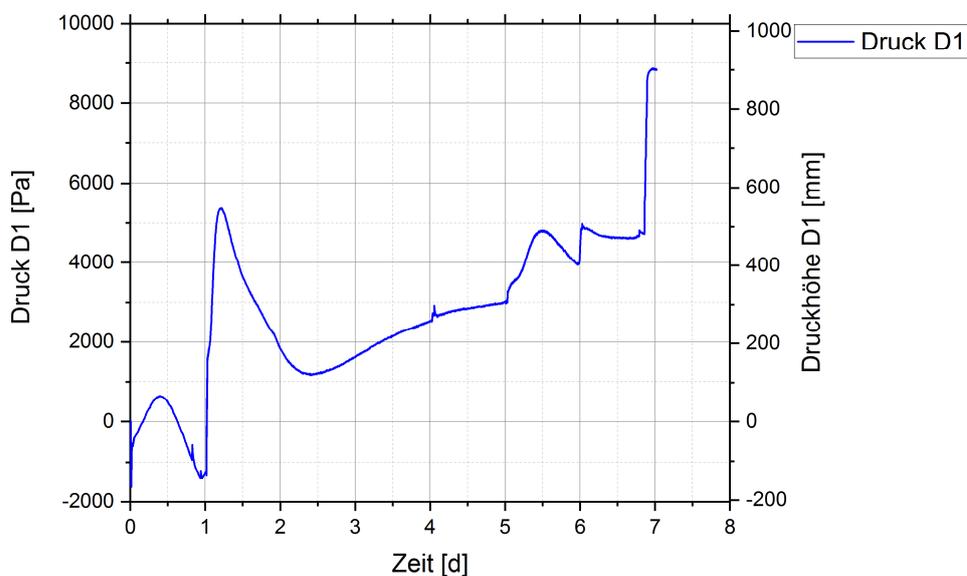


Abbildung 62: Druckverlauf am Sensor D1 im Versuch ASP-2

Die Messung der integralen Permeabilität des Dichtelements und des ihn umgebenden Gebirges wurde wie bei den voranstehenden Versuchen durch die IBeWa umgesetzt. Die Druckkammer wurde analog ASP-1 mit Freon dotierter Druckluft und 0,13 MPa Überdruck beaufschlagt. Anschließend wurde der Druckabfall sowie der Gasdruckverlauf in der Kontrollkammer aufgezeichnet (siehe Abbildung 63). Das Tracergas FREON konnte im Umfeld des Versuchs nicht detektiert werden, was ein Ausströmen aus dem Versuchskörper in den offenen Grubenraum ausschließt. Die integrale Permeabilität wurde auf $k \leq 3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ berechnet.

Auch für Versuch ASP-2 wurde ein strömungstechnisches Modell erstellt und mit dem realen Messverlauf verglichen. Die Messung des Druckverlaufs in der Kontrollkammer stimmt auch hier wieder nicht mit der Simulation überein. Wahrscheinlich wurde durch die Druckbeaufschlagung Bitumen von unten in den Porenraum der Kontrollkammer bedrückt, was das gegebene Bild eines Druckabfalls in der Druckkammer und einen Druckanstieg in der Kontrollkammer ergibt. Ein zusätzliches radiales Abströmen aus der Druckkammer in das Gebirge ist nicht auszuschließen.

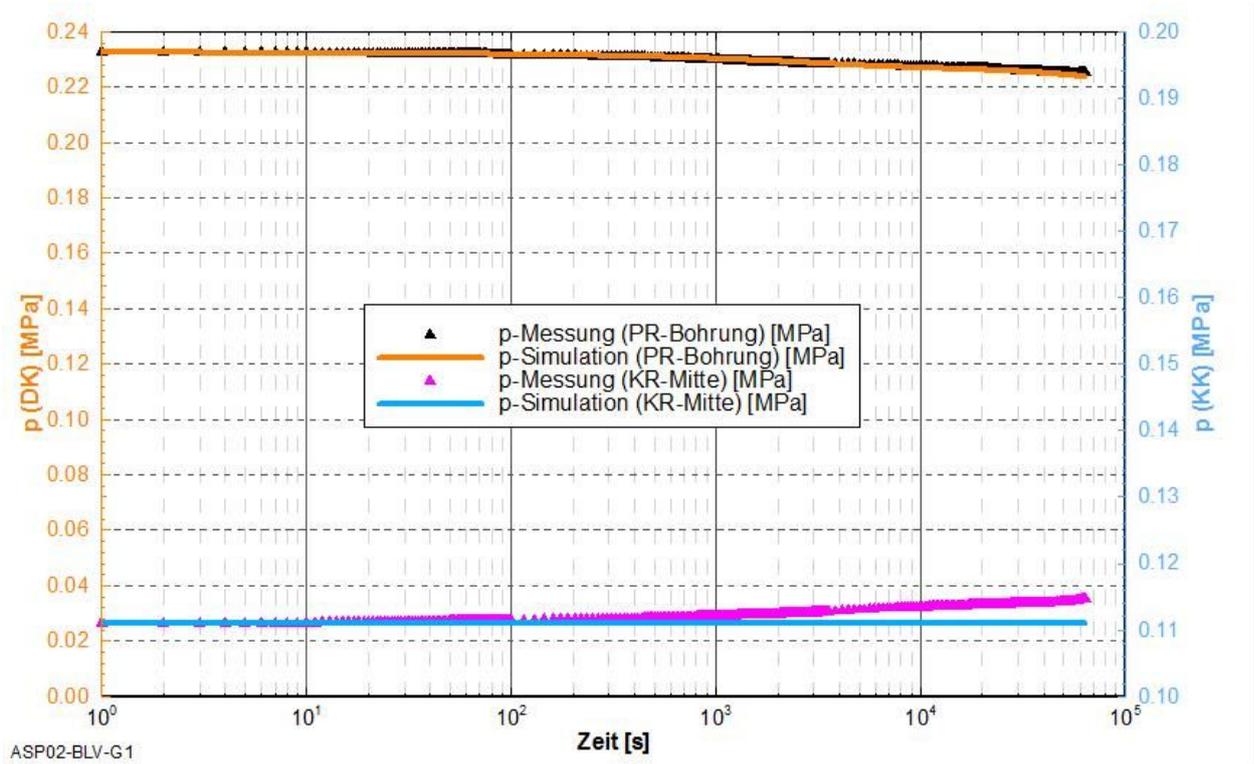


Abbildung 63: Gemessene und angepasste Druckverläufe des Versuchs ASP-2 bei einer Gasdruckbelastung mit von 0,23 MPa

Ein Rückbau des Versuchs erfolgte nicht.

2.3 Bohrlochversuche im Tongebirge

Informationen zum Versuchsort und zu den Kennwerten des Tongebirges finden sich im Abschnitt 2.3 des Teilberichtes zum Arbeitsschritt 4.1. Für jeden der drei Teilversuche wurde ein 1,0 m tiefes Bohrloch abgeteuft. Das Bohrloch des Teilversuchs BIT-3 wurde mit einem Durchmesser von 0,3 m hergestellt. Die Bohrlöcher der Teilversuche ASP-3 und ASP-4 betragen im Durchmesser 0,5 m. Der Abstand der Bohrlöcher zueinander wurde auf 10 m festgelegt, sodass ausgeschlossen werden konnte, dass sich die Versuche gegenseitig beeinflussen.

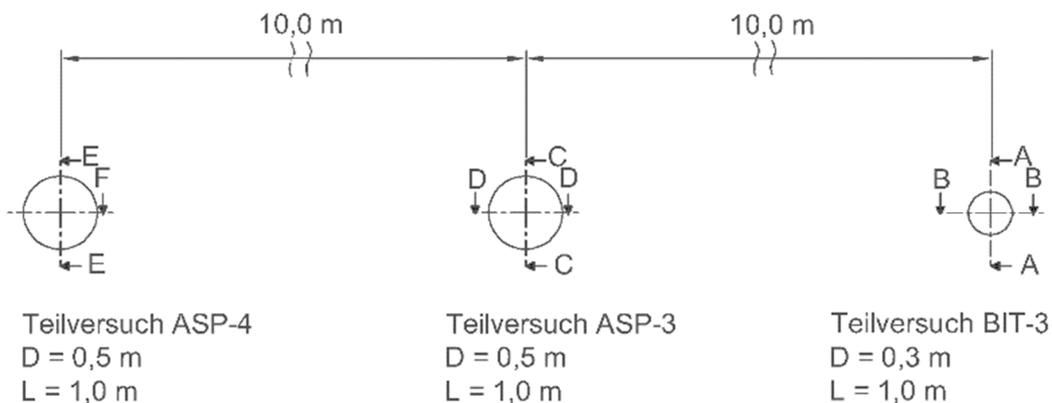


Abbildung 64: Versuchsanordnung der Teilversuche im Ton

2.3.1 Versuchsaufbau BIT-3

Der Aufbau des Versuchs BIT-3 orientiert sich am Versuch BIT-2, welcher im März 2015 im Wirtsgestein Steinsalz durchgeführt wurde. Die Maße des Versuchs wurden dabei weitestgehend übernommen und geringfügig an die Verhältnisse im Ton angepasst. Somit sind die Versuche vergleichbar.

Für das Bohrloch wurde die 1 m tiefe Erkundungsbohrung als Pilotbohrung genutzt und überbohrt. Die Bohrung erfolgte durch die Fa. Lohse Diamantbohrtechnik drehend, trocken und unter Verwendung einer Druckluftspülung, um den Ton möglichst wenig zu beeinflussen. Der Kern wurde anschließend von Hand gebrochen und entfernt. Der Durchmesser des Bohrloches betrug 30,6 cm ($\pm 0,1$ cm), die Teufe 102,1 cm ($\pm 0,4$ cm). Die Bohrarbeiten sind in Abbildung 65 zu sehen.



Abbildung 65: Herstellung der Bohrlöcher

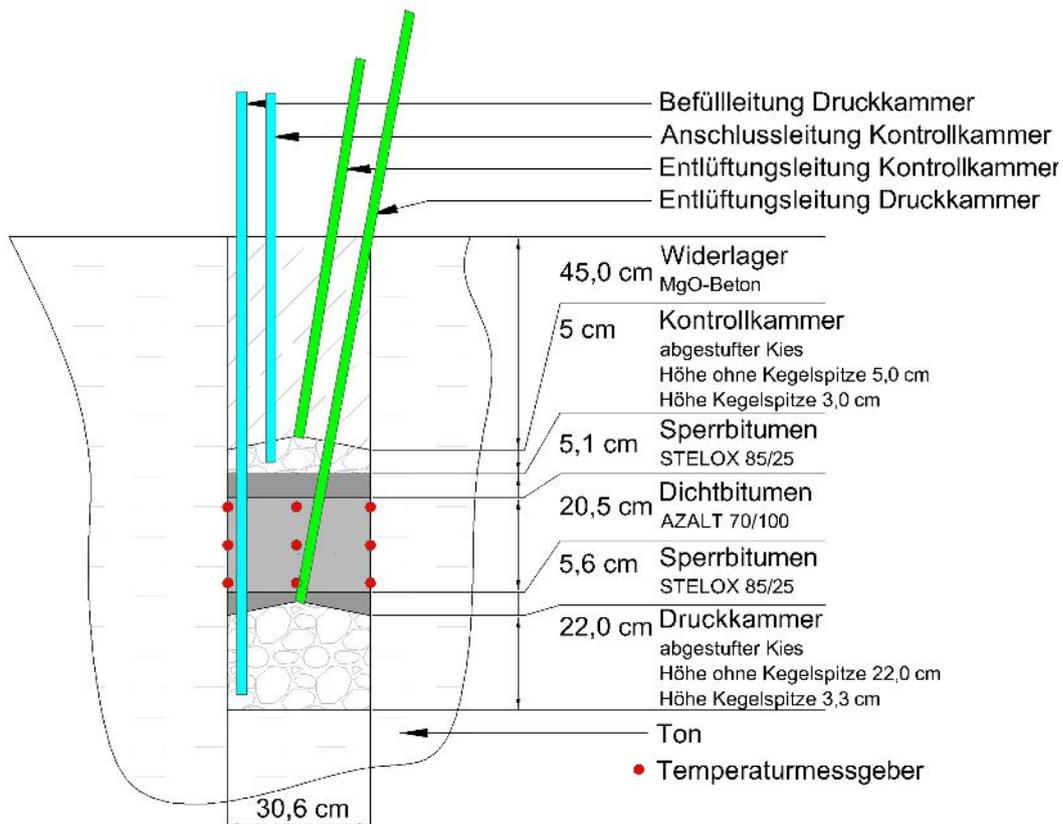


Abbildung 66: Aufbau BIT-3

Der Einbau der verschiedenen Komponenten erfolgte unmittelbar im Anschluss an die Bohrlochherstellung. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 66 dargestellt.

Im Bohrlochtiefsten wurde eine Druckkammer aus einem Rundkornsotter 20/40 mm eingebaut. Im oberen Bereich der Druckkammer wurde ein abgestufter Kies der Körnungen 8/16 mm, 5/8 mm, 3/6 mm und 2/4 mm eingebracht, um ein Eindringen des darüberliegenden Bitumens zu unterbinden. Abbildung 67 zeigt die vorbereiteten Körnungen. Die Druckkammer wurde zudem im oberen Bereich kegelförmig ausgeführt, um eine spätere Entlüftung der Kammer zu erleichtern. Ein Befüllrohr wurde im Bohrlochtiefsten eingebaut, um die Kammer mit Druck zu beaufschlagen. Zur Entlüftung endet ein zweites Rohr in der Kegelspitze der Kammer. Die Rohre bestanden aus Edelstahl. Die Ausführung mit getrennter Befüll- und Entlüftungsleitung ermöglicht grundsätzlich nach einer Beaufschlagung mit Gas eine anschließende Beaufschlagung mit Flüssigkeit.



Abbildung 67: Zusammenstellung der Kornfraktionen



Abbildung 68: eingebaute Thermolemente

Im Anschluss an die Druckkammer wurde der Versuch mit 17 Thermoelementen (Typ T) bestückt. Drei Elemente wurden mit Hilfe von Glasfaserstäben entlang der Mittelachse des Bohrloches positioniert, sodass Temperaturmessungen im Kern sowie im oberen und unteren Bereich des Dichtelements erfolgen konnten (siehe Abbildung 68). Sechs Thermoelemente wurden mit Metallkrampen paarweise und gegenüberliegend an der Kontur des Bohrloches fixiert. Auch hier wurde die Temperatur im oberen und unteren Bereich des Dichtelements sowie in der Mitte erfasst. Acht weitere Thermoelemente wurden paarweise und gegenüberliegend in den Ton eingebaut. Der Abstand der Elemente von der Kontur betrug 2 cm, 5 cm, 10 cm und 15 cm. Hierfür wurden mit einem dünnen Bohrer horizontale Löcher in den Ton gebohrt und die Elemente eingeführt. Anschließend wurden die Löcher mit dem gleichen Ton wieder verstopft. Ein 18. Thermoelement wurde zu Messung der Umgebungstemperatur außerhalb des Versuchs angeordnet.

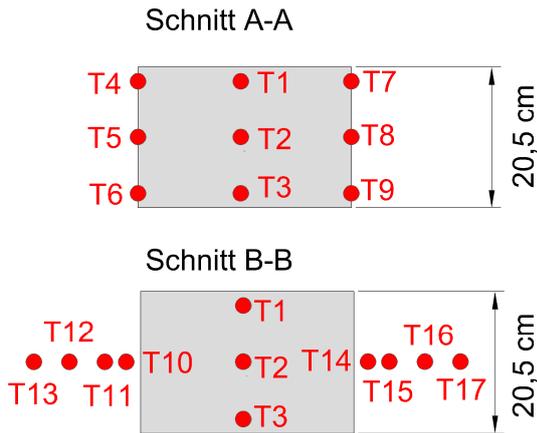


Abbildung 69: Schematische Position der Sensoren im Bitumen (BIT-3)

Tabelle 5: Positionen der Sensoren im Bitumenelement (BIT-3)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe in der Bitumenschicht [cm]
T1	57	0	2
T2	65	0	10
T3	73	0	18
T4	57	15	2
T5	65	15	10
T6	73	15	18
T7	57	15	2
T8	65	15	10
T9	73	15	18
Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Entfernung von der Kontur [cm]
T10	65	17	2
T11	65	20	5
T12	65	25	10
T13	65	30	15
T14	65	17	2
T15	65	20	5
T16	65	25	10
T17	65	30	15

Über die Druckkammer wurde eine dünne Schicht aus 2,7 kg Oxidationsbitumen der Sorte STELOX 85/25 eingebracht, die am Rand rund 5,6 cm dick und in der Mitte ca. 2,2 cm dick war. Die Eingusstemperatur betrug 180 °C. Das Oxidationsbitumen bildete eine Sperrschicht und drang im heißen Zustand nicht in die Druckkammer ein.

Nach Abkühlung des Sperrbitumens auf Umgebungstemperatur folgte eine Bitumenschicht aus 15,4 kg Destillationsbitumen der Sorte AZALT 70/100, welches als Dichtelement diente. Die Eingusstemperatur für das Destillationsbitumen wurde mit 170 °C gewählt (siehe Abbildung 70).

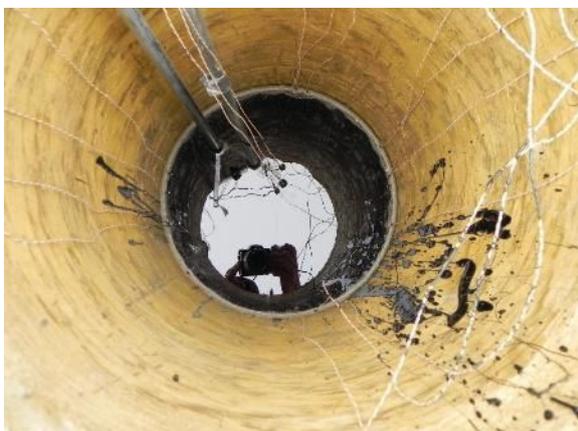


Abbildung 70: heißes Destillationsbitumen kurz nach dem Einguss

Danach war eine weitere Sperrschicht aus Oxidationsbitumen STELOX 85/25, eine Kontrollkammer aus abgestuftem Kies und ein Betonwiderlager bis zur Geländeoberkante geplant.

Der Versuch wurde nach der einbaubegleitenden Temperaturmessung aufgrund ungünstiger Witterungsverhältnisse nicht fortgeführt. Die Permeabilitätsmessung wurde nicht mehr durchgeführt.

