



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 4.1

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	7
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	8
VERZEICHNIS DER AUSFÜHRLICHEN TEILBERICHTE	9
VERZEICHNIS DER FORMELZEICHEN UND INDIZES	10
1 VORBEMERKUNGEN	11
1.1 ARBEITSSCHRITTE UND BETEILIGTE PERSONEN	11
1.2 VORBEMERKUNG ZU EINIGEN BODENMECHANISCHEN PARAMETERN	12
2 ERKUNDUNG AN DEN VERSUCHSORTEN (AP 4.0)	14
2.1 EINLEITUNG	14
2.2 VERSUCHSORTE IN DER GRUBE SONDRERSHAUSEN	15
2.2.1 Phasenbestand und Wassergehalt	16
2.2.2 In-situ-Gaspermeabilität (IBEWA) am Versuchsort 2	16
2.3 VERSUCHSORT IN DER GRUBE TEUTSCHENTHAL	18
2.4 VERSUCHSORT TONGRUBE WIESA-THONBERG	20
3 FÜLLSÄULEN AUS VERDICHTETEM STEINSALZ (AP 4.1)	22
3.1 EINLEITUNG	22
3.2 KONVENTIONELLE VERDICHUNG VON SALZGRUS-TON-GEMISCHEN	22
3.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	23
3.2.2 Auswertung und Ergebnisse	28
3.3 ERSTER FELDVERSUCH ZUR IMPULSVERDICHUNG (STV-3)	31
3.3.1 Versuchsziele	31
3.3.2 Vorversuch	31
3.3.3 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	34
3.3.4 Rückbau des Gesenkversuches	49
3.3.5 Ergebnisse und Auswertung	52
3.4 ZWEITER FELDVERSUCH ZUR IMPULSVERDICHUNG (STV-4)	58
3.4.1 Allgemeines zum zweiten Versuch	58
3.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	59
3.4.3 Auswertung des Versuchs	67
3.5 ZUSAMMENFASSENDE WERTUNG ZUM ARBEITSSCHRITT 4.1	79
4 KALOTTEN AUS BASALTSTEINEN ALS ZUSATZELEMENT IN SETZUNGSSTABILEN SCHOTTERSÄULEN (AP 4.2)	81
LITERATURVERZEICHNIS	82
VERZEICHNIS DER ANHÄNGE	83

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Lage der Erkundungsbohrungen VB1-13, VB2-13 und VB3-13 (rot) in Relation zu den Versuchsorten 1 und 2 (Darstellung GSES).....	15
Abbildung 2: Versuchsort 2, Erkundungsbohrung VB3/13 im Schnitt.....	16
Abbildung 3: Versuchsort 2, Erkundungsbohrung VB3/13 im Grundriss	16
Abbildung 4: Lage der Messpunkte der Permeabilitätsbestimmung in der Erkundungsbohrung VB3/13	17
Abbildung 5: Lage des neuen Versuchsortes in der Grube Teutschenthal.....	19
Abbildung 6: Erkundung mittels Rammkernbohrung	20
Abbildung 7: Bohrgestänge mit Kern.....	20
Abbildung 8: grauer Ton am Standort ASP-4	21
Abbildung 9: gelbbrauner Ton am Standort ASP-3	21
Abbildung 10: Lage der Mulden in der Versuchsnische am Versuchsort 1.....	23
Abbildung 11: Versuchsnische am Versuchsort 1	23
Abbildung 12: Oberflächenstruktur der Muldensohle.....	24
Abbildung 13: Aufgebaute Mischtechnik neben der Versuchsmulde 1.....	24
Abbildung 14: Lagenaufbau des STV-1.....	24
Abbildung 15: Lagenaufbau des STV-2.....	24
Abbildung 16: Abziehen der Lagenoberfläche nach dem händischen Einbau (M1L1)	25
Abbildung 17: Vorverdichtung einer Lage mit der leichten Rüttelplatte RP1 (M1L1).....	25
Abbildung 18: Materialaufschiebungen im Randbereich bei der Rezeptur OBSM (M1L1)	27
Abbildung 19: Oberflächenschäden infolge Überverdichtung durch RP3 (M1L4).....	27
Abbildung 20: Staubentwicklung bei der Verdichtung mit der schwersten Rüttelplatte RP3 (M1L1)	28
Abbildung 21: Oberflächenstruktur nach der Verdichtung mit der Grabenwalze (M2L6).....	28
Abbildung 22: Abhängigkeit der Porosität vom Wassergehalt.....	29
Abbildung 23: Im Vorversuch verwendeter Stahlbehälter mit dem Impulsverdichter	32
Abbildung 24: Havarie des Stahlbehälters durch Versagen der Verschraubung (M20 8.8).....	32
Abbildung 25: Im Vorversuch gewonnene Probe mit den Ansatzpunkten der Kernbohrungen	33
Abbildung 26: Luftgespülte Kernbohrung in der gewonnenen Probe (Bohrung 2).....	33
Abbildung 27: Kerngewinn der Bohrung 2.....	33
Abbildung 28: Porosität in Abhängigkeit von der Lage im Querschnitt der Probe	33
Abbildung 29: Erkundungsarbeiten auf der mittleren Steinbruchsohle.....	35
Abbildung 30: Durch schonendes Sprengen aufgefahrener Gesenk.....	35
Abbildung 31: Fertig eingebaute Bewehrung für die Ringraumbetonage des Stahlringes.....	36
Abbildung 32: Detail der Bewehrung	36
Abbildung 33: Horizontaler Querschnitt des Gesenkaufbaus mit der schematischen Anordnung der Verpresskörper.....	36
Abbildung 34: Vertikaler Querschnitt des Gesenkaufbaus mit der schematischen Anordnung der Verpresskörper.....	36
Abbildung 35: Ansicht des vorbereiteten Versuchsortes	37
Abbildung 36: Fertiggestelltes Gesenk.....	37

Abbildung 37: Verteilen des eingeschütteten Materials einer Einbaulage	39
Abbildung 38: Abziehen des Materials einer Einbaulage mit einem Richtscheit.....	39
Abbildung 39: Einsatz der leichten Vibrationsplatte RP1 bei der leichten Vorverdichtung.....	39
Abbildung 40: Einsatz der schweren Vibrationsplatte RP3 bei der schweren Vorverdichtung.....	39
Abbildung 41: Schichtweise Anordnung der verschiedenen Materialien und Art der Vorverdichtung bei den einzelnen Lagen.....	39
Abbildung 42: Kumulative Entwicklung der Porosität während der Vorverdichtung der 8 Einbaulagen bei allen 3 Gemischen.....	40
Abbildung 43: Markierung der Lagenoberflächen mit einem Grafitpuder.....	41
Abbildung 44: Positionierung des Verdichters am Gesenk.....	41
Abbildung 45: Ablauf der Impulsverdichtung in jeweils 4 Durchgängen mit jeweils 4 Ansatzpunkten ..	42
Abbildung 46: Verteilung der durch die Impulsverdichtung summarisch eingeleiteten Verdichtungsenergie	43
Abbildung 47: Typische Auflockerungen der Schichtoberfläche infolge des Eindrückens des Verdichterfußes.....	44
Abbildung 48: Überschüttung der 3. Schicht mit Splitt vor der Impulsverdichtung.....	45
Abbildung 49: Oberfläche der impulsverdichteten 3. Schicht	45
Abbildung 50: Gemessene Oberflächentopologie in Bezug zu den Positionen des Verdichterfußes ...	46
Abbildung 51: Probengewinnung mittels druckluftgespülter Kernbohrungen.....	47
Abbildung 52: Über die gesamte Gesenkfläche hochgepresstes Schichtpaket.....	47
Abbildung 53: Anordnung der Kernbohrungen in Bezug zur Oberflächentopologie des verdichteten Materials.....	48
Abbildung 54: Kernmarsch der Bohrung 11.....	48
Abbildung 55: Die Bohrkern wurden entlang der Grafitsschichten lagenweise gespalten (STG-3)	49
Abbildung 56: Anordnung des Sägeschlitzes	50
Abbildung 57: Ausführung des Sägeschlitzes	50
Abbildung 58: Fertiggestellter Aufschluss.....	50
Abbildung 59: Aufschluss durch alle Schichten der Salzgrus-Ton-Gemische	51
Abbildung 60: Verteilung der Porosität in den vertikalen Schnitten STV-3	54
Abbildung 61: Verteilung der luftgefüllten Porosität in den vertikalen Schnitten STV-3.....	55
Abbildung 62: Verteilung der erreichten MARSHALL-Dichte in den vertikalen Schnitten STV-3.....	56
Abbildung 63: Verteilung der Porosität in den horizontalen Schnitten.....	57
Abbildung 64: Schematischer Schichtaufbau des zweiten Versuches mit dem Impulsverdichter.....	58
Abbildung 65: Kornverteilung der Mischgutfractionen im STG	59
Abbildung 66: Gesenkbefüllung.....	60
Abbildung 67: Händische Verteilung des Baustoffs.....	60
Abbildung 68: Wacker Neuson DPU 2550H.....	60
Abbildung 69: Bomag BPR 100/80 D	60
Abbildung 70: Konstruktionsskizze Verdichterfuß	61
Abbildung 71: Beschwerungsplatten am Impulsverdichter	61
Abbildung 72: Verdichtungsschema Impulsverdichtung	62
Abbildung 73: Versuchsort nach dem Starkregenereignis.....	63