2.3.2 Messprogramm und Ergebnisse Versuch BIT-3

Die Temperaturentwicklung des Bitumens und des umgebenden Tons wurde versuchsbegleitend gemessen. Dazu wurden 18 Thermoelemente verwendet, wobei 17 Stück direkt in den Versuch integriert wurden. Eines wurde zur Messung der Umgebungstemperatur eingesetzt. Die Temperaturverläufe sind in Ausschnitten in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Die Messung wurde am 21. Juni 2017 um 17:51 Uhr mit Beginn des Eingusses des Oxidationsbitumens gestartet. Das Messintervall wurde auf eine Minute festgelegt. Die Umgebungstemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt 25 °C. Die Temperatur des Tons lag zum Messbeginn bei rund 18 °C.

Die Thermoelemente kamen während des Einbaus der unteren Sperrbitumenschicht nicht mit Bitumen in Kontakt und die unteren Elemente befanden sich nach dem Einbau ca. 2 cm über der Sperrbitumenoberfläche. Die Lufttemperatur im Bohrloch stieg auf ca. 44 °C an und kühlte innerhalb von vier Stunden des über Nacht abgedeckten Versuchs wieder auf die Ausgangstemperatur ab. Das Maximum an der Kontur lag 30 Minuten nach Einguss bei 29,5 °C. Die Temperatur des Tons stieg geringfügig um 3 K an und nahm im Maximum erwartungsgemäß mit steigender Entfernung von der Kontur ab (siehe Abbildung 71).

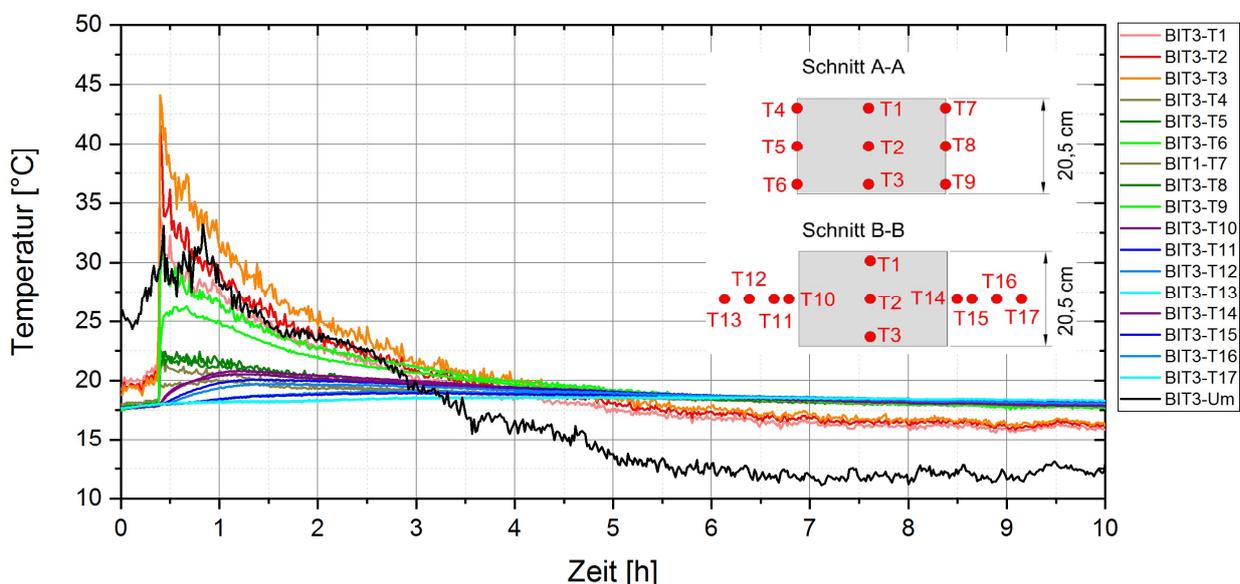


Abbildung 71: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der unteren Sperrbitumenschicht

Der Einguss des Destillationsbitumens begann am 22. Juni um 13:25 Uhr und endete nach zehn Minuten. Das Messintervall wurde hierfür auf eine Sekunde verkürzt und für die folgenden 40 Minuten beibehalten, bevor es aufgrund der begrenzten Speicherkapazität des Datenloggers wieder auf eine Minute umgestellt wurde. Dies ermöglichte eine höhere Datendichte während und kurz nach dem Einguss.

Die Umgebungstemperatur betrug zu Einbaubeginn 31 °C, die des Tons im Durchschnitt 18 °C. Das Bitumen wurde bei 170 °C aus dem Wärmeschrank genommen und zügig eingegossen.

Die maximale Temperatur wurde mit 163,1 °C am Thermoelement 2 registriert, welches sich genau im Zentrum des Bitumens befand. Die Temperaturmaxima entlang der Bohrlochachse unterschieden sich kaum, was auf den schnellen Einbau des Bitumens zurückzuführen ist (siehe Abbildung 72). Die Temperaturmaxima entlang der Kontur variierten stark und bewegten sich zwischen 60,3 °C und 139,4 °C, wobei die Werte des im mittleren Randbereich des Bitumenkörpers positionierten Thermoelementepaares mit 98,8 °C bzw. 101,2 °C nahezu gleich hoch waren. Die Temperaturspitzen im oberen Abschnitt lagen mit 60,3 °C und 87,0 °C ebenfalls in einem vergleichbaren Temperaturbereich (siehe Abbildung 73). Die hohe Temperatur von 139,4 °C am Thermoelement 6 lässt vermuten, dass die Messspitze des Elements leicht von der Kontur abstand und somit in das heiße Bitumen ragte. Entsprechend konnten die Werte des Elements nicht für eine Betrachtung der Temperaturentwicklung an der Kontur herangezogen werden.

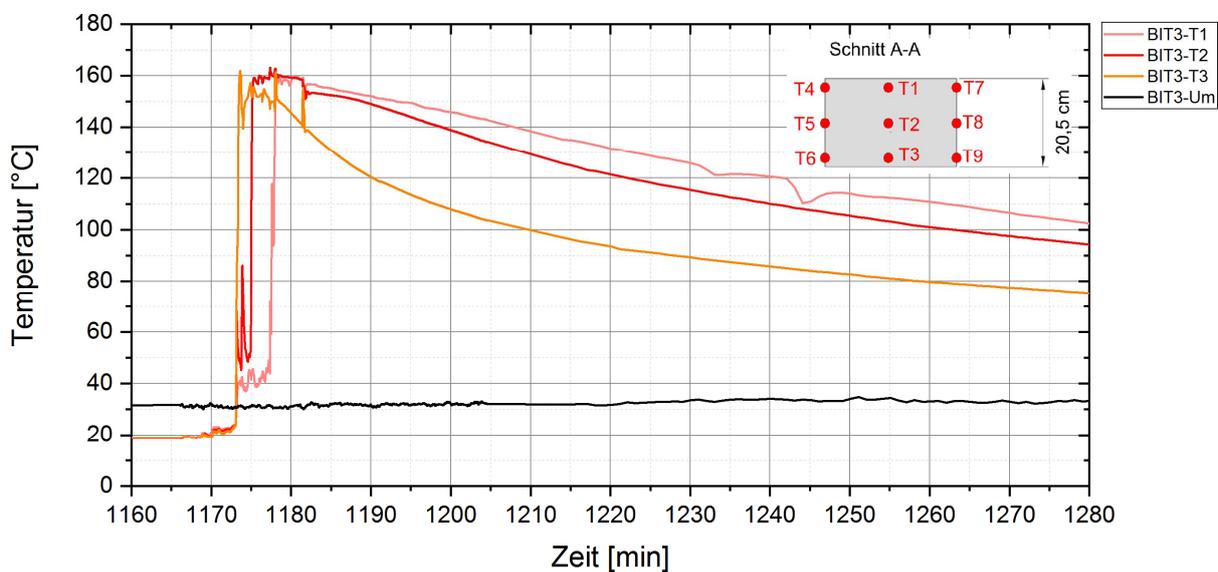


Abbildung 72: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse

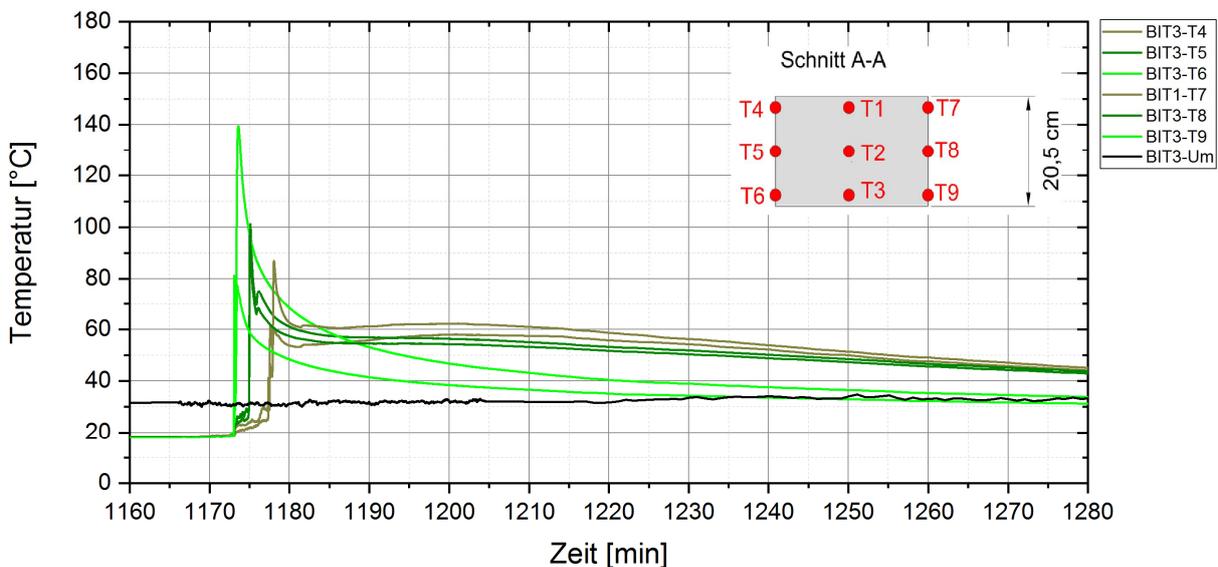


Abbildung 73: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur

Die Temperaturentwicklung in Ton zeigte erwartungsgemäß einen verzögerten Anstieg der Temperatur auf. Je weiter sich der Messpunkt von der Kontur entfernt befand, desto mehr Zeit verging, bis das Temperaturmaximum erreicht wurde. Ebenso konnte bestätigt werden, dass die Temperaturmaxima mit zunehmender Entfernung von der Kontur abnahmen. Das Temperaturmaximum in 2 cm Entfernung zur Kontur wurde bereits nach 41 Minuten erreicht. Der Ton erwärmte sich dabei auf annähernd 40 °C, was einem Temperaturanstieg um 20 K entspricht. In 5 cm Tiefe verringerte sich der Betrag der Höchsttemperatur auf 31 °C bis 34 °C, welcher nach ca. 1 Stunde 15 Minuten erreicht war. In 10 cm Tiefe betrug die Höchsttemperatur nach etwa 2 Stunden 30 Minuten noch rund 25 °C, in 15 cm Tiefe nach 3 Stunden knapp 22 °C. Die Messwerte sind in Tabelle 6 enthalten und grafisch in Abbildung 74 dargestellt.

Tabelle 6: Temperaturmaxima im Versuch BIT-3

Thermo- element	Position	Temperatur- maximum	Zeitspanne zwischen Eingussbeginn und Temperaturmaximum
Lfd. Nr.	-	°C	[min]
1	Mittelachse, oberer Bereich Dichtelement	159,5	7
2	Mittelachse, Mitte Dichtelement	163,1	4
3	Mittelachse, unterer Bereich Dichtelement	161,8	1
4	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	60,3	5
5	Kontur, Mitte Dichtelement	101,2	2
6	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	139,4	1
7	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	87,0	5
8	Kontur, Mitte Dichtelement	98,8	2
9	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	81,1	0
10	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	38,2	41
11	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	34,0	73
12	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	25,1	151
13	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	21,8	216
14	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	39,2	41
15*	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	24,9	151
16*	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	31,3	79
17	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	21,7	207

*Die Thermoelemente 15 und 16 wurden beim Einbau vertauscht.

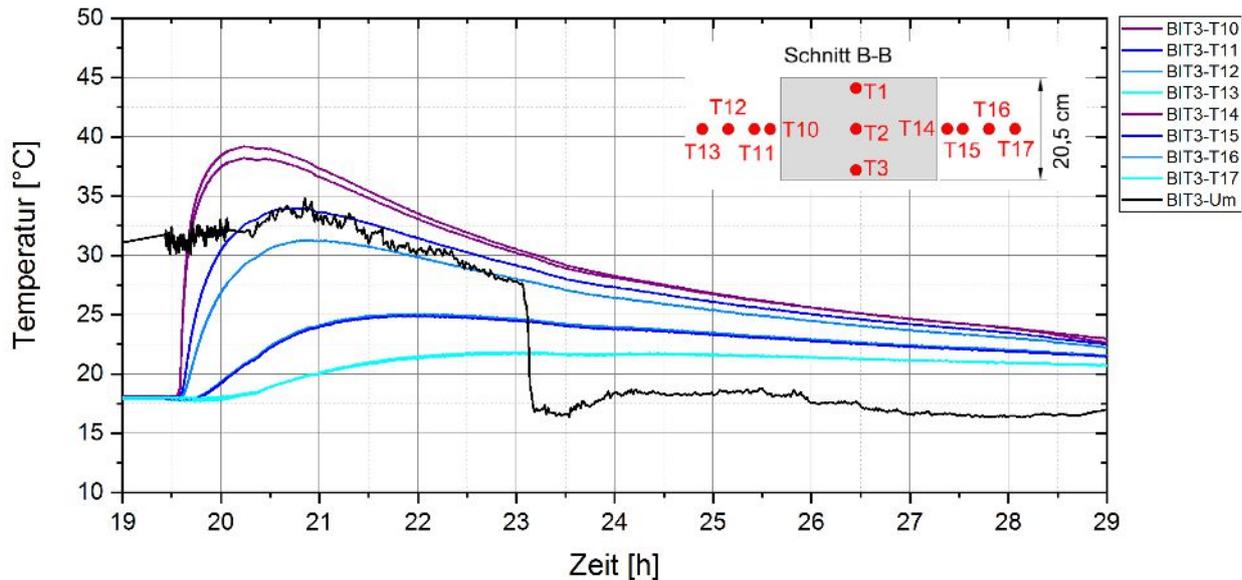


Abbildung 74: BIT-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton

Aus den Ergebnissen der Temperaturmessung folgt, dass die eingebrachte Wärmemenge zu einer deutlichen Erwärmung des umgebenden Tons führte und auch in 15 cm Entfernung von der Kontur ein Anstieg zu registrieren war. Die gemessenen Temperaturspitzen zeigen, dass die Wärmemenge ausreichte, um an der Kontur den Siedepunkt des im Ton enthaltenen Wassers zu erreichen. Dem gegenüber sank die Maximaltemperatur bereits 2 cm tief im Ton signifikant ab.

Zur Zeitdauer, zu der der Ton wieder auf die Ausgangstemperatur abkühlt, kann leider keine Aussage getroffen werden, da der Versuch ca. 7 ½ Stunden nach Eingussbeginn des Oxidationsbitumens aufgrund sich verschlechternder Witterungsverhältnisse beendet wurde.

2.3.3 Versuchsaufbau ASP-3

Der Aufbau des Versuchs ASP-3 orientiert sich ebenso wie der Versuch BIT-3 an den Versuchen im Wirtsgestein Steinsalz. Die Maße des Versuchs wurden dabei weitestgehend übernommen und sind somit vergleichbar. Im Gegensatz zum Versuch BIT-3 mit reinem Bitumen wurden die Versuche mit Asphalt größer gestaltet. Die Bohrlochdurchmesser wurden auf 50 cm erhöht, wodurch der Steinzuschlag besser einzubauen war.

Auch beim ASP-3 wurde die 1 m tiefe Erkundungsbohrung als Pilotbohrung genutzt und überbohrt. Die Bohrung erfolgte wieder durch die Fa. Lohse Diamantbohrtechnik drehend, trocken und unter Verwendung einer Druckluftspülung. Der Kern wurde anschließend von Hand gebrochen und entfernt.

Der Durchmesser des Bohrloches betrug 50,6 cm ($\pm 0,1$ cm), die Teufe 101,7 cm ($\pm 1,3$ cm).

Der Einbau der verschiedenen Komponenten erfolgte vier Wochen nach Bohrlochherstellung. Die Maße des Bohrloches veränderten sich in dieser Zeit nicht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 75 dargestellt.