Abbildung 74: Gesenk nach der Entfernung des geschädigten Bereichs.....	63
Abbildung 75: Installation der Ultraschallsonde.....	64
Abbildung 76: Ultraschallsonde des IfG Leipzig.....	64
Abbildung 77: Aufrauungsversuch mittels Stahlbürste.....	65
Abbildung 78: Aufrauungsversuch mittels Stahlmatte.....	65
Abbildung 79: Lageplan zur Probennahme.....	65
Abbildung 80: Kernbohrungen zur Probennahme.....	66
Abbildung 81: Versuchskörper nach der Beprobung.....	66
Abbildung 82: Messapparatur für die Tauchwägung.....	66
Abbildung 83: Kernstück aus dem Gesenkversuch.....	66
Abbildung 84: Verteilung der Porosität STV-4.....	68
Abbildung 85: Verteilung der Gasporosität STV-4.....	69
Abbildung 86: Verteilung der erreichten MARSHALL-Dichte in den vertikalen Schnitten STV-4.....	70
Abbildung 87: Kernprobe für die Dünnschliffanalyse.....	71
Abbildung 88: Horizontale Dünnschliffe zur Untersuchung der Porenraumverteilung.....	72
Abbildung 89: Vergleich der Auswirkungen der Fußgeometrie.....	73
Abbildung 90: Bauzustand der ersten Schicht nach dem ersten Impulsverdichtungsdurchgang im Gesenkversuch 2015.....	74
Abbildung 91: Bauzustand der ersten Schicht nach dem ersten Impulsverdichtungsdurchgang im Gesenkversuch 2017.....	74
Abbildung 92: Zustand der Oberfläche nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2015.....	74
Abbildung 93: Schollenartige Ablösungen nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017.....	74
Abbildung 94: Beschwerungsplatten zur Reduktion der.....	75
Abbildung 95: Zustand der Oberfläche nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017.....	75
Abbildung 96: Stanzeffekt der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017.....	75
Abbildung 97: Laufzeitdiagramm der Ultraschallmessung.....	76
Abbildung 98 Kernproben aus den Kernbohrungen 3 und 4.....	77
Abbildung 99: Glatte Bruchfläche entlang einer Lagengrenze.....	77
Abbildung 100: Rauhe Bruchfläche an einer Kernprobe.....	77
Abbildung 101: Vertikaler Dünnschliff durch eine Kernprobe über drei Lagen.....	78

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Wassergehalt der Steinsalzproben aus den Erkundungsbohrungen	16
Tabelle 2: Messpunkte der in-situ-Permeabilitätsmessung in der Bohrung VB3-13	17
Tabelle 3: Ergebnisse der in-situ-Permeabilitätsmessung in der Bohrung VB3-13	18
Tabelle 4: geotechnische Kennwerte der Tonfazies	21
Tabelle 5: thermische Parameter und Druckfestigkeit des Tons	21
Tabelle 6: Betriebsparameter der eingesetzten Verdichtungsgeräte	23
Tabelle 7: Lagenaufbau des STV-1	24
Tabelle 8: Lagenaufbau des STV-2	24
Tabelle 9: Verdichtungsabläufe in der Versuchsmulde 1	25
Tabelle 10: Verdichtungsabläufe in der Versuchsmulde 2	26
Tabelle 11: Im Labor bestimmter Wassergehalt und Porosität der in den Muldenversuchen eingesetzten Rezeptur STG-2	29
Tabelle 12: In der Versuchsmulde 1 bestimmte Porosität	30
Tabelle 13: In der Versuchsmulde 2 bestimmte Porosität	30
Tabelle 14: Referenzwerte der Porosität der im Labor verdichteten Gemische	31
Tabelle 15: Mittlere Porosität der der Bohrkern 1 und 2	34
Tabelle 16: Teufenabhängige Verpressdrücke	36
Tabelle 17: Übersicht der Zusammensetzung der Salzgrus-Ton-Gemische	37
Tabelle 18: Zuordnung des lagenweisen Vorverdichtungsablaufs	38
Tabelle 19: Zuordnung des lagenweisen Vorverdichtungsablaufs	39
Tabelle 20: Porosität der 3 vorverdichteten Schichten (Gemische) direkt vor der Impulsverdichtung ..	40
Tabelle 21: Relative Verschiebung im Überlappungsbereich des Verdichterfußes	46
Tabelle 22: Relative Verschiebung unter dem Verdichterfuß bei den verschiedenen Ansatzpunkten ..	46
Tabelle 23: Gesamtergebnis der 3 verschiedenen Gemische im Vergleich	57
Tabelle 24: Zusammensetzung Einbaumaterial	59
Tabelle 25: Aufstellung der Fallhöhe und der Verdichtungsenergie	62
Tabelle 26: Überblick über den Verdichtungsablauf im STV-4	63
Tabelle 27: Vergleich der Porosität zwischen den Gesenkversuchen von 2015 und 2017	67
Tabelle 28: Vergleich der Messergebnisse zwischen STV-3 und STV-4	71

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AP	Arbeitspaket
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung
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
IPV	Impulsverdichtung; Prozess zur Verdichtung eines Materials mittels eines dynamischen Verdichtungsgeräts
LVV	leichte Vorverdichtung; Prozess zur Vorverdichtung eines Materials mittels leichtem Verdichtungsgerät
Ma%	Masse %
STG-1	Salzgrus-Ton-Gemisch 1; Bezeichnung für ein Gemisch aus Salzgrus und Ton, vormals als „EBSM“ bezeichnet
STG-2	Salzgrus-Ton-Gemisch 2; Bezeichnung für ein Gemisch aus Salzgrus und Ton, vormals als „OBSM“ bezeichnet
STG-3	Salzgrus-Ton-Gemisch 3; Bezeichnung für ein Gemisch aus Salzgrus und Ton, vormals als „mOBSM“ bezeichnet
STV-1	Salzgrus-Ton-Versuch 1; Bezeichnung für den ersten Versuch zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (AP 4.1)
STV-2	Salzgrus-Ton-Versuch 2; Bezeichnung für den zweiten Versuch zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (AP 4.1)
STV-3	Salzgrus-Ton-Versuch 3; Bezeichnung für den dritten Versuch zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (AP 4.1)
STV-4	Salzgrus-Ton-Versuch 4; Bezeichnung für den vierten Versuch zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (AP 4.1)
SVV	schwere Vorverdichtung; Prozess zur Vorverdichtung eines Materials mittels schwerem Verdichtungsgerät
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:	Halbtechnische Feldversuche 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 in den Arbeitsschritten 4.0 bis 4.2 des Arbeitspakets 4 *Halbtechnische Versuche* erarbeiteten Ergebnisse. Der Bericht ergänzt die Abschnitte 4.1 und 4.2 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

D_{MA}	Verdichtungsgrad bezogen auf die Marschaldichte
$E_{V,ges}$	Gesamtverdichtungsenergie
$E_{V,spez}$	spezifische Verdichtungsenergie
k	Permeabilität
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert
m	Masse
m_{tr}	Masse des getrockneten Rückstandes
m_w	Masse des bei einer Temperatur von 105 °C (Trocknung bis Massekonstanz) verdampften Wassers
m_1	Masse der Probe an der Luft (Tauchwägung)
m_2	Masse der Probe bei der Tauchwägung
n	Porosität
n_L	luftefüllte Porosität
V	Volumen
V_{CA}	Kalkgehalt
V_{gl}	Glühverlust
V_p	Porenvolumen
V_0	Gesamtvolumen
w	Wassergehalt
w_L	Fließgrenze
w_P	Ausrollgrenze
ΔQ	Wärmeenergie
ΔT	Temperaturdifferenz
w_S	Schrumpfgrenze
ρ	Dichte
ρ_{MA}	Marshall-Dichte
$\rho_{öl}$	Dichte des Silikonöls
ρ_{St}	mittlere Stoffdichte
ρ_{tr}	Trockendichte des Materials
ρ_0	Korndichte des Materials

1 VORBEMERKUNGEN

1.1 Arbeitsschritte und beteiligte Personen

Im Teilbericht werden folgende Arbeitsschritte erläutert:

- Arbeitsschritt 4.0 Erkundungen an den Versuchsorten,
- Arbeitsschritt 4.1 Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz,
- Zum Arbeitsschritt 4.2 Kalotten aus Basaltsteinen als Zusatzelement in setzungsstabilen Schottersäulen wurden keine Arbeiten im Rahmen des AP 4 durchgeführt.