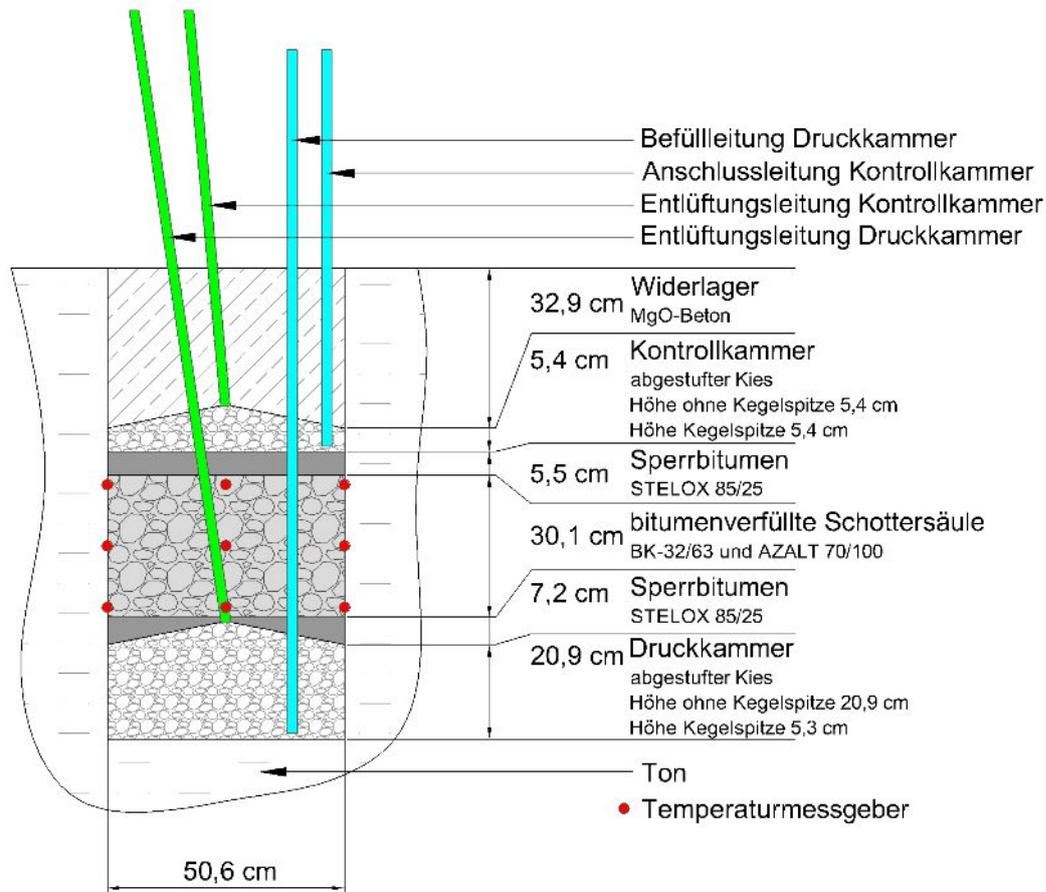


Abbildung 75: Aufbau ASP-3

Zunächst wurden die Thermoelemente (Typ T) für die Temperaturmessungen im Ton und an der Kontur eingebaut. Sechs Thermoelemente wurden wie im Versuch BIT-3 mit Metallkrampen paarweise und gegenüberliegend an der Kontur des Bohrloches angebracht. Je zwei Elemente befanden sich im oberen, im mittleren sowie im unteren Bereich des Dichtelements. Acht Thermoelemente wurden paarweise und gegenüberliegend in den Ton eingebaut. Der Abstand der Elemente von der Kontur betrug wiederum 2 cm, 5 cm, 10 cm und 15 cm. Analog dem Versuch BIT-3 wurden mit einem dünnen Bohrer horizontale Löcher in den Ton gebohrt, die Elemente eingeführt und anschließend mit dem gleichen Ton verstopft. Die drei Elemente entlang der Mittelachse des Bohrloches wurden erst mit dem Dichtelement installiert. Ein 18. Thermoelement diente der Messung der Umgebungstemperatur. Die Anordnung der Thermoelemente ist in Abbildung 76 und Tabelle 7 aufgeführt.

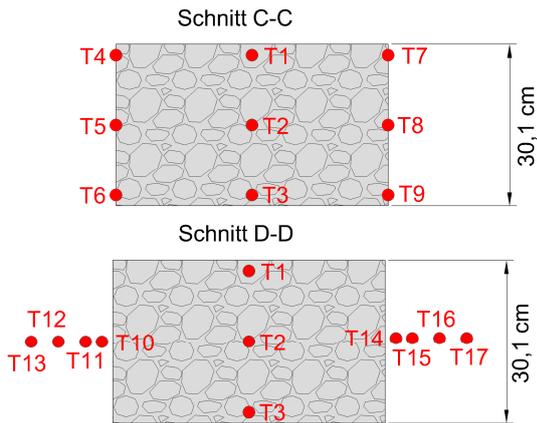


Abbildung 76: Schematische Position der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-3)

Tabelle 7: Positionen der Sensoren in der bitumenverfüllten Schottersäule (ASP-3)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe in der Schottersäule [cm]
T1	51	0	2
T2	64	0	15
T3	77	0	28
T4	51	25	2
T5	64	25	15
T6	77	25	28
T7	51	25	2
T8	64	25	15
T9	77	25	28
Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Entfernung von der Kontur [cm]
T10	64	27	2
T11	64	30	5
T12	64	35	10
T13	64	40	15
T14	64	27	2
T15	64	30	5
T16	64	35	10
T17	64	40	15

Die Druckkammer im Bohrlochtiefsten wurde wieder aus einem Rundkornschotter 20/40 mm aufgebaut. Im oberen Bereich der Druckkammer wurde ein abgestufter Kies der Körnungen 8/16 mm, 5/8 mm, 3/6 mm und 2/4 mm eingebracht, um ein Eindringen von Bitumen zu verhindern. Die Druckkammer wurde im oberen Bereich erneut kegelförmig ausgeführt, um eine spätere Entlüftung der Kammer zu erleichtern. Das Befüllrohr wurde im Bohrlochtiefsten eingebaut, um die Kammer mit Druck zu beaufschlagen. Ein Rohr zur Entlüftung endet in der Kegelspitze der Kammer und ließ eine mögliche spätere Druckbeaufschlagung mit Flüssigkeit zu. Die Rohre bestanden abermals aus Edelstahl. Die Druckkammer ist in Abbildung 77 und Abbildung 78 zu sehen.



Abbildung 77: Druckkammer ASP-3



Abbildung 78: abgestufter Kies ASP-3

Über die Druckkammer wurde eine dünne Schicht aus 11,1 kg Oxidationsbitumen der Sorte STELOX 85/25 eingebracht. Die Temperatur des Bitumens betrug zu Beginn 183 °C. Das Oxidationsbitumen bildete eine Sperrschicht über der Druckkammer. Die Sperrschicht war nach der Abkühlung des Bitumens in der Mitte 2,1 cm dick und am Rand durchschnittlich 5,7 cm dick. Am Rand der Sperrschicht zum Ton hin wurden eine leichte Aufwölbung sowie kleine Luftblasen entdeckt (siehe Abbildung 80). Durchgehende Wegsamkeiten bis in die Druckkammer wurden nicht festgestellt. Der Kontakt zwischen Bitumen und Ton war hergestellt.



Abbildung 79: abgekühlte untere Sperrschicht

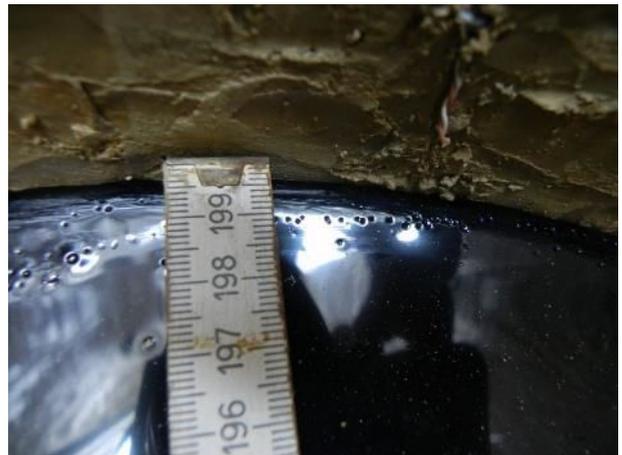


Abbildung 80: Randbereich der unteren Sperrschicht

Das Dichtelement wurde nach dem Prinzip der bitumenverfüllten Schottersäule gebaut. Dafür wurde Schotter der Körnung 32/63 mm per Hand eingeschichtet und drei Thermoelemente im oberen, mittleren und unteren Abschnitt an den Schotterkörnern befestigt. Die Messspitzen wurden dabei so positioniert, dass sie sich im Kornzwischenraum befanden. Im Anschluss wurde 28,6 kg Bitumen der Sorte AZALT 70/100 bei 171°C in den Porenraum eingegossen. Während des Einbaus des Bitumens wurde darauf geachtet, dass der Bitumenspiegel gleichmäßig zwischen den Schotterkörnern ansteigt und die Luft vollständig aus dem Porenraum verdrängt wird. Die Spitzen der oberen Schotterkörner ragten danach aus dem Bitumen heraus, sodass unter Beachtung des Porenraumvolumens von ca. 27,7 dm³ und der Bitumenmenge von 28,6 dm³ (bei wenigstens noch 60 °C) von einer vollständigen Sättigung des Porenraumes ausgegangen werden kann. Der Einbau ist in Abbildung 81 und Abbildung 82 dargestellt.



Abbildung 81: eingebauter Schotter des Dichtelements



Abbildung 82: bitumenverfüllte Schottersäule

Über das Dichtelement wurde eine weitere Sperrschicht aus 11,0 kg STELOX 25/85 eingebaut. Darüber wurde eine Kontrollkammer aus abgestuftem Kies installiert. Hierbei wurde zunächst eine feine Körnung auf das Oxidationsbitumen gestreut. Danach wurde weiterer Kies händisch eingeschichtet. Die Korngröße wurde zuerst schrittweise erhöht und anschließend wieder reduziert, womit das größere Material zwischen dem feineren Material eingebettet war. Es wurden Körnungen der Größe 8/16 mm, 5/8 mm, 3/6 mm und 2/4 mm verwendet. Die Kontrollkammer wurde ebenfalls im oberen Bereich kegelförmig ausgeführt und mit einem Befüllungs- sowie einem Entlüftungsrohr aus Stahl versehen werden.

Zuletzt wurde ein Betonwiderlager bis zur Geländeoberkante eingebaut, welches den verbliebenen Bereich des Bohrloches einnahm. Als Baumaterial wurde im Gegensatz zum Versuch ASP-01 kein MgO-Beton, sondern Beton auf Zementbasis verwendet.

2.3.4 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-3

Die Temperaturentwicklung des Asphalts und des umgebenden Tons wurde ähnlich dem Versuch BIT-03 versuchsbegleitend gemessen. Hierzu wurden ebenfalls 18 Thermoelemente verwendet.

Im Versuch ASP-3 wurden beim Einbau der unteren Sperrschicht nur geringe Temperaturveränderungen aufgezeichnet. Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle auf eine Messung verzichtet. Die Messung des Temperaturverlaufs startete deshalb am 19. Juli 2017 um 09:26 Uhr. Mit dem Einguss des Oxidationsbitumens wurde um 10:10 Uhr begonnen. Das Messintervall wurde für eine hohe Datendichte auf eine Sekunde festgelegt. Um 10:45 Uhr wurde das Intervall auf eine Minute geändert, um die Speicherkapazität des Messgerätes nicht zu überschreiten. Die Umgebungstemperatur betrug zu Einbaubeginn 24 °C, die des Tons im Durchschnitt 19 °C. Das Bitumen wurde bei rund 170 °C aus dem Wärmeschrank genommen und zügig eingegossen.

Die maximale Temperatur wurde mit 159,3 °C am Thermoelement 3 registriert, welches sich im unteren Bereich der bitumenverfüllten Schottersäule befand. Ein Teil der Wärmeenergie übertrug sich rasch auf den kühleren Schotter, was zu einem schnellen Temperaturabfall führte (siehe Abbildung 83). Die Sättigung des Porenraumes mit heißem Bitumen von unten nach oben sorgte dafür, dass diese Wärmeabgabe stattfand, bevor das Thermoelement 1 in das Bitumen eintauchte. Daher wurde hier das Maximum von 89,7 °C erst nach 43 Minuten erreicht. Die vorhergehenden Ausschläge gehen auf kurzzeitige Kontakte mit dem Bitumen beim Eingießen zurück.

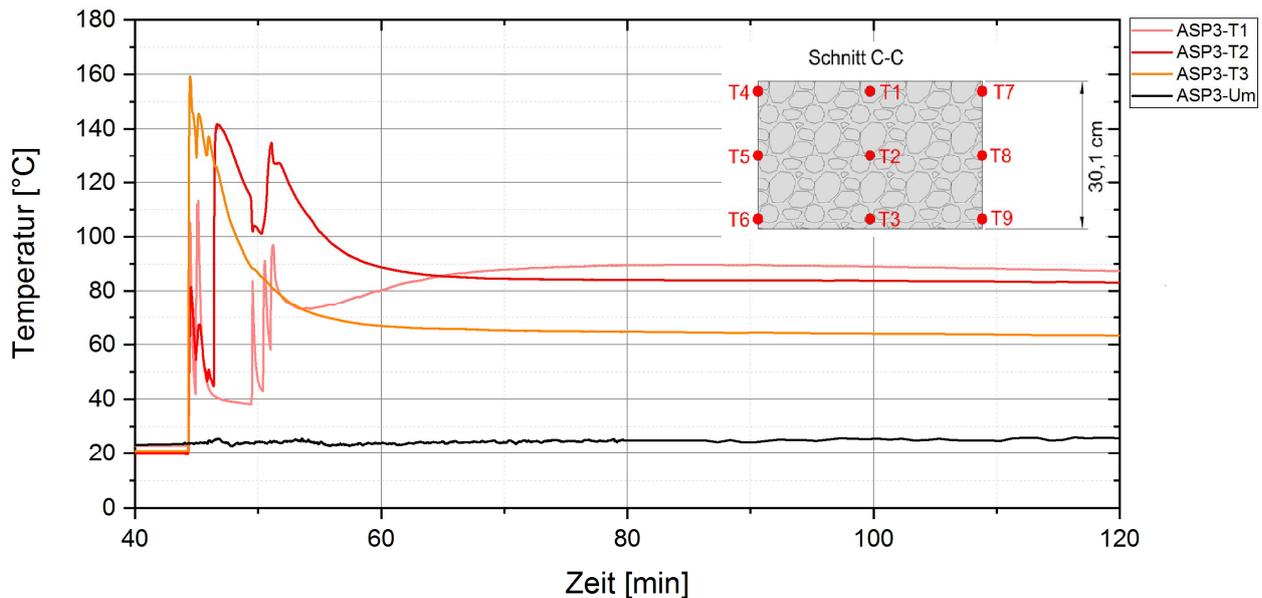


Abbildung 83: ASP-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse

Die Temperaturmaxima entlang der Kontur variierten ähnlich dem Versuch BIT-3 stark und bewegten sich zwischen 45,1 °C (ASP3-T9) und 157,7 °C (ASP3-T8). Beide Werte sind als Ausreiser zu betrachten, wobei das Thermoelement 9 wahrscheinlich in den Ton eingedrückt wurde und das Thermoelement 9 leicht von der Kontur abstand. Die verbliebenen Messelemente lieferten plausible Werte. Die Temperaturspitzen im oberen Abschnitt lagen bei 54,4 °C und 85,0 °C. Im mittleren Konturbereich wurden 95,4 °C und im unteren Bereich 91,0 °C gemessen. Der Verlauf zeigt ebenso wie an den Messpunkten entlang der Bohrlochachse eine schnelle Temperaturabnahme.

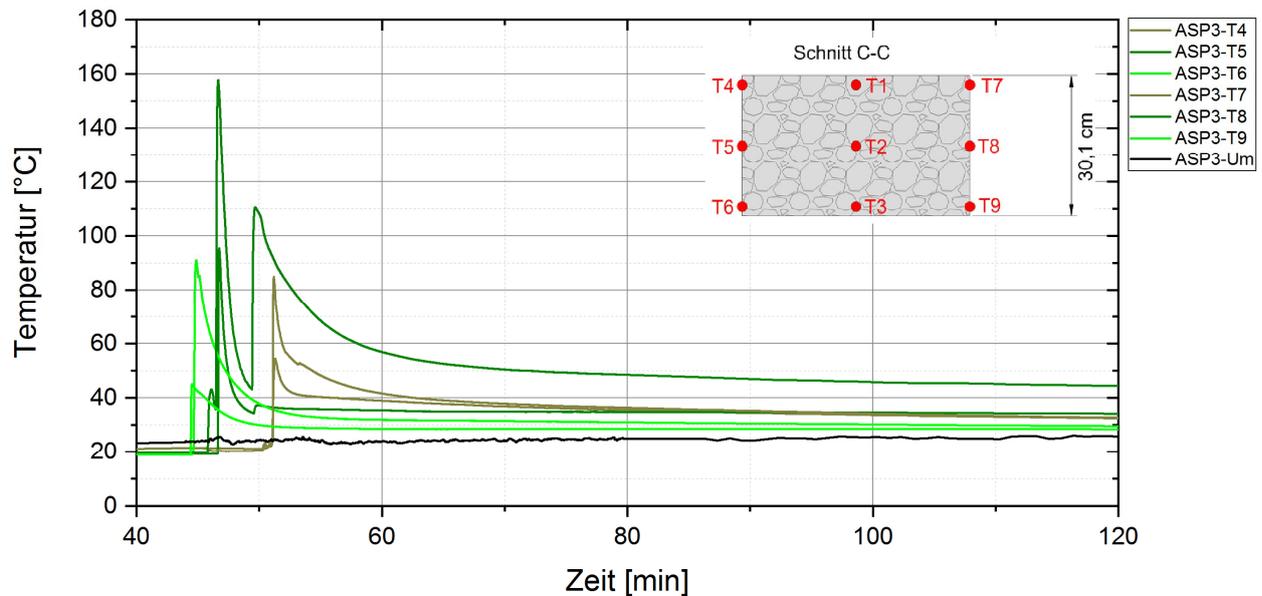


Abbildung 84: ASP-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur

Die Temperaturentwicklung in Ton zeigte ebenso einen verzögerten Anstieg, wie im Versuch BIT-3. Mit zunehmender Entfernung des Messpunkts von der Kontur setzte der

Temperaturanstieg später ein. Die Temperaturmaxima nahmen hingegen mit zunehmender Entfernung von der Kontur ab. Das Temperaturmaximum in 2 cm Entfernung zur Kontur wurde nach 67 Minuten zeitgleich an beiden gegenüberliegenden Messpunkten erreicht. Der Ton erwärmte sich dabei auf annähernd 31,2 °C, was einem Temperaturanstieg um ca. 12 K entspricht. In 5 cm Tiefe reduzierte sich der Betrag der Höchsttemperatur nach 1½ bis 2 Stunden auf 27,4 °C bis 28,2 °C. In 10 cm Tiefe wurde die Höchsttemperatur nach etwa 3½ bis 4 Stunden mit rund 24 °C gemessen. In 15 cm Tiefe betrug sie nach 6 Stunden knapp über 22 °C. Die Messwerte sind in Tabelle 8 enthalten und grafisch in Abbildung 85 dargestellt.