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

BGE TECHNOLOGY GmbH
(vormals DBE TECHNOLOGY GmbH)

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

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der
TU Bergakademie Freiberg

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

Institut für Anorganische Chemie der
TU Bergakademie Freiberg

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

Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG)

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

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

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

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

Dr. Katja Emmerich
Dr. Rainer Schuhmann
Franz Königler

TS Bau GmbH, Niederlassung Jena
Geschäftsbereich Bergbau

Olaf Einicke
Jürgen Schrade
Toni Schmidt

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

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

Weiterhin haben an einzelnen Maßnahmen mitgewirkt:

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

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

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

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

1.2 Vorbemerkung zu einigen bodenmechanischen Parametern

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Formel 2

n	Porosität	[%]
V_p	Porenvolumen	[m 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 luftegefüllte Porosität bezeichnet.

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

2 ERKUNDUNG AN DEN VERSUCHSORTEN (AP 4.0)

2.1 Einleitung

Die Planung der in-situ-Versuche erfolgte im AP2, zu dem kein gesonderter Teilbericht erstellt wurde. Alle relevanten Informationen sind in diesem Teilbericht aufgeführt. Die in-situ-Versuche wurden an folgenden Versuchsorten durchgeführt:

Versuchsort 1 (Staßfurt-Steinsalz) in der Grube Sondershausen:

- Zwei Muldenversuche (STV-1 und STV-2) zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (siehe Abschnitt 3.2)

Versuchsort 2 (Staßfurt-Steinsalz) in der Grube Sondershausen:

- Großbohrlochversuch 1 mit MgO-Beton C3 (siehe Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3)
- Vier Bohrlochversuche mit Bitumen und Asphalt (siehe Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5)

Versuchsort 3 im Steinbruch Marxgrün:

- Zwei Gesenkversuche (STV-3 und STV-4) zur Verdichtung von Salzgrus-Ton-Gemischen (siehe Abschnitt 3.3 und 3.4)

Versuchsort 4 (Staßfurt-Steinsalz) in der Grube Teutschenthal

- Großbohrlochversuch 2 mit MgO-Beton C3 (siehe Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3)

Versuchsort 5 in der Tongrube Wiesa:

- Drei Bohrlochversuche mit Bitumen und Asphalt im Ton (siehe Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5)

Besonderheiten des Versuchsortes 1 (Sondershausen) werden im Abschnitt 3 beschrieben. Die Charakterisierung des Steinsalzes am Versuchsort 2 (Sondershausen) ist für zwei Arbeitsschritte (im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3 und im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5) relevant. Um Wiederholungen zu vermeiden, wird der Versuchsort 2 im nachfolgenden Abschnitt 2.2 charakterisiert.

Der Steinbruch Marxgrün (Versuchsort 3) für die zwei Gesenkversuche wird nicht beschrieben, da für diese Versuche die Geologie keine Rolle spielt und nur ein standfestes Gebirge gefragt war.

Der Versuchsort 4 in der Grube Teutschenthal wird nachfolgend nur allgemein beschrieben. Details sind im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.3 dargelegt.

Zum Versuchsort 5 in der Tongrube Wiesa werden nachfolgend alle relevanten geologischen und geotechnischen Kennwerte genannt. Details zu den einzelnen Versuchen werden im Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5 erläutert.

Die Bestimmung von Materialkennwerten erfolgte i.d.R. nach der Normenreihe DIN EN ISO 17892. Bei Abweichung von der einzelnen Norm wird an der betreffenden Stelle darauf hingewiesen.

2.2 Versuchsorte in der Grube Sondershausen

Die Versuchsorte 1 und 2 befanden sich an der Strecke HU. Im Bereich der beiden Versuchsorte wurden durch die GSES im November 2013 drei Bohrungen gestoßen (siehe Abbildung 1):

VB1/13 bis 2,01 m in -498,3 m NN Teufe

VB2/13 bis 1,95 m in -498,3 m NN Teufe

VB3/13 bis 5,01 m in -498,7 m NN Teufe

VB1/13 lag gegenüber dem Versuchsort 2 und VB2/13 gegenüber dem Versuchsort 1 (siehe Abbildung 1). VB3/13 wurde schräg gestoßen und danach für die in-situ-Permeabilitätsmessung genutzt.

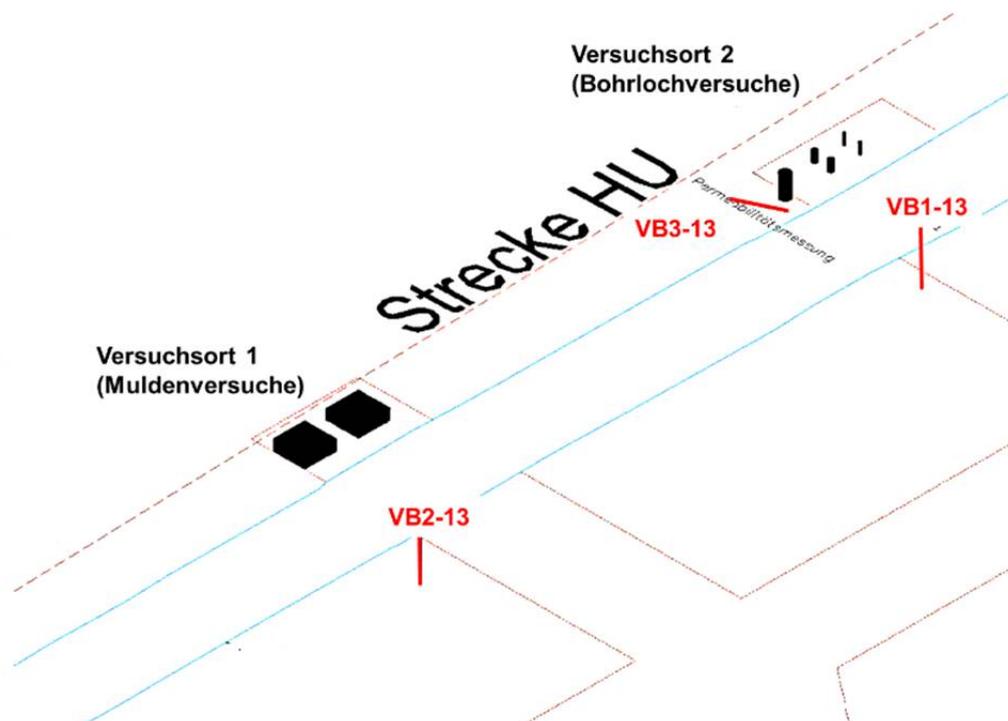


Abbildung 1: Lage der Erkundungsbohrungen VB1-13, VB2-13 und VB3-13 (rot) in Relation zu den Versuchsorten 1 und 2 (Darstellung GSES)

Aus der Ansprache der aus allen drei Bohrungen gewonnenen Kerne wurden folgende Informationen gewonnen:

- Die Bohrkernstücke werden in allen Fällen stratigraphisch Z2Na2, gamma 1 (Stäufurt-Steinsalz, Hangendsalz) zugeordnet. Das Gestein ist meist mittelkörnig, vereinzelt grobkörnig.
- In fast allen Bereichen tritt Ton als 0,5 mm – 1 mm große vereinzelte gerundete Partikel oder als Bänder oder auch vereinzelt fein verteilt auf.
- Sehr vereinzelt treten 1 - 2 mm große eckige Anhydritkörner (VB2-13 in 0,31 m Teufe, VB3-13 in 0,1 m Teufe und ab 3,55 m Teufe) oder dispers verteilter Anhydrit auf.
- Der Kornverband ist vorwiegend fest; in VB2-13 ab 1 m Teufe ist der Kornverband lose.
- Die maximale Länge durchgehend intakter Kernstücke betrug ca. 30 cm. Die beobachtete Scherung der Bohrkernstücke ("core discing") kann auch durch die technische Ausführung des Bohrens bedingt sein.

2.2.1 Phasenbestand und Wassergehalt

Mit einer aus unterschiedlichen Kernen gewonnenen zerkleinerten Teilprobe wurde durch Röntgenphasenanalyse als Hauptbestandteil Halit (NaCl) und zum kleineren Teil Anhydrit sowie als Nebenbestandteile geringe Mengen Quarz und Ton identifiziert.

Durch Trocknung von 8 Proben bis zur Massekonstanz wurde der Wassergehalt bestimmt. Die Trocknungstemperatur wurde dabei von 105°C auf 70°C bzw. 100°C herabgesetzt, um das Mineralgefüge nicht zu verändern. Der Wassergehalt ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Wassergehalt der Steinsalzproben aus den Erkundungsbohrungen

N	Probe	70°C, 21 Tage w [%]	100°C, 39 Tage w [%]
1	VB1/13 KM2 (A)	1,76	5,46
2	VB1/13 KM1 (B)	1,39	3,46
3	VB2/13 KM2 (A)	2,11	1,16
4	VB2/13 KM2 (B)	1,79	1,11
5	VB3/13 KM2 (A)	1,01	3,54
6	VB3/13 KM5 (C)	2,18	1,95
7	VB3/13 KM4 (B)	0,77	2,02
8	VB3/13 KM5 (D)	0,00	0,05
Mittelwert		± 1,57 ± 0,70	± 2,67 ± 1,61
Standardabweichung			

Die erforderliche Trocknungsdauer betrug 21 Tage bei 70 °C und 39 Tage bei 100 °C. Der ermittelte Wassergehalt und seine Streuung sind für natürliches Steinsalz typisch.

2.2.2 In-situ-Gaspermeabilität (IBEWA) am Versuchsort 2

Für den endgültigen Nachweis der Eignung der beiden Versuchsorte 1 und 2 wurde die in-situ-Permeabilität mit Gas gemessen. Für diese Messungen wurde die schräg gestoßene Erkundungsbohrung VB3/13 genutzt, die am Versuchsort 2 lag. Am Versuchsort 2 waren die in-situ-Versuche geplant, in denen eine Messung der in-situ-Permeabilität des entsprechenden Versuchsbauwerkes durchgeführt wurde. Die Lage dieser Erkundungsbohrung ist detailliert aus Abbildung 2 und Abbildung 3 ersichtlich. Der Messbereich lag im Teufenbereich der Bohrlochversuche mit Bitumen- und Asphalt-dichtelementen und im oberen Bereich des Großbohrlochversuches 1 mit MgO-Beton.

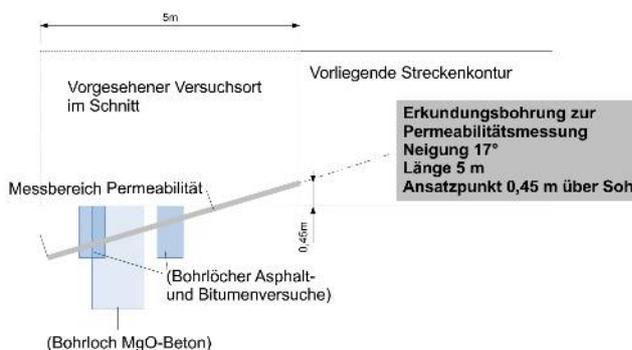


Abbildung 2: Versuchsort 2, Erkundungsbohrung VB3/13 im Schnitt

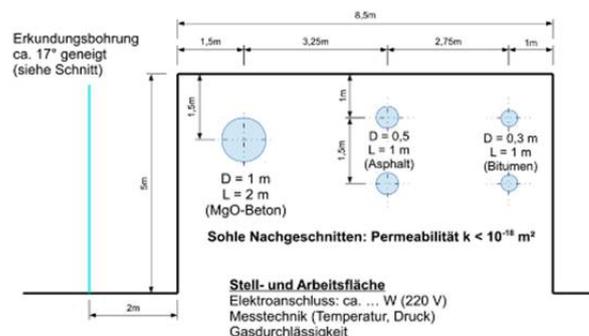


Abbildung 3: Versuchsort 2, Erkundungsbohrung VB3/13 im Grundriss

Abbildung 4 zeigt die Position der durch die Packeranordnung eingestellten Messpunkte der in-situ-Gaspermeabilitätsmessung in unterschiedlichen Bohrlochteufen.

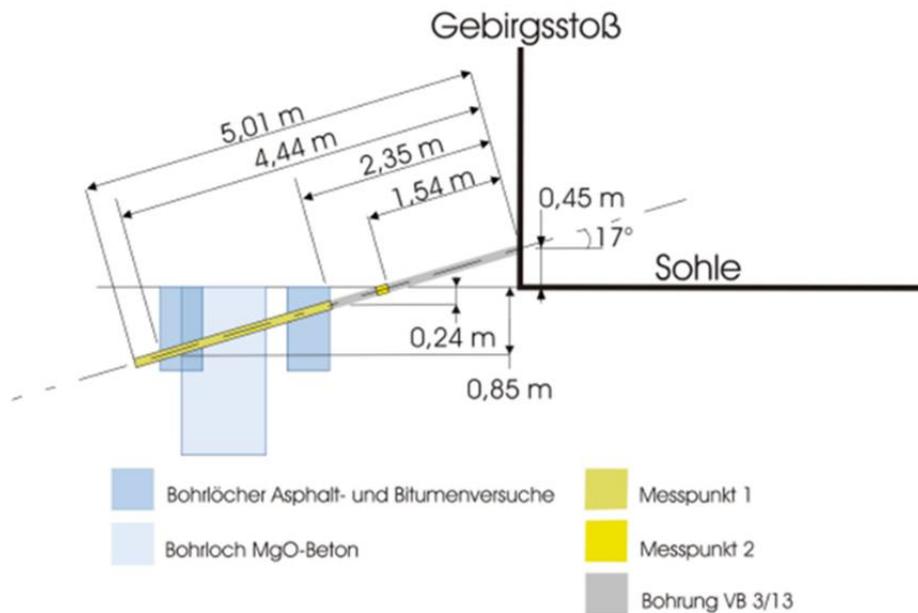


Abbildung 4: Lage der Messpunkte der Permeabilitätsbestimmung in der Erkundungsbohrung VB3/13

Tabelle 2: Messpunkte der in-situ-Permeabilitätsmessung in der Bohrung VB3-13

Bohrung	Messpunkt	Bezeichnung	Geologische Ansprache (GSES)	Messintervall		Konturabstand (künftige Sohle)	Prüfdruck	Packernummer	Bemerkungen
				OK	UK				
-	-	-	-	[m]		-	[MPa]	-	-
VB3-13	MP1	VB3-13-154-G	Staufurt-Folge (z2), Hangendsalz (Na2 gamma)	1,54	1,72	ca. < 0,05	0,5	1	Beaufschlagung Intervall Mitte
	MP2	VB3-13-235-G		2,35	5,01	ca. 0,25 bis 1,0		35	Beaufschlagung Intervall Bohrung
	MP3	VB3-13-252-G		2,52	2,70	ca. 0,3 bis 0,35		1	Beaufschlagung Intervall Mitte
	MP4	VB3-13-409-G		4,09	4,27	ca. 0,75 bis 0,8		1	Beaufschlagung Intervall Mitte

Die genaue Position der Messpunkte der in-situ-Permeabilitätsmessung zeigt Tabelle 2. Die Ergebnisse der Messungen zeigt Tabelle 3. Der in der Tabelle angegebene Konturabstand ist der Abstand des jeweiligen Messpunktes zur künftigen Sohle des Versuchsortes 2.