Tabelle 8: Temperaturmaxima im Versuch ASP-3

Thermoelement	Position	Temperaturmaximum	Zeitspanne zwischen Eingussbeginn und Temperaturmaximum
Lfd. Nr.	-	°C	[min]
1	Mittelachse, oberer Bereich Dichtelement	89,7	43
2	Mittelachse, Mitte Dichtelement	141,8	2
3	Mittelachse, unterer Bereich Dichtelement	159,3	0
4	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	54,4	7
5	Kontur, Mitte Dichtelement	95,4	2
6	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	91,0	0
7	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	85,0	7
8	Kontur, Mitte Dichtelement	157,7	2
9	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	45,1	0
10	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	31,2	67
11	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	28,2	88
12	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	24,1	207
13	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	22,4	344
14	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	31,2	67
15	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	23,6	255
16	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	27,4	127
17	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	22,2	359

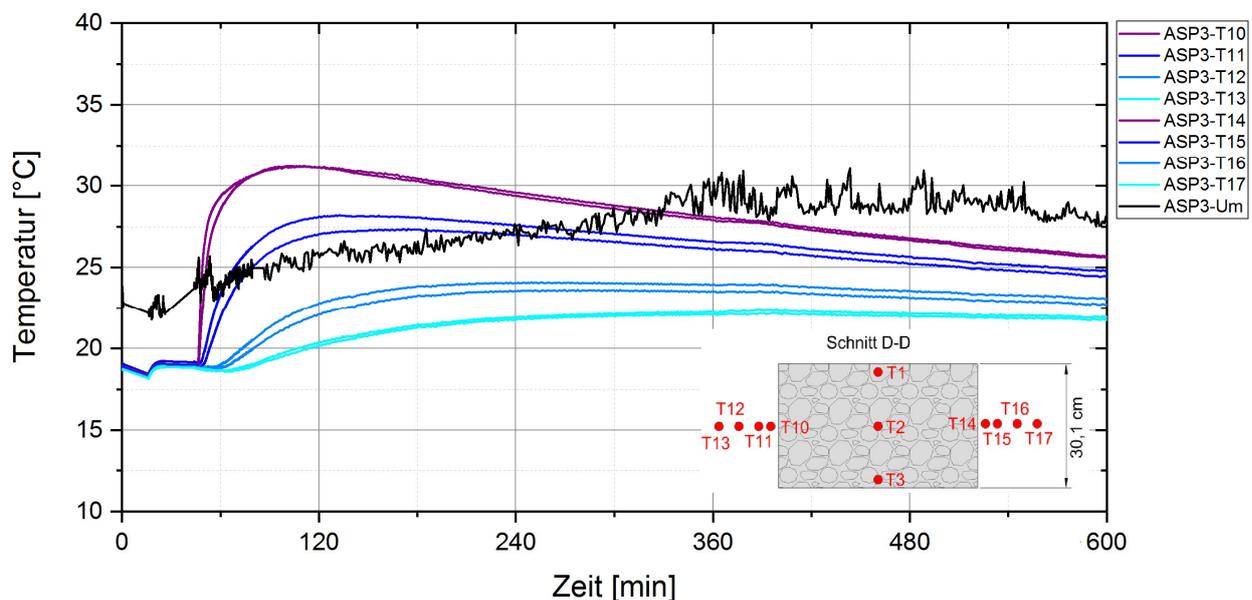


Abbildung 85: APS-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton

Um 20:30 Uhr (zehn Stunden nach Einguss des Destillationsbitumens) wurde die obere Sperrschicht eingebracht. Das heiße Oxidationsbitumen führte im oberen Bereich des Dichtelements noch einmal zu einer Temperaturzunahme um ca. 10°C. Eine Auswirkung auf die tieferliegenden Bereiche ist deutlich zu erkennen, indes sich die Temperatur dort nicht wieder erhöhte, aber langsamer sank (siehe Abbildung 86). Im Ton wurde ebenfalls eine minimale Temperaturerhöhung gemessen, welche rund 1 K betrug.

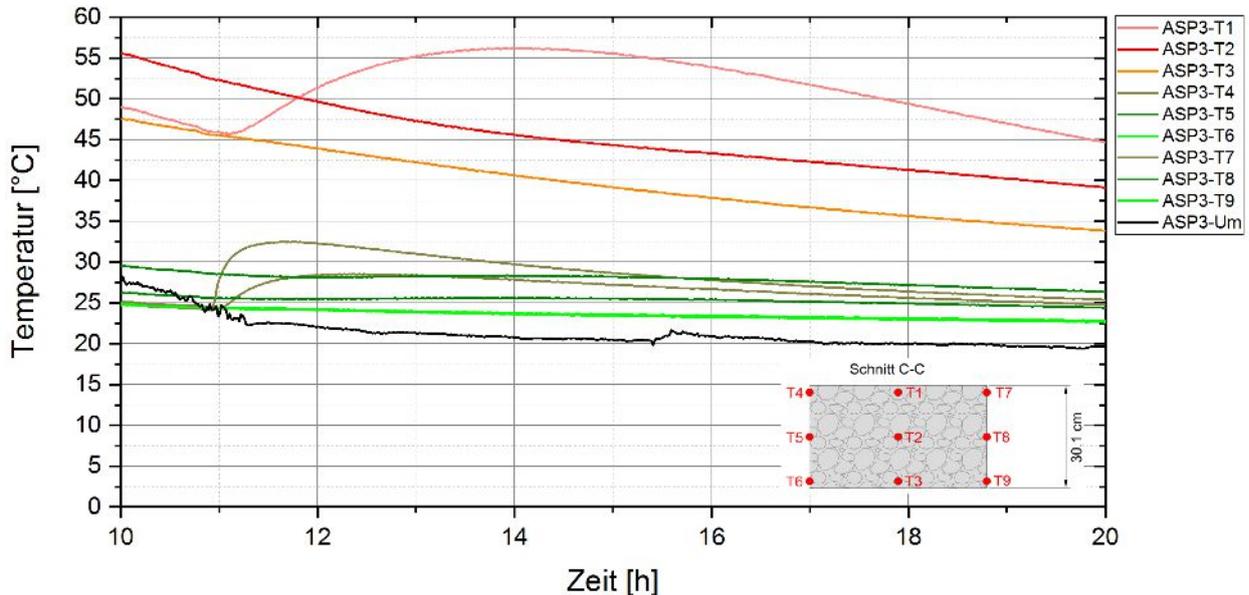


Abbildung 86: APS-3 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der oberen Sperrschicht im Bohrloch

Die Ergebnisse bestätigen, dass die eingebrachte Wärmemenge zu einer deutlichen Erwmung des umgebenden Tons führte und noch in 15 cm Entfernung von der Kontur ein Anstieg zu messen war. Die Temperaturmaxima erreichen jedoch im Ton wesentlich geringere Beträge als in der bitumenverfüllten Schottersäule.

Die Ausgangstemperatur von rund 19°C wurde im Dichtelement am 24. Juli um 10 Uhr erreicht. Die Abkühldauer betrug somit vier Tage.

Vergleichbar mit den Versuchen im Steinsalz wurde durch die IBeWa die integrale Permeabilität des Versuchskörpers bestimmt. Im Vorfeld wurde während der Erkundungsarbeiten der Gaseindringdruck des anstehenden Tons ermittelt. Dieser wurde in einer Einzelmessung in einer 70 mm Bohrung in 1 m Teufe gemessen und betrug 70 kPa.

Am 23. August 2017 erfolgte eine Druckbeaufschlagung des Versuchs ASP-03. Zunächst wurde die Druckkammer mit einem Gasdruck von 50 kPa beaufschlagt, um unter dem Orientierungswert für den Gaseindringdruck zu bleiben. Damit wurde eine Verdrängung des Porenwassers infolge des Gasstrmungsprozesses vermieden. In einer zweiten Phase wurde der Druck auf 100 kPa erhöht, um den Strömungsprozess bei einsetzender Verdrängung des Porenwassers zu beurteilen. Für die Messung wurde trockene Druckluft aus Pressluftflaschen verwendet (Wilsnack et al., 2017). Die Druckganglinien der Messungen am Versuch ASP-03 sind in Abbildung 87 und Abbildung 88 zu sehen.

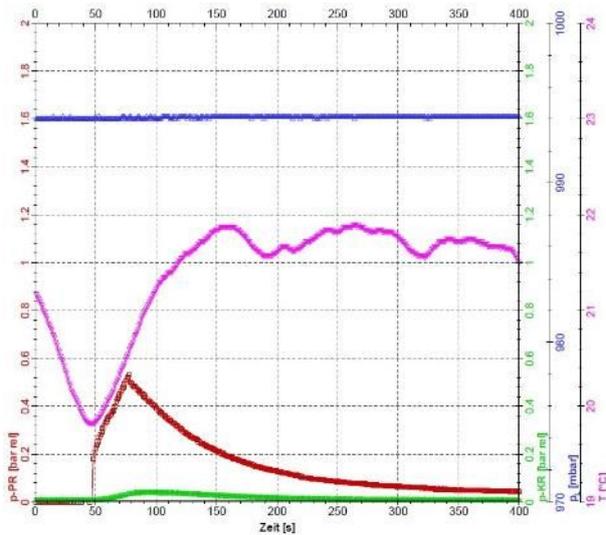


Abbildung 87: ASP-3 Druckganglinie bei 50 kPa

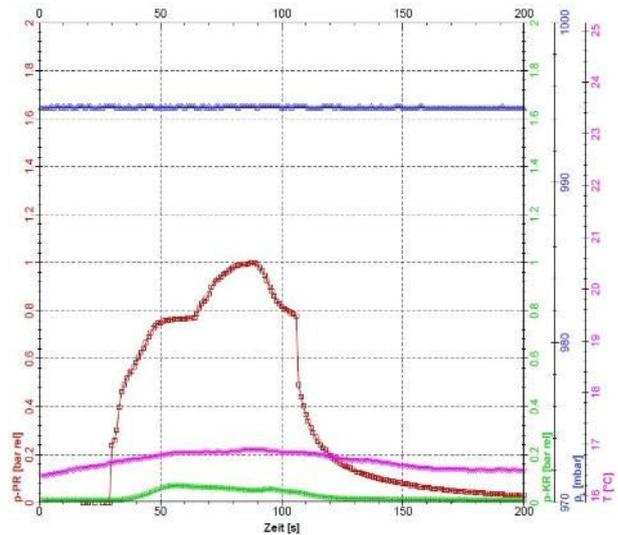


Abbildung 88: ASP-3 Druckganglinie bei 100 kPa

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die angefahrenen Drücke innerhalb weniger Minuten abfallen. Am Versuchsende stellte sich ein relativer Gasdruck von rund 3 kPa ein. Laut IBeWa deutet dies auf einen Einfluss der Porenraumsättigung und eines wesentlich geringeren Gaseindringdrucks ($\ll 70$ kPa) hin. Da die Kontrollkammer während der Druckbeaufschlagung überwacht wurde und kein Druckanstieg zu verzeichnen war, ist von einem Abströmen in das Gebirge auszugehen. Die gemessenen Druckverläufe wurden unter Zuhilfenahme eines strömungstechnischen Modells des Versuches durch die IBeWa angepasst und ausgewertet (siehe Abbildung 89). Die Auswertung ergab eine integrale Gaspermeabilität von $1,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$.

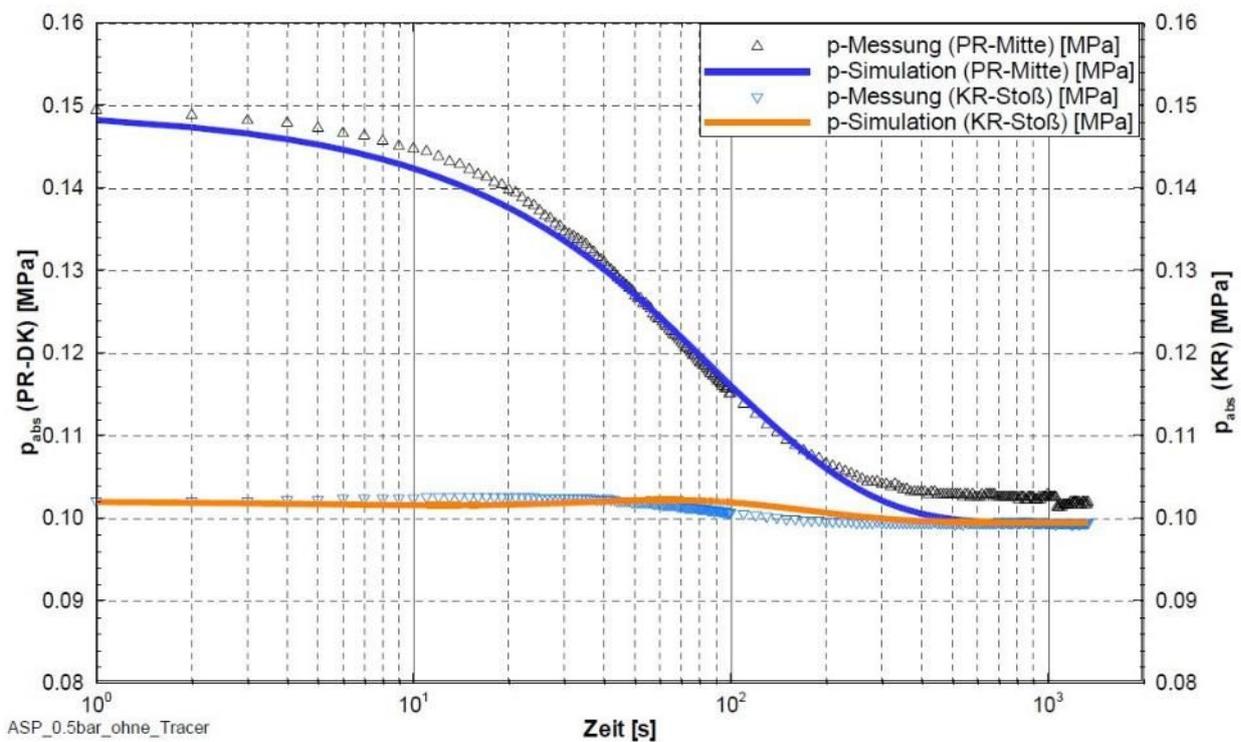


Abbildung 89: ASP-3 gemessene und angepasste Druckverläufe bei ca. 50 kPa

2.3.5 Versuchsaufbau ASP-4

Der Aufbau des Versuchs ASP-4 wurde analog dem Versuch ASP-2 im Wirtsgestein Steinsalz gestaltet. Im Unterschied zum Versuch ASP-3 wurde ein vorgemischter Steinasphalt verwendet. Dadurch wurden Bitumen und Gesteinszuschlag gemeinsam heiß eingebaut und die eingebrachte Wärmemenge deutlich erhöht.

Als Pilotloch wurde abermals die 1 m tiefe Erkundungsbohrung genutzt und durch die Fa. Lohse Diamantbohrtechnik überbohrt. Die Bohrung erfolgte wieder drehend, trocken und unter Verwendung einer Druckluftspülung, der Kern wurde händisch gebrochen und entfernt.

Der Durchmesser des Bohrloches betrug 50,8 cm ($\pm 0,1$ cm), die Teufe 103,9 cm ($\pm 1,0$ cm).

Der Einbau der verschiedenen Komponenten erfolgte sechs Wochen nach Bohrlochherstellung. Die Maße des Bohrloches veränderten sich in dieser Zeit wiederum nicht. Im Bohrloch sammelte sich jedoch Wasser, welches die Sohle ca. 3 cm überdeckte (siehe Abbildung 90). Zum Schutz vor Niederschlägen wurde, wie in Abbildung 91 zu sehen, zuvor ein Erdwall aufgeschüttet und der Versuch großflächig abgedeckt. Die Abdeckplane sowie ein über das Bohrloch gestellter Kübel waren beim Aufdecken trocken, sodass ein Zutritt von oben ausgeschlossen werden konnte. Das Wasser lief wahrscheinlich über Trocknungsrisse zu und wurde vor Einbaubeginn abgepumpt.



Abbildung 90: zugetretenes Wasser im Bohrloch



Abbildung 91: abgedeckter Versuch ASP-4

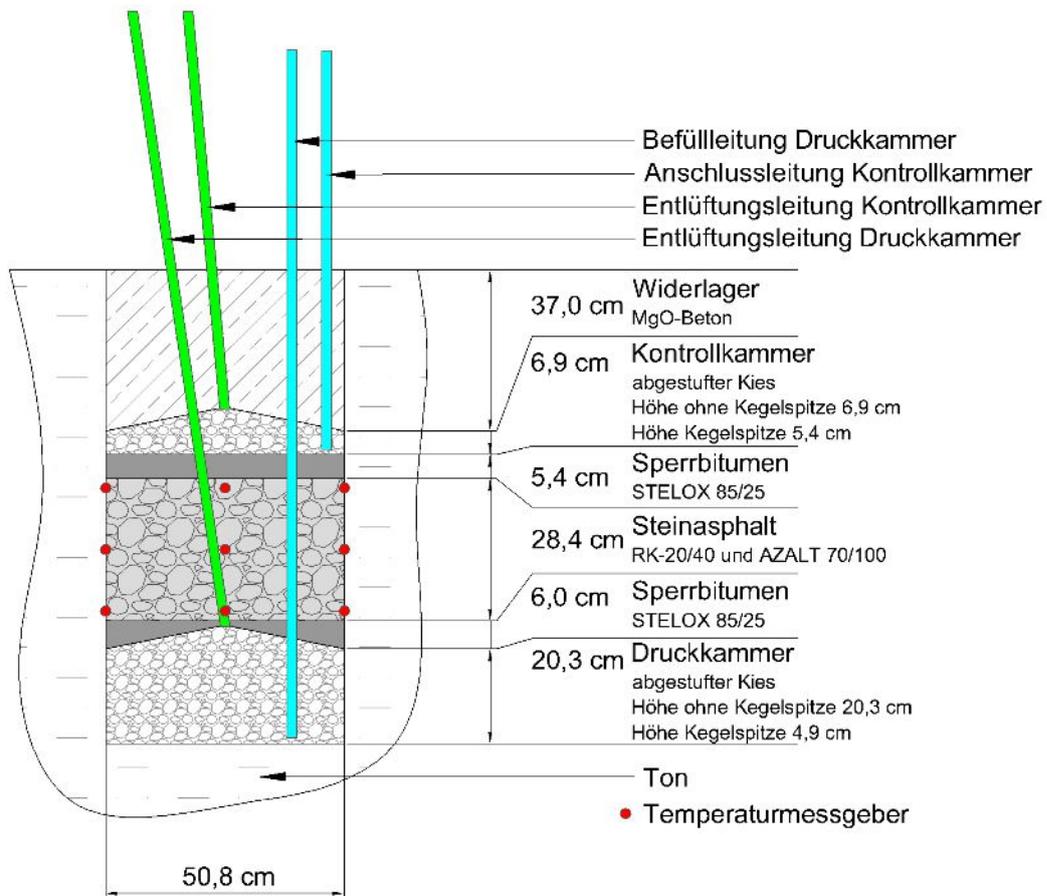


Abbildung 92: Aufbau ASP-4

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 92 zu sehen und ähnelt dem Aufbau des Versuchs ASP-3. Zunächst wurden wieder die Thermoelemente (Typ T) für die Temperaturmessungen im Ton und an der Kontur eingebaut. Das Verfahren und die Anordnung waren identisch mit denen des Versuchs ASP-3.