Aufgrund der dort eindeutig übereinstimmenden Ergebnisse (insbesondere MP2 mit 10^{-22} m^2 und MP3 mit 10^{-21} m^2) wurde auf den ursprünglich vorgesehenen Messpunkt MP4 verzichtet. Der am nächsten zur Gebirgskontur gelegene Messpunkt MP1 (direkter Abstand des Messintervalls zur Kontur 1,47 m – 1,64 m) zeigt eine Gaspermeabilität von 10^{-20} m^2 als höchsten Wert. Die tiefer im Bohrloch gemessenen Werte liegen darunter (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Ergebnisse der in-situ-Permeabilitätsmessung in der Bohrung VB3-13

Bohrung	Messpunkt	Bezeichnung	Messintervall		Konturabstand (künftige Sohle)	Prüfdruck (Absolutdruck)	Effektive Gaspermeabilität	Bemerkungen
			OK	UK				
-	-	-	[m]			[MPa]	[m ²]	-
VB3-13	MP1	VB3-13-154-G	1,54	1,72	ca. < 0,05	0,65	10^{-20}	Beaufschlagung Intervall Mitte
	MP2	VB3-13-235-G	2,35	5,01	ca. 0,25 bis 1,0	0,70	10^{-22}	Beaufschlagung Intervall Bohrung
	MP3	VB3-13-252-G	2,52	2,70	ca. 0,3 bis 0,35	0,68	10^{-21}	Beaufschlagung Intervall Mitte

Daraus folgt, dass das Steinsalz am vorliegenden Standort als hydraulisch dicht (Permeabilität $< 10^{-19} \text{ m}^2$) bewertet werden kann und dass der Versuchsort für die geplanten Untersuchungen geeignet ist. Eine direkte Bewertung der Gebirgspereabilität erfolgt durch in-situ-Permeabilitätsmessungen in den Vorbohrungen der Bitumen- und Asphaltversuche (vgl. Teilbericht zum Arbeitsschritt 4.5). Für die Muldenversuche am Versuchsort 1 spielt die Permeabilität keine Rolle.

2.3 Versuchsort in der Grube Teutschenthal

Für den zweiten Großbohrlochversuch mit dem MgO-Beton C3 musste ein weiterer Versuchsort im Steinsalz gefunden werden. Neben der Grube Sondershausen, in der im Jahre 2014 der erste Großbohrlochversuch am Versuchsort 2 durchgeführt wurde, kam als Alternative die Grube Teutschenthal in Frage.

Von der TU BAF wurde nach eingängiger Prüfung entschieden, den zweiten Großbohrlochversuch im Lehrrevier der Grube Teutschenthal durchzuführen, weil zeitgleich in der Grube Teutschenthal andere in-situ-Versuchsarbeiten stattfanden und so der Aufwand des Betriebes mehrerer Versuchsorte in unterschiedlichen Grubenbetrieben vermieden wurde.

Im Steinsalzfeld der Grube Teutschenthal steht ebenfalls Staßfurt-Steinsalz an, sodass davon ausgegangen wird, dass das Gebirge und seine Eigenschaften bei beiden Großbohrlochversuchen vergleichbar sind.

Im Jahre 2017 begannen die Planungsarbeiten und die Erkundung des Versuchsortes im Steinsalzfaltfeld. Am ausgewählten Versuchsort traten vorher nicht erwartete Feuchtestellen auf und in der eingebrachten Vorbohrung in der Sohle trat Lösung zu. Ursache war wahrscheinlich ein Lösungsreservoir aus einem Überhauen aus dem hangenden Kalilager. Die Arbeiten wurden deshalb eingestellt. Der Standort wurde verworfen und auf Permeabilitätsmessungen wurde verzichtet.

Daraufhin wurde ein neuer Versuchsort (interne GTS-Bezeichnung Versuchsort 1) vorgeschlagen, der über eine neu aufgefahrene Wetterstrecke erschlossen wurde. Dieser neue Versuchsort befindet sich im unverritzten Staßfurt-Steinsalz.

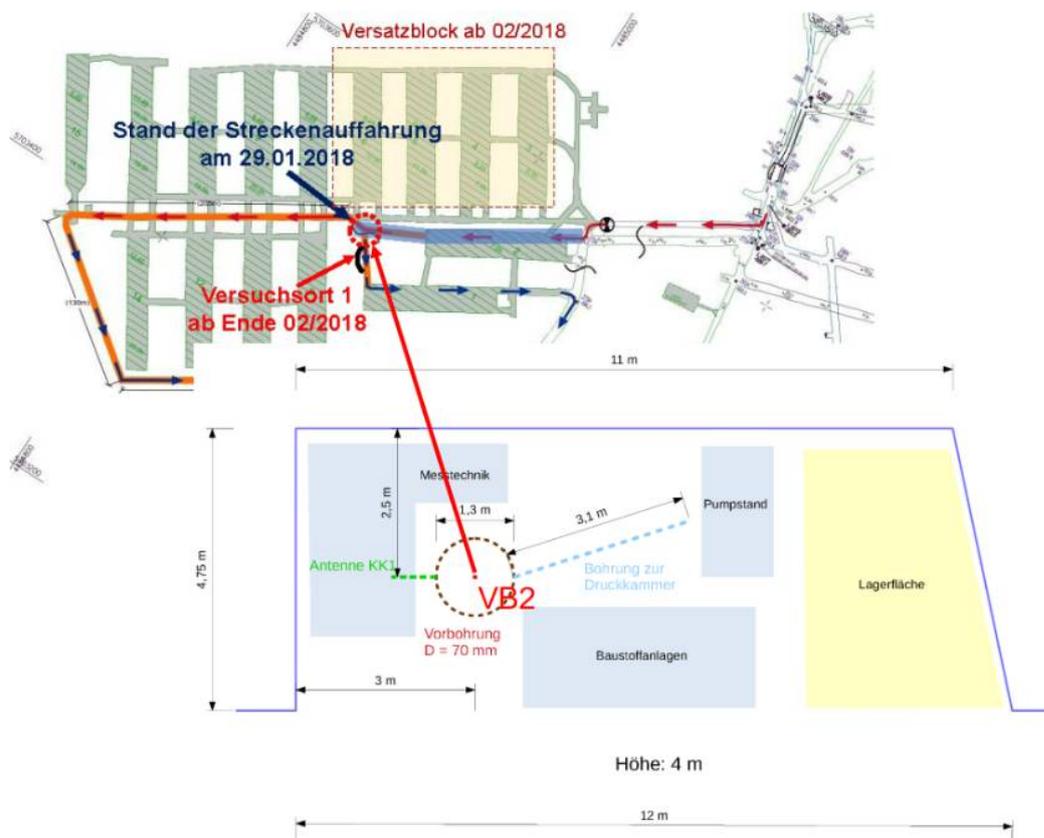


Abbildung 5: Lage des neuen Versuchsortes in der Grube Teutschenthal

Für die in-situ-Permeabilitätsmessungen am Versuchsort wurde die Bohrung VB2 mit $D = 70 \text{ mm}$ im Mittelpunkt des zukünftigen Großbohrloches gestoßen. In dieser Vorbohrung wurden drei Messungen im Zeitraum vom 22.03.2018 bis 02.04.2018 bei einem Prüfdruck von 0,3 bis 0,5 MPa durchgeführt.

Im Prüfintervall über das gesamte Bohrloch (von 0,4 m bis 3,5 m) wurde eine effektive integrale Gaspermeabilität von $\leq 10^{-22} \text{ m}^2$ gemessen (1. Messung).

Im Bereich der zukünftigen Kontrollkammer (Intervall 2,03 m bis 2,17 m) wurde eine Permeabilität von $7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ festgestellt (2. Messung). Dieses Messergebnis ist aufgrund einer unzureichenden Dichtheit des Packers nicht belastbar bzw. für die Bohrlochkontur nicht relevant.

Im Bereich der Druckkammer (von 3,16 m bis 3,5 m) wurde eine effektive Gaspermeabilität von 10^{-21} m^2 gemessen (3. Messung).

Dieser Wert (10^{-21} m^2) stimmt mit der integral gemessenen Permeabilität ($\leq 10^{-22} \text{ m}^2$) praktisch überein. Die Wahrscheinlichkeit für eine lokal höhere Permeabilität ($7 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ im Intervall 2,03 m bis 2,17 m) ist somit sehr gering.

Durch Ofentrocknung von Probenmaterial aus dem Bohrkern der Vorbohrung nach DIN EN ISO 17892-1 bei 105 °C wurde ein Wassergehalt von $w = 2,0\%$ bestimmt. Dies entspricht dem typischen Bereich des primären Flüssigkeitsgehaltes im Steinsalz.

Der Standort wies ein geringes Permeabilitätsniveau von $\ll 10^{-18} \text{ m}^2$ auf und war visuell trocken. Damit wurde er als geeignet angesehen, um den Großbohrlochversuch 2 durchzuführen.

2.4 Versuchsort Tongrube Wiesa-Thonberg

Die Lagerstätte Wiesa-Thonberg wurde als Versuchsstandort für die Bitumen- und Asphaltversuche BIT-3, ASP-3 und ASP-4 gewählt. Ein untertägiger Standort im Tonstein (u.a. im Opalinuston) stand zum damaligen Zeitpunkt nicht zur Verfügung. Der Standort ist bergmännisch als Tagebau erschlossen und für Straßenfahrzeuge zugänglich. Der Kaolintagebau wird von der Stephan Schmidt Meißen GmbH betrieben.

Die Ton- und Kaolinlagerstätte entstand durch Verwitterungsprozesse aus einem Granodioritkomplex. Im Liegenden der Lagerstätte ist der unverwitterte Granodiorit anzutreffen. Die unteren Lagerstättenbereiche sind von roter bis grauer Farbe. Die oberen Bereiche werden durch helle, überwiegend weiße, gelbweiße und hellgraue Kaoline charakterisiert. Im Hangenden des Kaolins erfolgt ein scharfer Übergang zu hellgrauen bis dunkelgrauen Tönen. Die Lagerstätte mit einer Mächtigkeit von 20 m bis 30 m wird durch geringmächtige tertiäre Braunkohlen und quartäre Sedimente überdeckt.

Die Hauptmineralbestandteile des Kaolins sind Kaolinit, Quarz, Illite und Feldspäte. Die Lagerstätte ist arm an Eisen und Titan und enthält keinerlei Pyrit [Plüschke & Rascher 1999]. Der Tonmineralanteil bewegt sich zwischen 50 % und 60 %, wovon wiederum mehr als 70 % auf Kaolinit, bis zu 25 % auf Illit und weniger als 3 % auf Smectit entfallen [Stephan Schmidt Gruppe 2017].

Die lokale Hydrologie ist aufgrund der als Tagebau aufgeschlossenen Lagerstätte stark abhängig von meteorologischen Ereignissen. Der Wassergehalt der Tone unterliegt daher entsprechenden Schwankungen und bewegt sich i.d.R. zwischen 14 % und 17 % [Wolf 2017].

Vor der Durchführung der in-situ-Versuche wurde der Standort erkundet. Dafür wurden von der Fa. Jens Geißler Baugrund- und Umwelterkundung Rammkernbohrungen bis 2 m unter Geländeoberkante gestoßen. Die Kerne wurden für weitere Untersuchungen hinsichtlich der Gesteinseigenschaften abschnittsweise beprobt und die Proben anschließend labortechnisch untersucht. Die Abbildung 6 und Abbildung 7 liefern einen Eindruck von den Explorationsarbeiten.



Abbildung 6: Erkundung mittels Rammkernbohrung



Abbildung 7: Bohrgestänge mit Kern

Optisch wurden zwei Tonfazies unterschieden. An den Standorten BIT-3 und ASP-3 überwog ein gelbbrauner, teils rötlich marmorierter Ton, während am Standort ASP-4 ein grauer Ton dominierte (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9).



Abbildung 8: grauer Ton am Standort ASP-4



Abbildung 9: gelbbrauner Ton am Standort ASP-3

Die geotechnischen Kennwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: geotechnische Kennwerte der Tonfazies

Parameter	Norm			gelbbrauner Ton	grauer Ton
Bodenart*	DIN 14 688	-	-	Si, cl (toniger Schluff)	Si, cl (toniger Schluff)
Wassergehalt	DIN EN ISO 17 892-1	w	[%]	12,1	15,5
Glühverlust	DIN 18 128	V _{gl}	[%]	5,415	5,687
Kalkgehalt	DIN 18 129	V _{CA}	[%]	0,49	0,42
Durchlässigkeit	DIN 18 130-1	k _f	[m/s]	1,6·10 ⁻¹⁰	5,0·10 ⁻¹¹
Zustandsform	DIN 18 122	-	-	halbfest	halbfest
Fließgrenze	DIN 18 122	w _L	[%]	33,4	45,5
Ausrollgrenze	DIN 18 122	w _P	[%]	16,3	17,8
Schrumpfgrenze	DIN 18 122-2	w _S	[%]	17,4	18,1

*anhand der Kornverteilung, bestimmt nach DIN EN ISO 17 892-4

Zusätzlich wurde das Liegende mit zwei Rammkernbohrungen in unmittelbarer Nähe zu den geplanten Teilversuchsstandorten bis 2 m Tiefe erkundet sowie weitere Zylinderproben zur Kennwertbestimmung aus dem anstehenden von braun zu grau übergehendem Ton entnommen.

Aus diesen Proben wurde die Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN EN ISO 17 892-7, die Wärmekapazität nach DIN 51 007 und die Wärmeleitfähigkeit nach DIN EN ISO 22 007-2 ermittelt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: thermische Parameter und Druckfestigkeit des Tons

Temperatur	Wärmekapazität (temperaturabhängig)	Wärmeleitfähigkeit* (bei 22,6°C)	Einaxiale Druckfestigkeit*
[°C]	[J/(g·K)]	[W/(m·K)]	[N/mm ²]
20,2	1,095	2,48	2,057
29,5	1,117		
39,4	1,136		
49,3	1,154		
98,8	1,258		
148,3	1,419		

*Mittelwert aus drei Einzelmessungen an drei verschiedenen Proben

3 FÜLLSÄULEN AUS VERDICHTETEM STEINSALZ (AP 4.1)

3.1 Einleitung

Für die zukünftigen Schachtverschlüsse für HAW-Endlagerstandorte im Steinsalz sind Füllsäulen aus arteigenem Material (Steinsalz) eine vorteilhafte Alternative zu Schottersäulen. Salzgrus soll beim Einbau möglichst hoch kompaktiert werden, damit eine hohe Einbaudichte (geringe Porosität) erreicht wird. Durch die mit der Zeit fortschreitende Konvergenz wird das eingebrachte Material weiter verdichtet und im Idealfall wird das Füllsäulenmaterial mit dem umgebenden Gebirge monolithisiert.

Ziel des Arbeitsschrittes 4.1 war die Erprobung des Einbaus der in den Voruntersuchungen optimierten Salzgrus-Ton-Gemische (vgl. Teilbericht zum AP3) unter halbtechnischen in-situ-Bedingungen und deren anschließende Untersuchung. Dabei wurde konventionelle Verdichtungstechnik aus dem Erdbau und die Impulsverdichtungstechnik der Fa. Terra-Mix angewendet.

Auf die Untersuchung des neu entwickelten binären Salzgrus-Ton-Gemisches (siehe AP3) im Rahmen eines halbtechnischen Versuchs wurde aufgrund der zu erwartenden aufwendigen Herstellung der erforderlichen Menge von ca. 12 t Salzbriketts verzichtet.

3.2 Konventionelle Verdichtung von Salzgrus-Ton-gemischen

Schon während der Arbeiten zur Optimierung von verschiedenen Salzgrus-Ton-Gemischen (siehe AP3.1) sollte der Einsatz konventioneller Verdichtungstechnik aus dem Erdbau erprobt werden. Zum damaligen Untersuchungsstand (Anfang 2014) standen die Rezepturen STG-1 (alte Bezeichnung *EBSM*¹) und STG-2 (alte Bezeichnung *OBSM*¹) (siehe Teilbericht zu AP3) zur Verfügung, wobei für die hier beschriebenen Untersuchungen primär die Rezeptur STG-2 (*OBSM*) verwendet wurde.

Das Salzgrus-Ton-Gemisch wurde lagenweise eingebracht und mit verschiedenen Rüttelplatten verdichtet. Aufgrund der geringen Schüttdichte der Salzgrus-Ton-Gemische von ca. 1,3 g/cm³ hat es sich als praktikabel erwiesen, nicht sofort mit der maximalen Verdichtungsenergie (größte Rüttelplatte) zu verdichten. Da im Gegensatz zur Verdichtung im MARSHALL-Gerät die Verdichtungsenergie nur lokal eingetragen wird, besteht für das zu verdichtende Material die Möglichkeit, seitlich auszuweichen. Um dies zu vermeiden, wurde mit kleineren Rüttelplatten vorverdichtet, damit die Steifigkeit und der Reibungswinkel im Salzgrus-Ton-Gemisch gegenüber einer unverdichteten Schüttung erhöht wird. Anschließend wurde mit Rüttelplatten mit höherem Betriebsgewicht verdichtet.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden verschiedene konventionelle Verdichtungsgeräte erprobt und deren Einsatz optimiert. Für die Untersuchungen standen 3 verschiedene Vibrationsplatten und eine Grabenwalze zur Verfügung. Die Betriebsparameter dieser Geräte sind in Tabelle 6 angegeben.