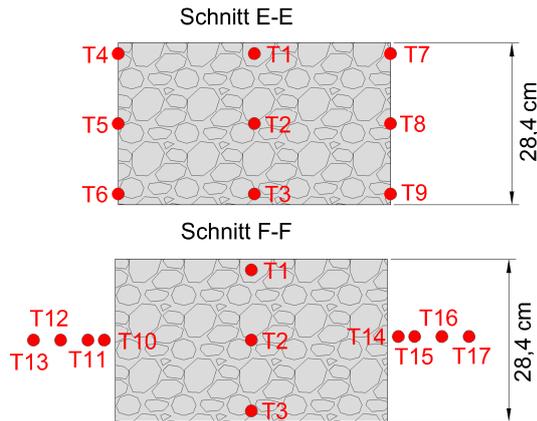


Abbildung 93: Schematische Position der Sensoren im Steinaspalt (ASP-4)

Tabelle 9: Positionen der Sensoren im Steinaspalt (ASP-4)

Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Tiefe in der Bitumenschicht [cm]
T1	T1	51	0
T2	T2	64	0
T3	T3	77	0
T4	T4	51	25
T5	T5	64	25
T6	T6	77	25
T7	T7	51	25
T8	T8	64	25
T9	T9	77	25
Sensoren	Teufe [cm]	Radius [cm]	Entfernung von der Kontur [cm]
T10	64	27	2
T11	64	30	5
T12	64	35	10
T13	64	40	15
T14	64	27	2
T15	64	30	5
T16	64	35	10
T17	64	40	15

Die Druckkammer im Bohrloch tiefsten wurde abermals aus einem Rundkornschotter 20/40 mm aufgebaut und im oberen Bereich wurde ein abgestufter Kies der Körnungen 8/16 mm, 5/8 mm, 3/6 mm und 2/4 mm kegelförmig eingebracht.

Die Sperrschicht über der Druckkammer wurde mit 9,0 kg Oxidationsbitumen der Sorte STELOX 85/25 hergestellt. Die Temperatur des Bitumens betrug zu Beginn wieder 180 °C. Die Sperrschicht war nach der Abkühlung des Bitumens in der Mitte 1,1 cm dick und am Rand im Schnitt 6,0 cm dick. Am Rand der Sperrschicht zum Ton hin wurden wie im Versuch ASP-03 eine leichte Aufwölbung sowie kleine Luftblasen entdeckt. Erkennbare Trocknungsrisse traten in diesem Bereich nicht auf.

Das Dichtelement wurde aus 137 kg vorgemischtem Steinaspalt gebaut. Als Zuschlag wurde ein Rundkornschotter 20/40 mm verwendet und mit Bitumen der Sorte AZALT 70/100 vermischt. Das Massenverhältnis Bitumen zu Schotter betrug 1:4,5, sodass der Porenraum bei einer dichten Lagerung der Körner vollständig mit Bitumen ausgefüllt wurde. Die drei Thermolemente für die Temperaturmessung entlang der Bohrlochachse wurden an drei separaten Schotterkörnern befestigt und kurz vor dem Einbau in Bitumen getaucht. Die Messspitzen wurden wieder so positioniert, dass sie sich im Kornzwischenraum befanden. Die Einbautemperatur des Steinaspalts betrug 168 °C. Im Gegensatz zum Versuch ASP-3 wurde das Dichtelement in zwei Etappen eingebaut. Auf diese Weise wurde verhindert, dass die heißen Schotterkörner zu tief in die untere Sperrbitumenschicht einsinken und einen Kontakt des niedrig viskosen

Destillationsbitumens mit der Kontrollkammer herstellten. Der Einbau des Steinasphalts ist im Folgenden bildlich dargestellt.



Abbildung 94: Einbau des Steinasphalts



Abbildung 95: Dichtelement aus Steinasphalt

Über dem Dichtelement folgte eine Sperrschicht aus 10,3 kg STELOX 25/85 und eine Kontrollkammer aus abgestuftem Kies. Die Ausführung erfolgte analog ASP-03 mit Körnungen der Größe 8/16 mm, 5/8 mm, 3/6 mm und 2/4 mm (siehe Abbildung 96 und Abbildung 97).



Abbildung 96: Einbau der Kontrollkammer



Abbildung 97: abgestufter Kies in der Kontrollkammer

Zuletzt wurde wieder ein Betonwiderlager bis zur Geländeoberkante eingebaut, welches den verbliebenen Bereich des Bohrloches ausfüllte. Wie in Abbildung 98 und Abbildung 99 zu sehen, wurden Betonwiderlager und Kontrollkammer durch eine wasserundurchlässige Folie getrennt, damit kein Anmachwasser in die Kammer eindringen konnte.



Abbildung 98: Trennfolie zwischen Kontrollkammer und Betonwiderlager



Abbildung 99: Einbau des Betonwiderlagers

2.3.6 Messprogramm und Ergebnisse Versuch ASP-4

Das Messprogramm des Versuchs ASP-4 gestaltete sich kongruent zu denen der Versuche BIT-3 und ASP-3. Mit 18 Thermoelementen wurde der Temperaturverlauf im Asphalt, an der Bohrlochkontur, im Ton und in der Umgebung gemessen.

Die Messung begann mit dem Einbau des erhitzten Steinasphalts am 02. August 2017 um 15:47 Uhr. Die Umgebungstemperatur betrug zu Einbaubeginn 28 °C, die Temperatur des Tons 20 °C. Dabei wurde rund die Hälfte des heißen Asphalts eingebaut. Danach wurde der Einbau für 2½ Stunden unterbrochen, um ein Einsinken des Rundkornschotters in die untere Sperrbitumenschicht zu verhindern. Die zweite Einbauphase begann um 18:12 Uhr. Das Messintervall wurde zunächst wieder auf eine Sekunde eingestellt und um 19:20 Uhr auf eine Minute verlängert.

Die höchste Temperatur wurde am Thermoelement ASP4-T2 im Zentrum des Asphaltkörpers mit 149,2 °C gemessen. Die Maximaltemperaturen der anderen beiden Thermoelemente entlang der Bohrlochachse unterschieden sich kaum voneinander und lagen bei 129,7 °C (ASP4-T1) und 125,5 °C (ASP4-T3).

Die kurzzeitigen Spitzen, wie sie Abbildung 100 zu sehen sind, gehen auf das Einbauverfahren zurück. Dabei wurden die an Schotterkörnern befestigten Sensoren in Bitumen getaucht und anschließend in den Asphalt integriert. Diese Werte wurden bei der Bewertung der Höchsttemperatur nicht berücksichtigt.

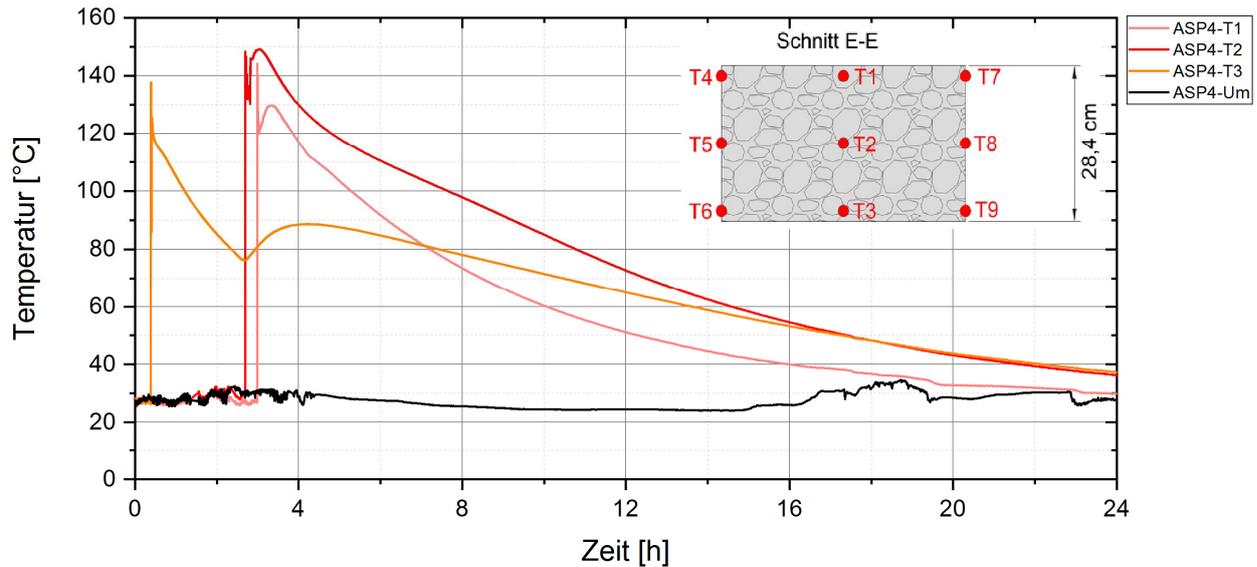


Abbildung 100: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens entlang der Bohrlochachse

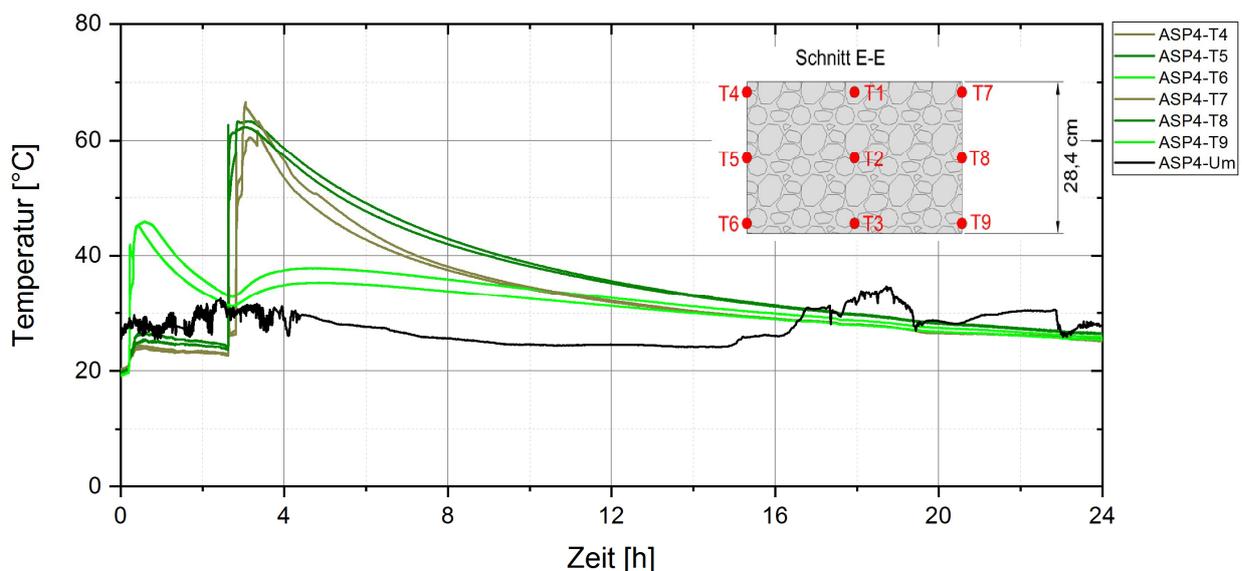


Abbildung 101: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens an der Bohrlochkontur

Die Spitzenwerte an der Kontur lagen dicht beieinander. Im unteren Bereich des Dichtelements wurden 45,2 °C (ASP4-T6) bzw. 45,9 °C (ASP4-T9) gemessen. Die Maxima im mittleren und oberen Bereich waren mit 61,7 °C (ASP4-T4), 63,3 °C (ASP4-T5), 66,6 °C (ASP4-T7) und 62,7 °C (ASP4-T8) nahezu gleich. Gut erkennbar ist der Wiederanstieg der Temperatur im unteren Bereich während der zweiten Einbauphase (siehe Abbildung 101). Die jeweils gegenüberliegenden Messpunkte lieferten fast identische Ergebnisse, sodass Einbaufehler, wie sie in den vorhergehenden Versuchen vorkamen, ausgeschlossen wurden.

Der Einbau in zwei Phasen zeigte sich auch bei der Temperaturentwicklung im Ton. Die Temperaturmaxima nahmen erwartungsgemäß mit zunehmender Entfernung von der Kontur ab. Der Höchstwert in 2 cm Entfernung zur Kontur wurde 48 Minuten nach Beginn der zweiten Phase registriert. Die Temperatur stieg dabei um rund 30 K auf 49,4 °C (ASP4-T10) bzw. 51,0 °C (ASP4-

T14) an. Damit wurde sogar die Höchsttemperatur im unteren Konturbereich überschritten. In 5 cm Tiefe reduzierte sich Maximaltemperatur nach ca. 100 Minuten auf rund 40 °C und in 10 cm Tiefe nach etwa 3 bis 3½ Stunden auf 31 °C. In 15 cm Tiefe betrug sie nach rund 5 Stunden 28 °C. Die gegenüberliegenden Messpunkte lieferten im Verlauf der Messung weitgehend gleiche Ergebnisse (siehe Tabelle 10 und Abbildung 102).

Tabelle 10: Temperaturmaxima im Versuch ASP-4

Thermo- element	Position	Temperatur- maximum	Zeitspanne zwischen Einbaubeginn und Temperaturmaximum	
			Phase 1	Phase 2
Lfd. Nr.	-	°C	[min]	
1	Mittelachse, oberer Bereich Dichtelement	129,7	189	44
2	Mittelachse, Mitte Dichtelement	149,2	169	24
3	Mittelachse, unterer Bereich Dichtelement	125,5	12	
4	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	61,7	188	43
5	Kontur, Mitte Dichtelement	63,3	174	29
6	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	45,9	22	
7	Kontur, oberer Bereich Dichtelement	66,6	170	25
8	Kontur, Mitte Dichtelement	62,7	145	0
9	Kontur, unterer Bereich Dichtelement	45,2	11	
10	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	49,4	193	48
11	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	39,7	248	103
12	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	31,9	330	185
13	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	27,9	294	280
14	Ton, 2 cm von der Kontur entfernt	51,0	193	48
15	Ton, 5 cm von der Kontur entfernt	39,9	253	108
16	Ton, 10 cm von der Kontur entfernt	31,3	360	215
17	Ton, 15 cm von der Kontur entfernt	27,9	471	326

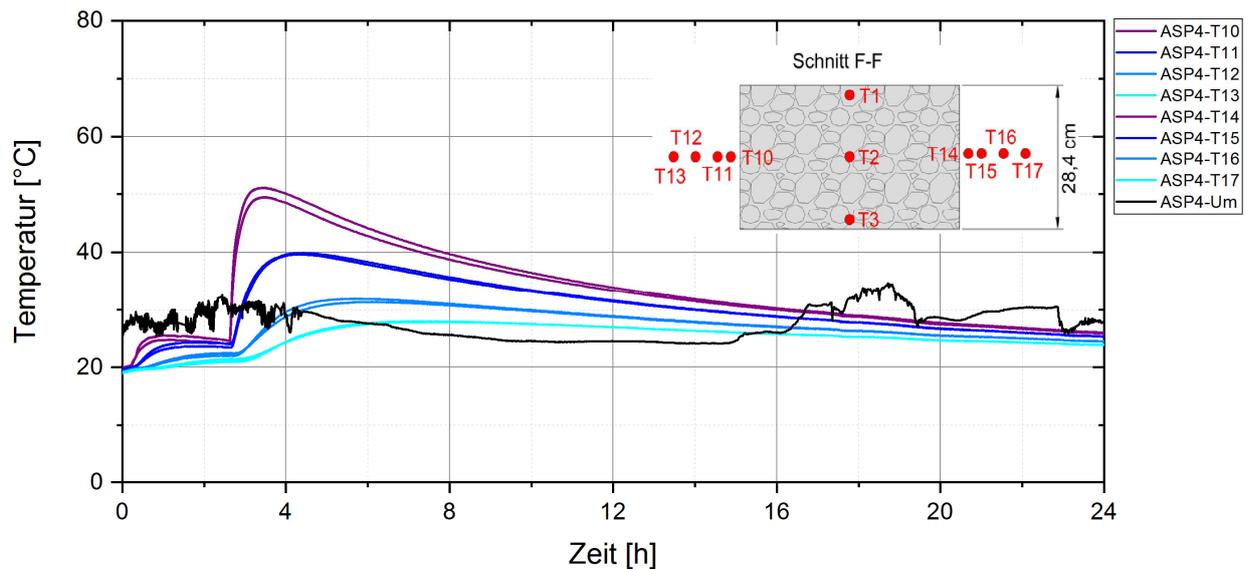


Abbildung 102: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau des Destillationsbitumens im Ton

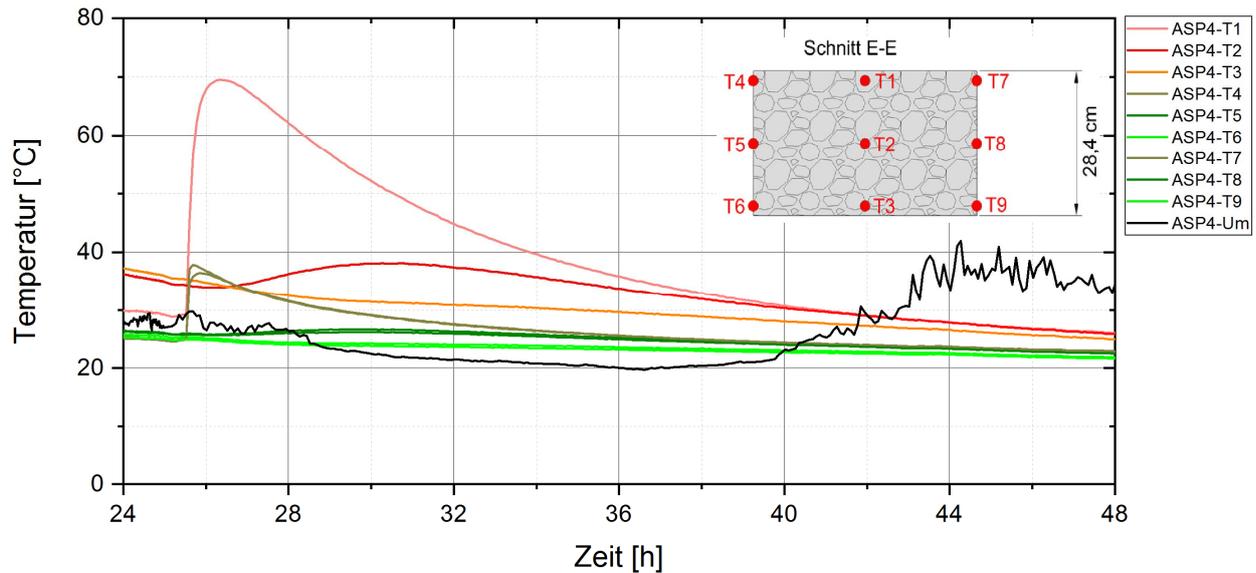


Abbildung 103: ASP-4 Verlauf der Temperaturentwicklung nach dem Einbau der oberen Sperrbitumenschicht im Bohrloch

Am Folgetag, den 03. August 2017 um 17:10 Uhr (elf Stunden nach Einbau des Asphalts) wurde die obere Sperrschicht eingegossen. Das 170 °C heiße Oxidationsbitumen führte im oberen Bereich des Dichtelements zu einer erneuten Temperaturzunahme von bis zu 40 K. Eine Auswirkung auf die tieferliegenden Bereiche und die Kontur ist zu erkennen, wobei die Temperatur dort nur geringfügig beeinflusst wurde (siehe Abbildung 103).