¹ EBSM (empirische Mischung) mit 14,6 % Tonmehl
OBSM (optimierte Mischung) mit 7,8 % Tonmehl

Tabelle 6: Betriebsparameter der eingesetzten Verdichtungsgeräte

Bezeichnung	Typ	Betriebsgewicht	Frequenz	Zentrifugalkraft
RP1	Wacker Neuson DPU 2550H	166 kg	90 Hz	25 kN
RP2	Wacker Neuson DPU 6055	455 kg	69 Hz	60 kN
RP3	Bomag BPR 100/80 D	720 kg	56 Hz	100 kN
GW	Universalwalze Wacker Neuson RT 82-SC	1450 kg	42 Hz	34,2 / 68,4 kN min. / max.

Neben den verschiedenen Betriebsgewichten und den verschiedenen Zentrifugalkräften der Erregersysteme spielt auch die Geometrie der Aufstandsfläche (gleich Verdichtungsfläche) eine wichtige Rolle. Während die Vibrationsplatten ihre Verdichtungsenergie auf ihre große rechteckige Aufstandsfläche verteilen, wird bei der Grabenwalze die Verdichtungsenergie eher über die linienförmige Aufstandsfläche der zylinderförmigen Walzen in den Untergrund eingetragen. Des Weiteren waren die Walzen der Grabenwalze mit Schafffußbandagen versehen, welche eine knetende Wirkung auf das Verdichtungsgut haben und besonders bei bindigen Materialien von Vorteil sind.

3.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Die Untersuchungen fanden am Versuchsort 1 (siehe Abschnitt 2.2) im Bergwerk Sondershausen der GSES mbH in einer Versuchsnische statt. Diese wurde durch schonendes untermaßiges Sprengen aufgefahren. Die Sohle wurde mittels einer Teilschnittmaschine nachgeschnitten.

Im hinteren Teil der Versuchsnische wurden durch die TS-Bau 2 Mulden mit einer Tiefe von jeweils ca. 0,6 m mittels Teilschnittmaschine aufgefahren. Die Abmessung der Mulde 1 für den STV-1 betrug 3,0 m x 2,2 m und die Abmessung der Mulde 2 für den STV-2 betrug 4,0 m x 2,2 m (Abbildung 10 und Abbildung 11).

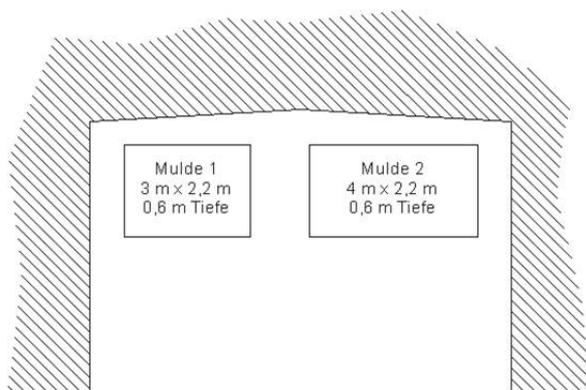


Abbildung 10: Lage der Mulden in der Versuchsnische am Versuchsort 1



Abbildung 11: Versuchsnische am Versuchsort 1

Durch händische Spitzarbeiten wurden die Konturen der Mulden nachgearbeitet, sodass maßhaltige Muldenkonturen (± 2 cm) mit einer Oberflächenrauigkeit in der Größenordnung von 1 cm erstellt werden konnten (Abbildung 12).

Die Konturen der Mulden wurden mittels eines Laserscanners LMS Z390 der Firma Riegels dreidimensional erfasst. Das Ziel der 3D-Scans war es, die Konturen beider Mulden so exakt wie möglich zu erfassen, um für die laufenden Einbauversuche die Volumenberechnung der

eingebauten Einzelschichten zu erleichtern. Dazu wurden die 3D-Daten dahingehend ausgewertet, dass das Volumen der Mulden in Abhängigkeit zu einer jeweiligen Referenzhöhe bekannt war.

Die Referenzhöhen waren durch feste Höhenbolzen in den Stößen neben der Mulde bestimmt. Die Höhenbolzen dienten jeweils als feste Referenz für das Nivellement, welches während des Einbaus der einzelnen Lagen aus dem Salzgrus-Ton-Gemisch fortwährend durchgeführt wurde.



Abbildung 12: Oberflächenstruktur der Muldensohle

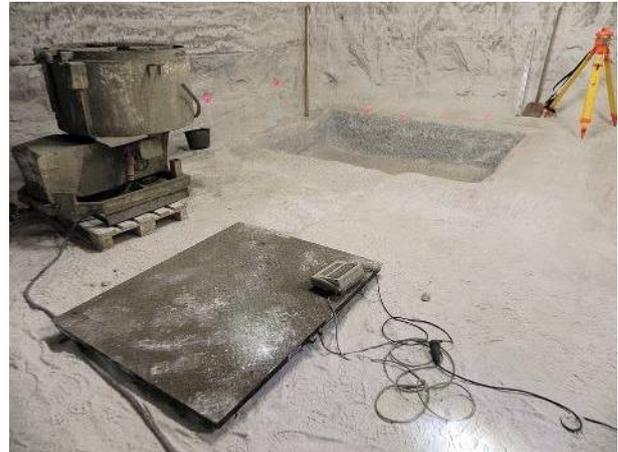


Abbildung 13: Aufgebaute Mischtechnik neben der Versuchsmulde 1

Die Nivellements (an 30 Punkten in Mulde 1 und an 32 Punkten in Mulde 2) wurden jeweils nach den verschiedenen Übergängen mit den verschiedenen Verdichtungsgeräten durchgeführt. Aus der Nivellementhöhe wurde das eingebaute Salzgrus-Ton-Gemisch-Volumen berechnet. Aus dem Volumen und eingewogenen Masse wurde die Dichte berechnet. In der Abbildung 13 ist die Situation an den Versuchsmulden dargestellt. Das Salzgrus-Ton-Gemisch wurde in Chargen von ca. 340 kg vor Ort gemischt und die gewogenen Massen in den Versuchsmulden verstürzt. Durch den nicht unerheblichen Zeitaufwand beim Mischen von Salzgrus und Ton konnte pro Tag jeweils nur eine Lage gemischt, eingebaut, verdichtet und vermessen werden.

In den Mulden wurden unterschiedliche Lagen mit den Rezepturen STG-2 (siehe Tabelle 7 und Abbildung 14) und STG-1 (siehe Tabelle 8 und Abbildung 15) eingebaut.

Tabelle 7: Lagenaufbau des STV-1

Lage	Einbauhöhe / Rezeptur
M1L5	17,0 cm / STG-2
M1L4	9,7 cm / STG-2
M1L3	10,2 cm / STG-2
M1L2	10,5 cm / STG-2
M1L1	8,4 cm / STG-2

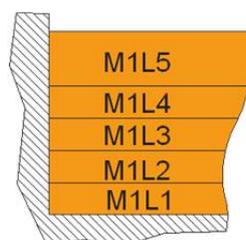


Abbildung 14: Lagenaufbau des STV-1

Tabelle 8: Lagenaufbau des STV-2

Lage	Einbauhöhe / Rezeptur
M2L6	10,5 cm / STG-1
M2L5	10,5 cm / STG-1
M2L4	11,0 cm / STG-2
M2L3	11,0 cm / STG-2
M2L2	10,9 cm / STG-2
M2L1	11,2 cm / STG-2

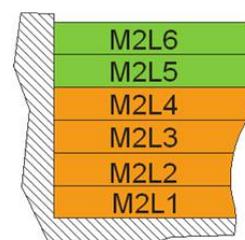


Abbildung 15: Lagenaufbau des STV-2

Das verstärzte Salzgrus-Ton-Gemisch wurde, wie in Abbildung 16 gezeigt, händisch mittels Richtscheits verteilt.



Abbildung 16: Abziehen der Lagenoberfläche nach dem händischen Einbau (M1L1)



Abbildung 17: Vorverdichtung einer Lage mit der leichten Rüttelplatte RP1 (M1L1)

Grundsätzlich sollten in der Versuchsmulde 1 die Vibrationsplatten (siehe Abbildung 17) und in der Versuchsmulde 2 die Grabenwalze angewendet werden.

Um die Wirkung der Verdichtungsgeräte zu untersuchen, wurde der Verdichtungsablauf mehrfach angepasst und dabei das Verdichtungsergebnis bewertet. Die Abfolge und die Auswahl der Geräte erfolgten in erster Linie subjektiv, da die Nivellementdaten nicht begleitend ausgewertet werden konnten.