Die Ergebnisse zeigen, dass der Heißeinbau des Asphalts auch in diesem Versuch eine deutliche Erwärmung des Tons herbeiführte. Die Ausgangstemperatur von rund 20°C wurde in der Nacht vom 06. Zum 07. August erreicht. Die Abkühldauer betrug somit vier Tage.

Am 23. August 2017 führte die IBeWa eine Permeabilitätsmessung am Versuch ASP-4 durch. Analog der Messung am Versuch ASP-3 wurde die Druckkammer zuerst mit einem Gasdruck von 50 kPa beaufschlagt und der Druck anschließend auf 100 kPa erhöht. Für die Messung wurde wieder trockene Druckluft aus Pressluftflaschen verwendet (Wilsnack et al., 2017). Die Druckganglinien der Messungen am Versuch ASP-4 sind in Abbildung 104 und Abbildung 105 dargestellt.

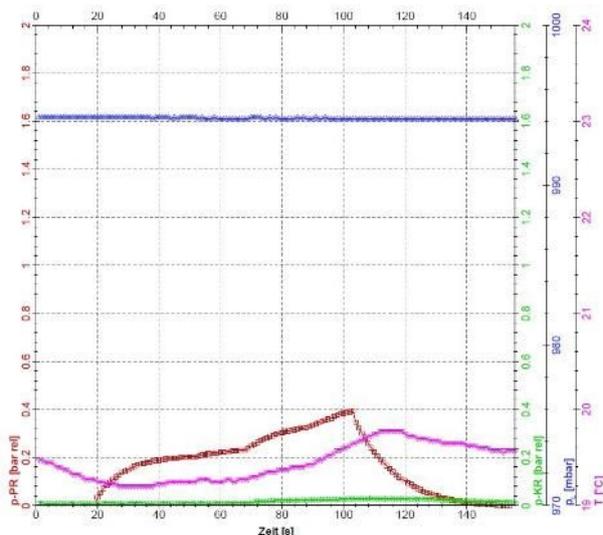


Abbildung 104: ASP-4 Druckganglinie bei 50 kPa

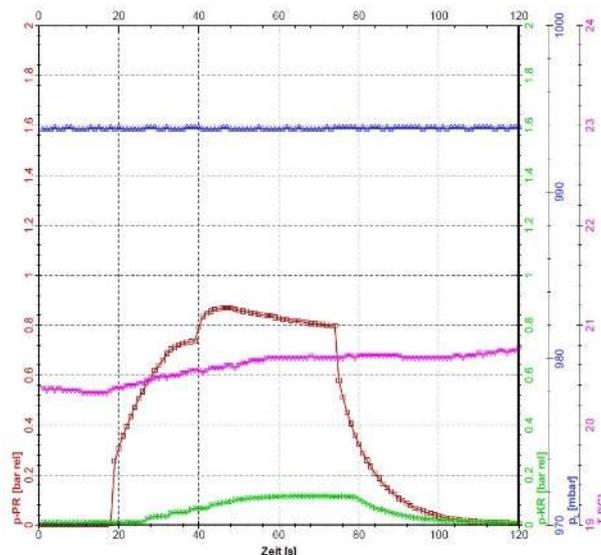


Abbildung 105: ASP-4 Druckganglinie bei 100 kPa

Die vorgegebenen Druckstufen konnten während der Messung nur schwer angefahren werden. Vielmehr wurde ein schnelles Abströmen des zugeführten Gases beobachtet. Um einen Austritt an den Messinstallationen und am Kontaktbereich zwischen Baustoff und Tongebirge auszuschließen, wurde dotierte Druckluft eingesetzt. Im Ergebnis wurde kein Gasaustritt an den Zuleitungen oder im näheren Versuchsumfeld registriert. Auch wurde kein Druckanstieg in der Kontrollkammer festgestellt, der auf Austrittspfade durch den Asphaltkörper oder um diesen herum deutet. Daher ist von einem Abströmen der Druckluft in das Gebirge auszugehen. Aufgrund des Messverlaufs konnte keine Abschätzung der Permeabilität erfolgen.

2.3.7 Rückbau und Nachuntersuchung der Bohrlochversuche im Ton

Die Versuche im Ton wurden vollständig zurückgebaut. Der Versuch BIT-3 wurde entfernt, um den zukünftigen Gewinnungsbetrieb nicht zu behindern. Da der Versuch nach der einbaubegleitenden Temperaturmessung beendet wurde und eine Druckbeaufschlagung nicht mehr erfolgte, wurde auf eine eingehende Untersuchung während des Rückbaus verzichtet.

Mit dem Rückbau der Versuche ASP-3 und ASP-4 wurden folgende Ziele verfolgt:

- Überprüfung der Einbauqualität durch die Messung der Lage und der Schichtstärke der einzelnen Bauelemente,
- Klärung, ob und wie stark Bitumen in den Kornzwischenraum der Druck- und der Kontrollkammer penetriert ist,
- Klärung, ob das Dichtbitumen an der Kontur in Risse und Hohlräume im Ton eindringt und diese effektiv verschließt.

Zunächst wurde neben jedem Versuch ein seitlicher Baggerschurf angelegt. Die Tiefe des Schurfs entsprach der Bauwerkslänge (1 m). Im nächsten Schritt wurde das Betonwiderlager vom Schurf aus halbseitig, händisch bis zur kiesgefüllten Kontrollkammer freigelegt (siehe Abbildung 106). Die Höhe der Kontrollkammer und des Widerlagers wurden vermessen.

Danach wurde der erdfeuchte Kies der Kontrollkammer per Hand ausgebaut. Das enthaltene Wasser ist auf den das Bauwerk umgebenden Ton zurückzuführen. Von oben eingedrungene Zementsuspension wurde nicht gefunden, womit die Trennfolie zwischen Kontrollkammer und

Betonwiderlager ihre Aufgabe zufriedenstellend erfüllte. Anschließend wurden die Stahlrohre mit einer Metallsäge gekappt und das Widerlager mittels Bagger entfernt.

Im nächsten Schritt wurde an jedem der beiden Versuche ein Konturabschnitt beprobt. Die quaderförmigen Proben beinhalteten jeweils den Randbereich des Asphaltelements, der oberen und unteren Sperrbitumenschicht und des anstehenden Tons, sodass die Kontaktfläche zwischen Asphalt bzw. Bitumen und Tongebirge später eingehend untersucht werden konnte. In situ wurden für die Probennahme vertikale Sägeschlitze bis zum Asphaltelement angelegt und eine Metallform in die Schlitze eingesetzt. Abbildung 107 zeigt die Ausführung am Versuch ASP-4. Die Form wurde mit einem Brett fixiert und der untere Spalt der Form mit Gips verschlossen. Danach wurde die gesamte Form mit Mörtel ausgegossen, um die Probe zu stabilisieren. Nach dem Erhärten des Mörtels wurden die Konturflächen links und rechts der Metallformen freigelegt und kuchenförmige Stücke der Asphaltelemente mit einem Handbohrer abgetrennt. Die Proben wurden zur weiteren Untersuchung nach Freiberg transportiert.



Abbildung 106: seitlicher Schurf beim Rückbau des Versuchs ASP-4



Abbildung 107: Präparation einer Probe aus dem Konturbereich des Versuchs ASP-4

Im letzten Arbeitsschritt wurden die Asphaltelemente mit Hilfe eines Baggers herausgehoben und von allen Seiten betrachtet (siehe Abbildung 108). Lufteinschlüsse und Fehlstellen, wie sie in den Versuchen BIT-1 und BIT-2 auftraten, wurden dabei nicht entdeckt. Der in den Druckkammern enthaltene Kies und Schotter war zum Zeitpunkt des Rückbaus ebenfalls feucht. Die Kammern waren jedoch nicht geflutet bzw. der Porenraum nicht mit Wasser aufgesättigt, was das Ergebnis der Druckbeaufschlagung rückwirkend beeinflussen würde. Die Druckkammern wurden ausgebagert und die Versuchsfläche geebnet. Das Bitumen wurde anschließend fachgerecht entsorgt.



Abbildung 108: geborgenes Asphaltelement des Versuchs ASP-4



Abbildung 109: freigelegter Abschnitt des Asphaltelements des Versuchs ASP-3

Während des Rückbaus wurden alle Teilelemente der Versuche vermessen. Dabei wurde sowohl der Einbauzustand ausschnittsweise bei der Freilegung erfasst als auch die Maße allseitig nach dem Ausbau berücksichtigt (siehe Abbildung 108 und Abbildung 109). Die Vermessung ergab keine signifikanten Unterschiede zur geplanten Dimensionierung. Die praktisch erreichten Maße wurden in den oben aufgeführten Zeichnungen zum Versuchsaufbau angegeben. Es ist hervorzuheben, dass die geplante Höhe der Kegelspitzen der Druck- und Kontrollkammern sowie die Mindeststärke der Sperrbitumenschichten erreicht wurden. Ein Abfließen des niedrigviskosen Destillationsbitumen wurde nirgends beobachtet.



Abbildung 110: freigelegte Oberfläche der Sperrbitumenschicht zur Kontrollkammer des Versuchs ASP-4



Abbildung 111: abgeschlagenes Bruchstück aus der oberen Sperrbitumenschicht des Versuchs ASP-3

Der Rückbau gab den Blick auf die Bitumenoberfläche der oberen Sperrschicht frei (siehe Abbildung 110). Hierdurch konnte die Kontaktfläche zwischen Bitumen und der Kontrollkammer charakterisiert werden. Die Kontrollkammer sowie die Druckkammer wurden aus abgestuftem Kies aufgebaut, um ein Eindringen von Bitumen in den Porenraum des Kieses zu minimieren, was eine Veränderung des Kammervolumens zur Folge hätte. Beobachtet wurde, dass die untersten Körner charakteristische Abdrücke im Bitumen hinterließen. Ursächlich hierfür sind zwei Vorgänge. Einerseits sanken die Körner unter Eigenlast und durch die Auflast des Widerlagers in das Bitumen. Andererseits wurde das Bitumen während der Druckbeaufschlagung

nach oben gegen das Korngerüst gedrückt. Wie an Abbildung 111 zu erkennen ist, wurde das Bitumen jedoch nicht in den Porenraum gepresst. Die gewählte Korngrößenabstufung mit der kleinsten Korngrößenfraktion 2-4 mm bei gleichzeitiger Verwendung des Oxidationsbitumen STELOX 85/25 bewährte sich somit.



Abbildung 112: präparierte Scheibe eines Konturbereichs aus dem Versuch ASP-4

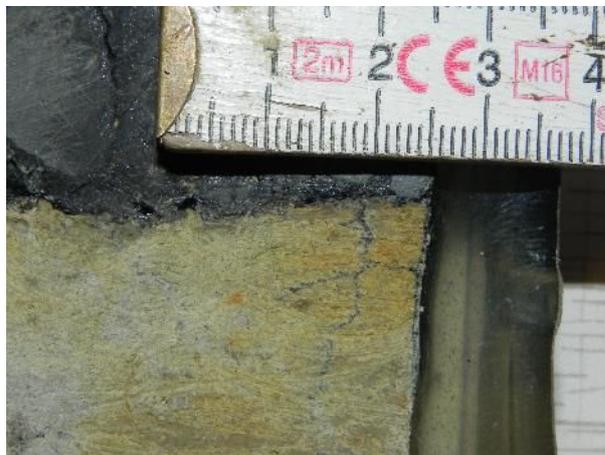


Abbildung 113: Nahaufnahme eines mit Bitumen verfüllten Risses im Ton

Die Konturproben aus den Versuchen ASP-3 und ASP-4 wurden im Technikum des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau in Freiberg optisch bewertet. Dafür wurden die Proben in 2 cm dicke Scheiben zersägt und die Scheiben in Epoxidharz konserviert (siehe Abbildung 112). Die Probenpräparation verhinderte, dass das Bitumen mit der Zeit abfloss. Bei der Untersuchung der einzelnen Scheiben wurden überwiegend scharfe Übergänge vom Bitumen zum Ton festgestellt. Punktuell waren die Schotterkörner des Asphalts in den Ton eingedrückt. Vereinzelt wurden kleinste Hohlräume und Fehlstellen im Größenbereich vom maximal 2 mm entdeckt, welche möglicherweise auf herausgerissene Partikel während des Sägens zurückzuführen sind. Überwiegend war der direkte Kontakt zwischen Bitumen und Ton hergestellt. Zudem penetrierte das Bitumen in feine Risse im Ton und verschloss diese, wie es in Abbildung 113 zu erkennen ist.

2.4 Vergleich der Versuchsergebnisse

2.4.1 Vergleich der Temperaturentwicklung

Der Temperaturverlauf ist bei allen Versuchen von der eingebrachten Wärmeenergie (Wärmezufuhr) und der mit der Zeit abgeführten Wärme (Wärmeabfuhr) abhängig. Die Wärmezufuhr ergibt sich aus der eingebauten Bitumenmasse bzw. beim dichten Steinasphalt aus der Masse der Schottermatrix und des Bitumens sowie der Verguss- bzw. Einbautemperatur. Die Wärmeabfuhr wiederum resultiert aus der Kontaktfläche mit dem Gebirge und der Ausgangstemperatur des Wirtsgesteins sowie dessen Wärmeleitfähigkeit und spezifischen Wärmekapazität. Bei der bitumenverfüllten Schottersäule wirkt die „kalt“ eingebaute Schottermatrix zudem als Wärmepuffer, der Wärmeenergie aus dem heißen Bitumen aufnimmt, bis die Temperaturdifferenz beider Medien ausgeglichen ist und anschließend gemeinsam mit dem Bitumen Wärme an das Gebirge abgibt.

Um die Einzelversuche besser vergleichen zu können, wurde die eingebrachte Wärmeenergie näherungsweise nach Formel 3 berechnet. Konkrete thermische Berechnungen und Modellierungen werden im Teilbericht zum AP 5 dargestellt.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Formel 3

ΔQ	Wärmeenergie	[kJ]
m	Masse	[kg]
c	spezifische Wärmekapazität	[J/(kg·K)]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]

Die thermischen Materialparameter sind in Tabelle 11, die Einbaumassen und Ausgangstemperaturen in Tabelle 12 aufgeführt.

Tabelle 11: Thermische Materialparameter für die Bitumen- und Asphaltversuche¹

	Bitumen	Basaltschotter	Steinsalz	Ton (Wiesa)
spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	1675 bis 1800 [Read & White-oak, 2003]	750 bis 1000 [BvG, 2020]	850 bis 900 [Minkley et al., 2010], [Lerch et al., 2012]	1095 bis 1420
Wärmeleitfähigkeit [W(m·K)]	0,16 [Read & White-oak, 2003]	1,3 bis 2,3 [BvG, 2020]	3,2 bis 6,1 [Minkley et al., 2010], [Lerch et al., 2012]	2,2 bis 2,8

Tabelle 12: Einbaumassen und Ausgangstemperaturen der Bitumen- und Asphaltversuche

	Einbaumasse Bitumen	Einbaumasse Schotter	Ausgangstemp. Bitumen/Asphalt	Ausgangstemp.	Wärmeenergie ² ΔQ
	[kg]	[kg]	[°C]	[°C]	[kJ]
BIT-1	10,2	-	143	27	2.130
BIT-3	15,5	-	163	18	4.046
ASP-1	24,1	96,0	170	25	6.290
ASP-2	26,3	138,8	140	27	15.732
ASP-3	28,6	94,9	171	20	7.773
ASP-4	24,9	112,5	168	23	16.357

Aufgrund des geringeren Bohrlochdurchmessers (30 cm) bei den Versuchen mit reinem Destillationsbitumen im Vergleich zu den Bohrlöchern der Asphaltversuche (Durchmesser 50 cm) wurde eine geringere Bitumenmasse eingebaut. Die eingetragene Wärmeenergie ist daher bei den Versuchen BIT-1 mit 2.130 kJ und BIT-3 mit 4.046 kJ am geringsten. Der Unterschied zwischen beiden Bitumenversuchen ergibt sich aus der niedrigeren Vergusstemperatur im BIT-1 und der größeren Einbaumasse im BIT-3. Die Vergusstemperatur wurde angepasst, um die niedrigere Viskosität des Bitumens bei hohen Temperaturen zu nutzen, sodass Luft einschließen besser entweichen und das Bitumen schneller in vorhandene Hohlräume penetriert.

¹ Die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit sind temperaturabhängige Größen, weshalb an dieser Stelle Wertebereiche angegeben sind. Mit zunehmender Temperatur steigt i.d.R. die spezifische Wärmekapazität.

² Für die Berechnung wurde eine spezifische Wärmekapazität von 1800 J/(kg·K) für Bitumen und 1000 J/(kg·K) für Basalt angesetzt. Für die Versuche ASP-1 und ASP-3 wird davon ausgegangen, dass der Schotter eine Temperatur entsprechend der Gebirgstemperatur aufweist. Das Ergebnis stellt einen Näherungswert dar, der eine Einordnung der eingebrachten Wärmeenergie erlaubt.

Bei den Versuchen ASP-1 und ASP-3 (bitumenverfüllte Schottersäule) wurde entsprechend der größeren Bitumenmenge mit 6.290 kJ und 7.773 kJ mehr Wärmeenergie eingebracht. Der Unterschied zwischen beiden Versuchen ist gering und begründet sich mit der Einbaumassendifferenz und der Temperaturdifferenz.

Noch deutlich höher fällt die eingetragene Wärmeenergie bei den Versuchen mit dichtem Steinasphalt ASP-2 und ASP-4 aus, da wie oben beschrieben auch die Schottermatrix vor dem Einbau erhitzt wurde. Der Unterschied zwischen beiden Versuchen ist bei einer berechneten Wärmemenge von 15.732 kJ bzw. 16.357 kJ ebenfalls klein.

In Abbildung 114 sind die Kerntemperaturen der Steinsalzversuche gegenübergestellt. Die Kerntemperatur des Versuchs BIT-1 (blaue Kurve) fällt in den ersten Stunden vergleichsweise schnell ab, was auf das größere Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis zurückgeführt wird. Die Kerntemperatur des Versuchs ASP-1 (grüne Kurve) fällt zunächst fast instantan auf unter 80°C, da die Schottermatrix die Wärmeenergie des Bitumens absorbiert. Anschließend sinkt die Temperatur langsam bei gleichzeitig stagnierender Abnahme. Die Kerntemperatur des Versuchs ASP-2 (rote Kurve) liegt in den ersten Stunden höher als bei BIT-1 und ASP-1. Der weitere Verlauf deckt sich weitgehend mit den anderen beiden Versuchen. Der jeweils zweite Ausschlag der Kurven bei ca. 24 Stunden resultiert in BIT-1 und ASP-1 aus dem Verguss der oberen Sperrschicht. Die erneute Temperaturzunahme im ASP-2 hingegen bildet die zweite Einbauphase des Steinasphalts ab (vgl. Abschnitt 2.2.8). Wird die Wärmeenergie als Integral unter den Kurven verstanden, bestätigt sich die größere eingebrachte Wärmemenge des Versuchs ASP-2. Von den vorliegenden Beobachtungen ausgehend sinkt die Temperatur in BIT-1 und ASP-1 nach ca. 24 Stunden auf das Umgebungsniveau ab. Der zweiphasige Einbau im ASP-2 verzögert den Temperaturausgleich um weitere 24 Stunden. Unter den gegebenen Bedingungen (Dimensionierung der halbtechnischen Versuche, thermische Eigenschaften des Steinsalzes) wird die eingetragene Wärmeenergie somit innerhalb von 24 bis 48 Stunden in das Gebirge abgeleitet.

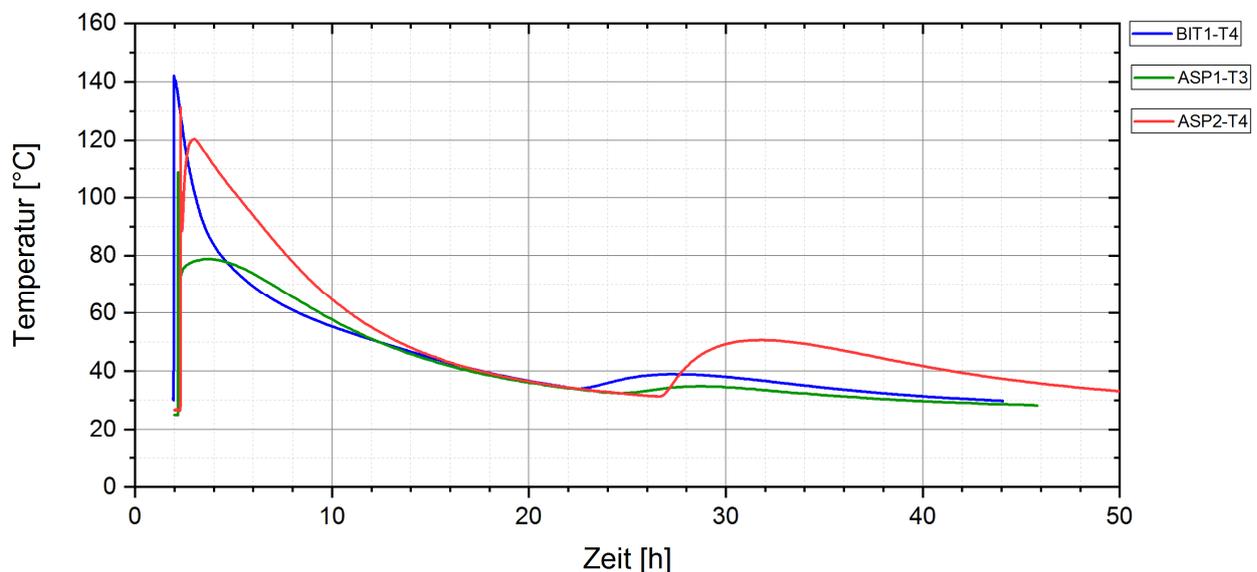


Abbildung 114: Gegenüberstellung der Temperaturentwicklung im Zentrum der Versuche im Steinsalz

Die Versuche im Ton zeigen ähnliche Ergebnisse (siehe Abbildung 115). Die Kerntemperatur des Versuchs BIT-3 (blaue Kurve) fällt relativ schnell ab, darf aber nur bis zum Zeitpunkt neun Stunden beachtet werden, da anschließend ein äußerer Temperatursturz (sich verändernde Witterungsverhältnisse) die Messung beeinträchtigte. Der Versuch wurde am Folgetag beendet.

Die Kerntemperatur des Versuchs ASP-3 (grüne Kurve) sinkt analog ASP-1 in den ersten Minuten rapide auf ca. 85°C und fällt danach langsam weiter ab. Der Verguss der oberen Sperrschicht zeigt sich hier weniger deutlich und führt im Zeitraum von 12 bis 20 Stunden zu einem flacheren Kurvenverlauf. Ein temporärer Wiederanstieg, wie im ASP-1, wurde nicht beobachtet. Analog ASP-2 verläuft die Kerntemperatur des Versuchs ASP-4 (rote Kurve) oberhalb der anderen beiden Versuche. Bei 24 Stunden ist die Temperaturzunahme als Folge der zweiten Einbauphase erkennbar. Nach ca. 48 Stunden ist die Kerntemperatur in den Versuchen ASP-3 und ASP-4 auf Umgebungsniveau gesunken. Die Wärmeenergie wurde daher unter den gegebenen Bedingungen nach 48 Stunden überwiegend an das Tongebirge abgegeben.

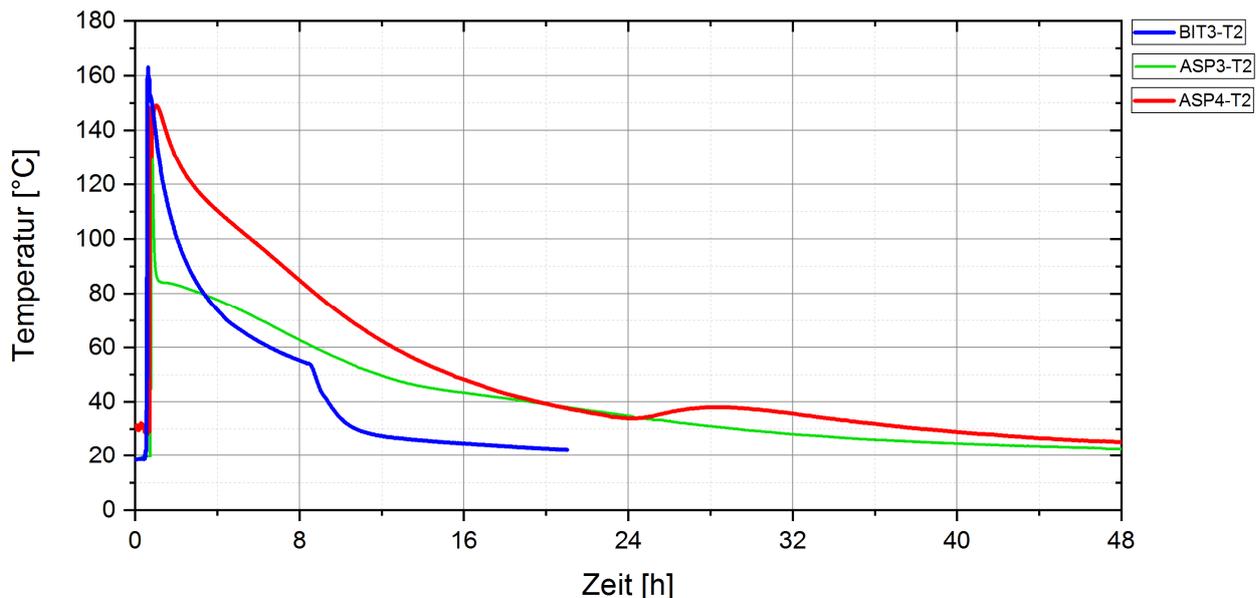


Abbildung 115: Vergleich der Temperaturentwicklung im Zentrum der Versuche im Ton

In den Versuchen BIT-3, ASP-3 und ASP-4 wurde die Temperaturentwicklung im Wirtsgestein eingehend untersucht. In Abbildung 116 ist der Temperaturverlauf im Ton im senkrechten Abstand von 2 cm (T10), 5 cm (T11), 10 cm (T12) und 15 cm (T13) von der Bohrlochkontur dargestellt. Das niedrigste Temperaturmaximum zeigt die bitumenverfüllte Schottersäule (ASP-3, grüne Kurven). Der Verguss der oberen Sperrbitumenschicht zeigt sich bei 12 bis 20 Stunden. Die Temperaturmaxima des reinen Bitumens (BIT-3, lila bis blaue Kurven) liegen geringfügig höher, die Temperatur nimmt aber schneller ab. Die höchste Temperatur verzeichnete der dichte Steinaspalt (ASP-4, rote bis orange Kurven) mit 50 °C in 2 cm Abstand zur Kontur. Nach 24 bis 28 Stunden ist auch hier die zweite Einbauphase ablesbar. In der Grafik wird deutlich, dass die Temperatur bereits in wenigen Zentimetern Abstand zur Kontur auf wesentlich niedrigerem Niveau verläuft.

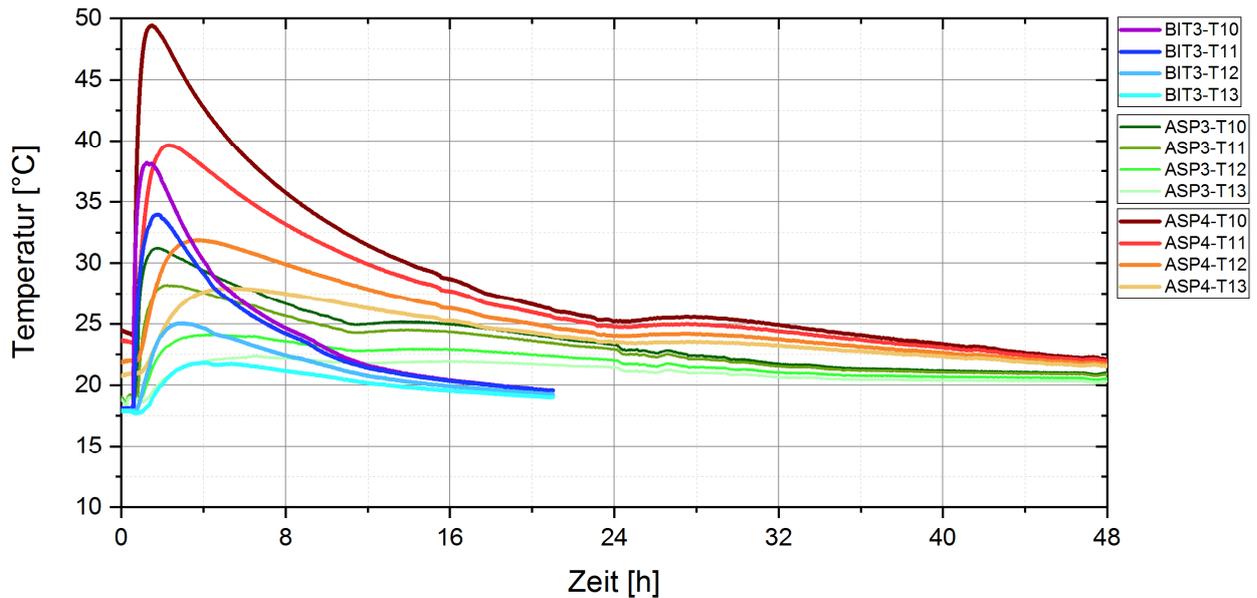


Abbildung 116: Vergleich der Temperaturentwicklung im anstehenden Ton

Entscheidend beim Heißeinbau ist, dass das Temperaturkriterium beim Einsatz dieser Technologie erfüllt bleibt, d.h. dass sich das Wirtsgestein an der Kontur des Verschlusselements nicht über 100°C erwärmt und Porenwasser bzw. in den Zwischenschichten des Tons gebundenes Wasser nicht verdampft. Im Rahmen der halbtechnischen Versuche wurde dieses Kriterium erfüllt.

In der vergleichenden Betrachtung der verwendeten Technologien (reines Bitumenelement, bitumenverfüllte Schottersäule und dichter Steinasphalt) hinsichtlich ihrer thermischen Wechselwirkung mit dem Wirtsgestein (Ton und Salz) verhalten sich die Einzelversuche sehr ähnlich. In Abbildung 117 sind die Versuche BIT-1 und BIT-3 einander gegenübergestellt, wobei jeweils die Kerntemperatur und der Temperaturverlauf an der Kontur in mittlerer Höhe der Bitumenelemente dargestellt sind. In der Grafik sind keine signifikanten Unterschiede gegeben. Der Temperaturverlauf ist nahezu identisch und unterscheidet sich lediglich in der höheren Vergusstemperatur.

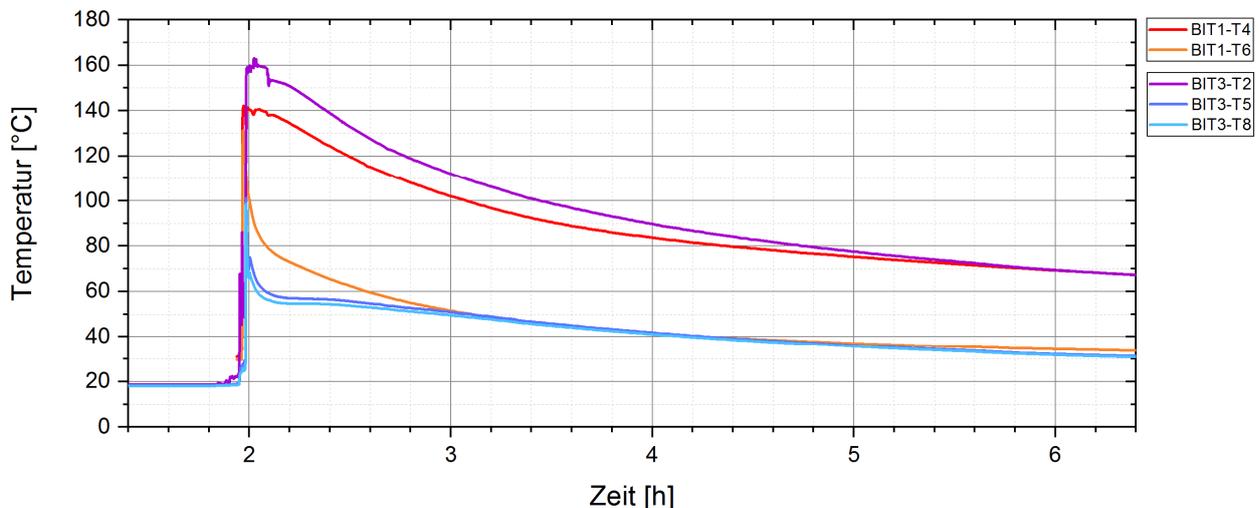


Abbildung 117: Vergleich der Versuche mit Bitumen (BIT-1 und BIT-3)

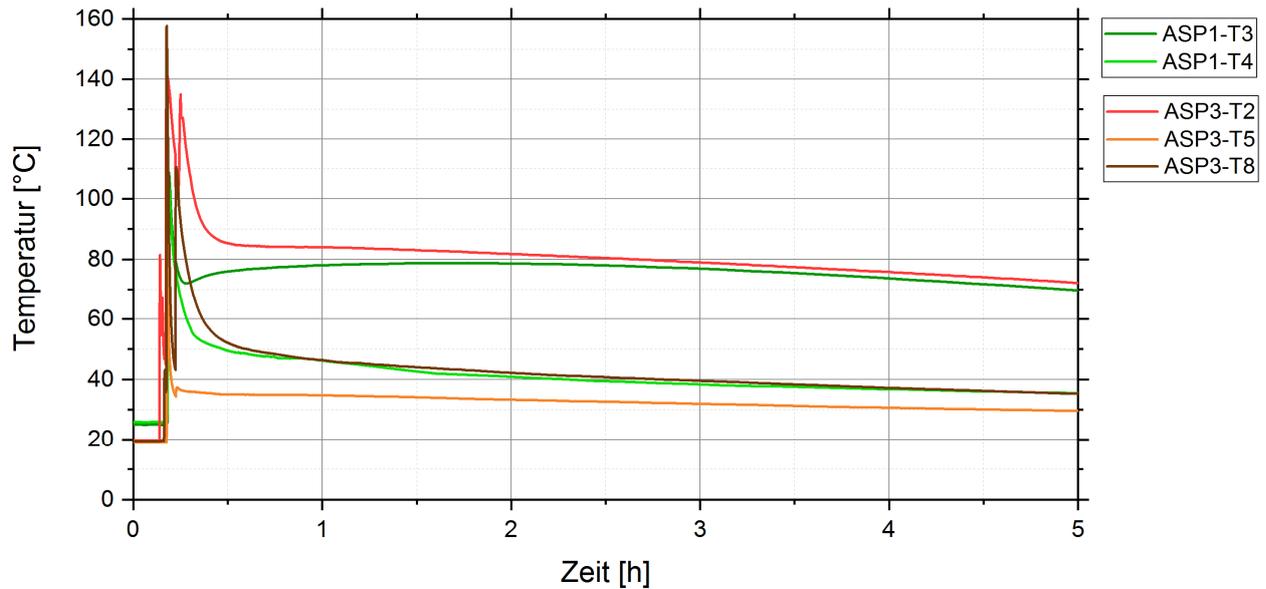


Abbildung 118: Vergleich der bitumenverfüllten Schottersäulen ASP-1 (Steinsalz) und ASP-3 (Ton)

Die Versuche ASP-1 und ASP-3 werden anhand der Kerntemperatur und des Temperaturverlaufs an der Kontur in mittlerer Höhe in Abbildung 118 dargestellt. Auch hier zeigt sich der Temperaturverlauf sehr ähnlich. Für den Sensor ASP3-T8 wird davon ausgegangen, dass dessen Messspitze in den Bitumen hineinragte und nicht direkt an der Kontur anlag. Das führte zu einer hohen Spitzentemperatur. Der weitere Temperaturverlauf entspricht jedoch weitgehend den Beobachtungen am gegenüberliegenden Sensor ASP3-T5. Unterschiede zwischen Steinsalz und Ton bezüglich ihres thermischen Verhaltens gegenüber dem Heißeinbau lassen sich nicht ableiten.

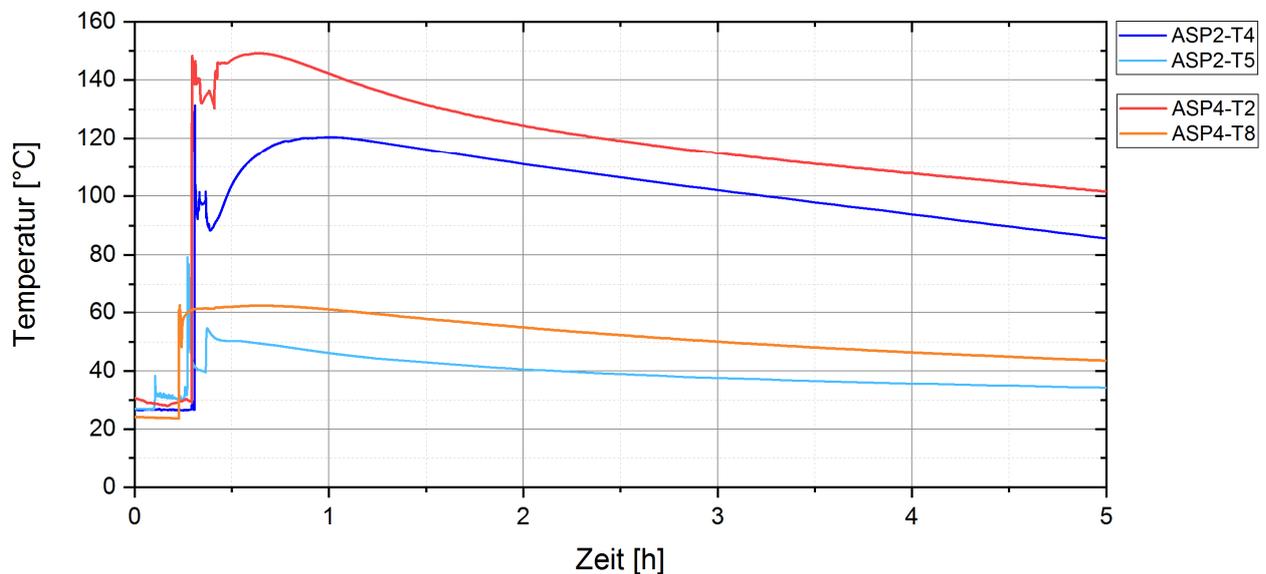


Abbildung 119: Vergleich der Versuche mit Steinasphalt ASP-2 (Steinsalz) und ASP-4 (Ton)

In Abbildung 119 werden die Kerntemperatur und der Temperaturverlauf an der Kontur in mittlerer Höhe zwischen den Versuchen ASP-2 und ASP-4 verglichen. Unterschiede zeigen sich auch in diesem Fall nur bei der Einbautemperatur, die bei ASP-4 höher gewählt wurde.

2.4.2 Vergleich der Druckbeaufschlagung

Die Bohrlochversuche wurden jeweils mit einer Druckkammer und einer Kontrollkammer ausgestaltet, um eine Druckbeaufschlagung des Bitumen- bzw.- Asphaltelements zu erlauben und das Abdichtvermögen des jeweiligen Verschlusselements und die Permeabilität des umgebenden Gebirges einzuschätzen. Die Druckbeaufschlagung erfolgte durch die IBeWa im Beisein der TU BAF, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau.

Mit Ausnahme des ersten Versuchs BIT-1 waren alle Versuche so ausgelegt, dass sie mit Gas und mit Lösung beaufschlagt werden konnten. Jedoch wurde nur der Versuch BIT-2 mit Lösung beaufschlagt.

Die Permeabilität und damit das Abdichtvermögen des Gesamtsystems ist maßgeblich von den Eigenschaften des Wirtsgesteins abhängig. Während der Versuche wurde gezeigt, dass die dotierte Druckluft bzw. die Salzlösung an der Oberfläche (Sohle) nicht ausgetreten ist. In den Kontrollkammern wurde zum Teil ein Druckanstieg registriert. Da aber auch hier kein TRACER-Gas nachgewiesen wurde, ist sowohl eine Durchströmung des Verschlusselements als auch eine Umströmung über die Kontaktfläche zum Gebirge und über die ALZ ausgeschlossen. Der Druckanstieg ist vielmehr auf das elastische Verhalten des Bitumens zurückzuführen, das die Druckdifferenz zum Umgebungsdruck nach oben überträgt. Die Verschlusselemente sind somit technisch dicht.

Der Rückbau der Bitumenversuche BIT-1 und BIT-2 zeigte, dass Gasblasen im Bitumen aufstiegen. Über längere Zeiträume bildete sich somit potenziell ein Austrittspfad. Während des Rückbaus der Asphaltversuche ASP-3 und ASP-4 wurden keine größeren Gasblasen entdeckt. Kleinste Lufteinschlüsse stammen wahrscheinlich aus der Einbauphase und wurden im Verschlusselement gefangen. Aus dieser Beobachtung lässt sich ein gutes Rückhaltevermögen gegenüber aufsteigenden Fluiden unter Druck ableiten. Für eine genaue Quantifizierung war der Beobachtungszeitraum jedoch zu kurz und der anstehende Ton ungeeignet. Die Asphaltversuche im Steinsalz wurden aus technischen und logistischen Gründen nicht rückgebaut.

Der gemessene Druckabfall während der Druckbeaufschlagungen resultiert unter Beachtung der vorhergehenden Punkte (keine Durchströmung / keine Umströmung der Verschlusselemente) aus dem radialen Abströmen des Prüffluids in das Gebirge. Die Tabelle 13 gibt eine Übersicht über die vorgenommenen Druckbeaufschlagungen und die Ergebnisse.

Tabelle 13: Übersicht Druckbeaufschlagung der Bitumen- und Asphaltversuche

Versuch	Gestein	Druckmedium	Prüfdruck ³	Permeabilität ⁴	Bemerkungen
BIT-1	Steinsalz	dotierte Druckluft	0,12 MPa	$3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$	
		dotierte Druckluft	1,05 MPa	$2 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$	
BIT-2	Steinsalz	dotierte Druckluft	1,05 MPa	$6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$	
		Salzlösung	1,20 MPa	$1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$	
BIT-3	Ton	-	-	-	aufgrund ungünstiger Witterung nicht durchgeführt
ASP-1	Steinsalz	dotierte Druckluft	0,20 MPa	$4 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$	
ASP-2	Steinsalz	dotierte Druckluft	0,23 MPa	$3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$	
ASP-3	Ton	dotierte Druckluft	0,15 MPa	$1,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$	
ASP-4	Ton	dotierte Druckluft	0,15 MPa	-	Druckaufbau nicht möglich aufgrund Fluidabströmung

Im Steinsalz wurde eine Gaspermeabilität von $3 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ bis $3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ bestimmt. Gegenüber der zuvor gemessenen Gaspermeabilität des unverritzten Gebirges von $1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$ bis $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$ ist diese geringfügig höher. Die Lösungspermeabilität im Versuch BIT-2 betrug $1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$.

Die Druckbeaufschlagungen im Ton müssen differenziert betrachtet werden. Der anstehende Ton ist anisotrop, inhomogen und nicht frei von Rissen. Er lag im halbfesten Zustand vor und wurde oberflächennah aufgeschlossen. Ein den möglichen Bedingungen in einem Endlager besser entsprechender Tonstein stand zum Versuchszeitpunkt nicht zur Verfügung (siehe Abschnitt 2.3 im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.1). Entsprechend der oberflächennahen Anordnung der Versuche in diesem Lockergestein wurde vor Beginn der Druckbeaufschlagungen der Gaseindringdruck des Tons am Versuchsort bestimmt. Dieser lag bei 70 kPa, sodass der Prüfdruck auf 50 kPa Überdruck (150 kPa Absolutdruck) festgelegt wurde. Oberhalb des Gaseindringdrucks wird von einer Verdrängung des Porenwassers aus dem Ton ausgegangen.

Im Labor wurde versuchsbegleitend der Durchlässigkeitsbeiwert des Tons bestimmt. Das Strömungsfluid ist dabei Wasser. Dieser lag bei $5,0 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ bis $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, was näherungsweise einer Permeabilität von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ entspricht. Im Vergleich dazu wurde eine Gaspermeabilität von $1,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ am Versuch ASP-3 ermittelt, die in etwa auf dem Permeabilitätsniveau eines gestörten Tonsteins (ALZ) liegt. Am Versuch ASP-4 konnte keine Permeabilität ermittelt werden, da das Testfluid instantan abströmte und kein stabiles Druckniveau aufgebaut werden konnte. Vermutlich entwich das Prüffluid über bereits vorhandene Risse aus der Druckkammer in das Gebirge.

Das Permeabilitätsniveau des Tons liegt um 6 Größenordnungen höher als im Steinsalz, wobei der am Versuchsstandort anstehende Ton nicht endlagerrelevant ist und nur bedingt mit Tonstein verglichen werden kann. In beiden Wirtsgesteinen zeigte sich, dass die Permeabilität primär vom Wirtsgestein bestimmt wird und das Verschlusselement aus Bitumen oder Asphalt quasi undurchlässig ist.

³ Angegeben ist der Absolutdruck des Fluids. Der wirksame Überdruck auf das Verschlusselement ergibt sich aus dem Absolutdruck abzüglich des atmosphärischen Umgebungsdrucks (näherungsweise 0,1 MPa).

⁴ Die angegebene Permeabilität ist als integrale Permeabilität für das Gesamtsystem zu verstehen, d.h. für das Verschlussbauwerk und das umgebende Gebirge. Bestimmend ist somit der Bereich mit der höchsten Permeabilität.

2.5 Zusammenfassende Wertung zum Arbeitsschritt 4.5

Der Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5: „Weiterentwicklung von Asphalt dichtungen“ stellt die Ergebnisse zu in-situ-Versuchen mit Bitumen und Asphalt im Rahmen des Vorhabens ELSA - Phase 2 dar. Der Arbeitsschritt 4.5 diente dabei der Erprobung, Validierung und Weiterentwicklung der im AP 3 und früheren Vorhaben entwickelten und optimierten Verschlusselemente. Es wurde ein dichter Steinasphalt auf Basis eines kantengerundeten Schotters und eines Destillationsbitumens 70/100 entwickelt und mit dem System bitumenverfüllte Schottersäule sowie mit reinem Bitumen (ohne Gesteinszuschlag) im Steinsalz und im Tongestein verglichen. Alle Verschlusselemente wurden nach dem Prinzip „Harte Schale – weicher Kern“ aufgebaut. Die Ergebnisse fanden Eingang in Modellierungsarbeiten zum AP 5.

Aus den Versuchen zum Arbeitsschritt 4.5 können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Prinzipien der bitumenverfüllten Schottersäule und des dichten Steinasphalts wurden beide erfolgreich in situ sowohl im Steinsalz als auch im Ton angewendet. Die bautechnische Machbarkeit wurde demonstriert. Insbesondere wurde mit dem *Dichten Steinasphalt* eine Alternative zur bereits großtechnisch erprobten bitumenverfüllten Schottersäule (Vorhaben BiSETO) [Glaubach et al., 2013] entwickelt und in situ untersucht. Vorteilhaft für den *Dichten Steinasphalt* ist, dass das Bitumen durch das Vormischen die Schotterkornoberfläche vollständig benetzt und Staubnester, wie sie bei der großtechnischen Umsetzung der bitumenverfüllten Schottersäule auftraten, verhindert werden. Gleichzeitig wirkt sich dieser Vorgang nachteilig auf den Arbeits- und Energieaufwand aus. Das Material wurde zweimal erhitzt (Vormischen, Einbau), wobei zusätzlich zum Bitumen auch die Schottermatrix erhitzt wurde. Die benötigte Wärmemenge ist damit im Vergleich zur bitumenverfüllten Schottersäule ca. vier bis fünf mal höher.
- Die sieben halbtechnischen Versuche demonstrieren die prinzipielle Machbarkeit des Heißeinbaus von Bitumen, wobei insbesondere das Kriterium von $<100^{\circ}\text{C}$ an der Kontur im Ton eingehalten wurde. Dabei wurde die niedrige Viskosität des Bitumens bei höheren Temperaturen (bis 170°C) genutzt, um Gaseinschlüsse während des Einbauvorgangs zu unterbinden und den Schotterporenraum vollständig auszufüllen, ohne das genannte Kriterium zu verletzen. Im Falle des *Dichten Steinasphalts* wurde bedingt durch begrenzte Ofenkapazitäten in situ in zwei Etappen eingebaut. Dadurch wurde auch der Zeitraum gestreckt, in welchem die wesentlich größere Wärmemenge eingebracht wurde. Die Maximaltemperaturen an der Kontur wurden hierdurch indirekt beeinflusst.
- Im Bitumen besteht die Möglichkeit, dass Gasblasen aufgrund des Dichteunterschieds im Verschlusselement aufsteigen und das sonst für Gase undurchlässige Bitumen durchwandern. Die Schottermatrix in Asphaltelelementen behindert derartige Prozesse und verhindert im günstigsten Fall den weiteren Gasanstieg. Die Gaseinschlüsse werden zwischen den Schotterkörnern im Bitumen immobilisiert.
- Das verwendete Bitumen haftete sehr gut an der Kontur und drang in vorhandene Risse ein, die dadurch verschlossen wurden. In Steinsalz wurde ein Voranstrich auf Bitumenbasis angewandt. Eine gesonderte Vergütung der Kontaktzone (Injektionen) war damit nicht notwendig. Fließwege entlang Kontaktfuge bzw. ein Kontaktpalt bildeten sich in keinem der Versuche.
- Die integrale Permeabilität des Systems wird von der ALZ im Wirtsgestein bestimmt. Die Verschlusselemente wurden während der Versuchsdauer nicht umströmt. Das Prüffluid

strömte in allen Fällen radial in das Gebirge ab. Langfristig ist jedoch von einer Umströmung auszugehen. Berechnungen hierzu wurden von der IBeWa im AP 5 durchgeführt (siehe Teilbericht zum AP 5).

- Es konnten Daten für die hydraulische und thermische Modellierung gewonnen werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Bundesverband Geothermie (2020): thermische Eigenschaften eines Gesteins, Onlinebibliothek, <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermekapazitaet.html>, abgerufen am 30.09.2020
- Glaubach, U.; Gruner, M. und Hofmann, M.; Patent (2011): "*Material zur Verbesserung der Dichtwirkung einer Bitumen- oder Asphaltdichtung im Salzgestein*"; DE102008050211, 2011
- Glaubach, U.; Hofmann, M. und Kudla, W. (2012): "*3. Zwischenbericht „Halbtechnische Versuche zum Einguss von Bitumen in Basaltschotter“*", TU Bergakademie Freiberg, Bergtechnische Erprobung von Bitumen/Asphalten als Dichtmaterialien in langzeitstabilen Schachtverschlussbauwerken, Salzgitter, Bundesamt für Strahlenschutz, 2012
- Glaubach, U.; Hofmann, M. und Kudla, W. (2013): "*BiSETO - Durchführung eines Großversuchs über Tage zur Optimierung der Einbringtechnologie bei der Herstellung der Widerlager-Dichtelemente aus Bitumen und Schotter*", BfS: 9M/32345011/GHS/RB/0008: Bundesamt für Strahlenschutz, Unterlage I517, 2013
- Hoffmann, R. (2016): "*Untersuchungen zum Einbau einer neuen Asphaltrezeptur als Dichtelement in zukünftigen Schachtverschlüssen für HAW-Endlager*", Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung Bergbau, Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg
- Wilsnack, Th.; Roskosch, B.; Schön, M. (2017): "*In situ Untersuchungen der Asphaltdichtelemente im Ton, Standort Wiesa – Permeabilitätsmessungen*", Untersuchungsbericht, IBeWa - Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Wilsnack und Partner, Freiberg, 26.09.2017
- Kudla, W.; Glaubach, U. und Gruner, M. (2010): "*Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke*", Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Abschlussbericht FKZ 02C1124, 2010
- Kudla, W.; Schreiter, F.; Gruner, M.; Jobmann, M.; Bollingerfehr, W.; Müller-Hoeppe, N.; et al. (2013): "*Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1*", Abschlussbericht, TUBAF & DBETEC, Freiberg, 2013
- Lerch, C.; Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Zhang, Q. (2012): "*Thermo-mechanical analyses for evaluating an HLW-repository concept*"; Mechanical Behavior of Salt VII: Proceedings of the 7th Conference, Hrsg.: Berest, P.; Ghoreychi, M.; Hadj-Hasse, F.; Tijani, M., Taylor & Francis Group, Paris, Frankreich, 2012
- Minkley, W.; Wüste, U.; Popp, T.; Naumann, D.; Wiedemann, M.; Bobinsky, J.; Tejchman, J. (2010): "*Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinärbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss*", IfG Leipzig GmbH, Leipzig, 2010
- Plüschke, R.; Rascher, J. (1999): "*Ton und Kaolinlagerstätte Wiesa, Stephan Schmidt Meißer GmbH*". in Schriftenreihe für angewandte Geowissenschaften 1999 (2), S. 95-100

Read, J.; Whiteoak, D. (2003): „The Shell Bitumen handbook“, John Read, David Whiteoak, technical editor Robert N. Hunter, ed, London: Thomas Telford, 5. Auflage, London, 2003

Stephan Schmidt Gruppe (2017): Rohstoffdatenblatt, Kamenz-Wiesa, 2017

Wolf, T. (2017): mündliche Auskunft während der Befahrung des Tagebaus Wiesa Hasenberg, Stephan Schmidt Meißen GmbH, Kamenz-Wiesa, 15.02.2017