Anhand des Verhaltens der Verdichtungsgeräte und des Einbaumaterials kann jedoch relativ einfach das Verdichtungsergebnis bewertet werden. Gerade im Bereich der maximalen Verdichtung ist meistens ein "Aufspringen" der vibrierenden Verdichtungsgeräte deutlich zu beobachten, wobei ein Aufbrechen der Materialoberfläche ein sicheres Indiz für eine Überverdichtung ist. In der Tabelle 9 und in der

Tabelle 10 sind die durchgeführten Verdichtungsabläufe dokumentiert.

Tabelle 9: Verdichtungsabläufe in der Versuchsmulde 1

Lage	Geräte	Überfahrten	Bemerkungen
1	RP1	1,5	schleifenartig
	RP2	1	schleifenartig
	RP3	1	schleifenartig
2	RP1	1,5	schleifenartig
	RP2	2,5 auf Fläche, 3 je Rand	schleifenartig
	RP3	2 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig
3	RP1	1	spiralförmig Richtung Flächenmitte
	RP2	2 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig
	RP3	2 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig
4	RP1	3	spiralförmig, Zwischennivellement
	RP2	1 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig
	RP3	1 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig
5	RP1	1	spiralförmig
	RP3	2 auf Fläche, 2 je Rand	schleifenartig

Tabelle 10: Verdichtungsabläufe in der Versuchsmulde 2

Lage	Geräte	Überfahrten	Bemerkungen
1	RP1	1	spiralförmig
	GW ohne Vibration	2	umheben um Achsbreite
	GW ½ Amplitude	2	umheben um Achsbreite
	GW max Amplitude	2	umheben um halbe
	GW ½ Amplitude	2	Bandagenbreite
	RP1 RP3	1 je Rand 2 in Fläche 2 je Rand	schleifenartig
2 Mulde längs halbiert	Hälfte 1: GW ohne Vibration	1	umheben, Bahn überlappend,
	GW ½ Amplitude	1	Zwischennivellement
	Hälfte 2: RP1	1 auf Fläche, 2 je Rand	spiralförmig, Ränder der Hälfte 1
	GW ½ Amplitude GW max Amplitude	2 2	umheben, Bahn überlappend, max. Amplitude Abbruch nach einer Bahn, Rest mit ½ Amplitude
Mulde komplett	RP3 ½ Amplitude RP3 max. Amplitude RP3 ½ Amplitude	1 auf Fläche 1 auf Fläche 1 auf Fläche	schleifenartig
3 Mulde längs halbiert	Hälfte 1: GW ohne Vibration	1	umheben, Bahn überlappend
	GW ½ Amplitude	3	
	Hälfte 2: RP1	1	spiralförmig
Mulde komplett	RP3 ½ Amplitude RP3 max. Amplitude	2 auf Fläche, 2 je Rand 5 auf Fläche, 2 je Rand	umheben, ½ und max. Amplitude abwechselnd, 2 Überfahrten schleifenartig
4	Vorverdichtung: RP3 RP2	1 auf Fläche, 2 je Rand 1 auf Fläche, 2 je Rand	Bomag Abbruch nach einer Bahn wegen Materialaufschiebung
	Hauptverdichtung: RP3 ½ Amplitude RP3 max. Amplitude	2 3-4 auf Fläche, 4 je Rand	½ und max. Amplitude abwechselnd, Überfahrten schleifenartig und mit umheben, Zwischennivellement
5	RP1	1	spiralförmig
	RP3 ½ Amplitude RP3 max. Amplitude	1 11 auf Fläche, 8 je Rand	schleifenartig, Bahnüberlappung, Zwischennivellement
6	GW ohne Vibration	2	umheben, Bahnüberlappung,
	GW ½ Amplitude GW	2	Abbruch
	max Amplitude Vorverdichterplatte	2 4 je Rand	Universalgrabenwalze wegen Oberflächenschäden
	RP3 ½ Amplitude RP3 max. Amplitude	2 auf Fläche, 2 je Rand 6 auf Fläche, 4 je Rand	schleifenartig, Zwischennivellement, Verdichtung bis beginnende Oberflächenausbrüche

Das eingebaute Material wurde meistens mit der leichtesten Vibrationsplatte RP1 vorverdichtet (Abbildung 17). Eine Vorverdichtung des frisch eingebauten Materials ist angebracht, um sie für schwere Vibrationsplatten befahrbar zu machen. In einem Testlauf in der Lage 4 der Mulde 2 stellte sich heraus, dass die mittelschwere Vibrationsplatte RP2 problemlos für die Vorverdichtung einsetzbar ist. Ein Testlauf mit der schweren Vibrationsplatte RP3 auf unverdichtetem Salzgrus-Ton-Gemisch wurde nach einer Bahn abgebrochen, da die Platte eingesunken ist und es zu Materialaufschiebungen kam.

Aufgrund der begrenzten Muldenfläche und der Größe der eingesetzten Verdichtungsgeräte kam es besonders an den kürzeren Muldenrändern zu Problemen. Diese Bereiche ließen sich schlechter mit den Verdichtungsgeräten erreichen und damit schlechter verdichten. Durch eine gezielte Fahrweise ließ sich dieses Problem beim Einsatz der Vibrationsplatten verringern. In der Mulde 2 wurde dabei zusätzlich zum Einsatz der Universalgrabenwalze die leichte Vibrationsplatte RP1 bzw. die schwere Vibrationsplatte RP3 eingesetzt, um die Randbereiche zu verdichten. Die Ecken beider Mulden ließen sich dagegen nicht gezielt nachverdichten. Das Material lag in diesem Bereich auf einer Fläche von ca. 15 cm x 15 cm dementsprechend weitgehend unverdichtet vor. Beim Einsatz der Vibrationsplatten sammelte sich am Ende der Verdichtung in Richtung der Randbereiche der kurzseitigen Muldenränder loses Material an (Abbildung 18). Dieses Material wurde vor Beginn des nächsten Verdichtungsdurchgangs mit der Schaufel auf der Muldenoberfläche verteilt.



Abbildung 18: Materialaufschiebungen im Randbereich bei der Rezeptur OBSM (M1L1)



Abbildung 19: Oberflächenschäden infolge Überverdichtung durch RP3 (M1L4)

Das Salzgrus-Ton-Gemisch STG-2 ließ sich, unabhängig von der Rezeptur, innerhalb weniger Überfahrten schnell verdichten. Beim Einsatz der Vibrationsplatten zeigte sich dieser Umstand sehr schnell am Einsetzen der "Überverdichtung". Ab diesem Zeitpunkt fingen die Vibrationsplatten an, unruhig zu laufen und bei andauernder Verdichtung aufzuspringen. Diese Anzeichen der Überverdichtung dienten normalerweise als Abbruchkriterium für die Verdichtung. Dieser Zeitpunkt setzte typischerweise nach ein bis zwei Überfahrten der großen Vibrationsplatten RP2 oder RP3 ein. Es wurde entschieden, dieses Abbruchkriterium zu übergehen, da das verwendete Material bindige Eigenschaften aufweist. Die Verdichtung wurde abgebrochen, als die Oberfläche durch weitere Verdichtung aufgebrochen / zerstört wurde (Abbruchkriterium; siehe Abbildung 19).

Beim Einsatz der Vibrationsplatten entwickelte sich Staub während der Verdichtung (siehe Abbildung 20), da aus der Oberfläche Feinbestandteile „ausgeschlagen“ wurden. Bei fortschreitender Verdichtung kam es dann zusätzlich zum Ausschlagen größerer Bestandteile zur stellenweisen Zertrümmerung der Oberfläche. Das Material der Rezeptur STG-2 neigte in dem

Zusammenhang eher zu Oberflächenschäden als dass Material der Rezeptur STG-1. Diese Zerstörungsprozesse ließen sich minimieren, indem die letzten Verdichtungsdurchgänge mit der schweren Vibrationsplatte RP3 nicht mehr mit voller Vibrationsleistung durchgeführt wurden, sondern nur noch mit halber Amplitude.



Abbildung 20: Staubentwicklung bei der Verdichtung mit der schwersten Rüttelplatte RP3 (M1L1)



Abbildung 21: Oberflächenstruktur nach der Verdichtung mit der Grabenwalze (M2L6)

Beim Einsatz der Universalgrabenwalze GW entwickelte sich kein Staub und die Walze sprang auch nicht auf (Abbildung 21). Aufgrund der großen Masse neigte sie zum Aufschieben des Materials. Vor allem an den Start- und Endpunkten der Verdichtungsbahnen bildete sich immer wieder eine Hügelstruktur aus, die sich nicht mehr einebnen ließ. Diese entstand hauptsächlich während der Vibration im Stehen. Die Vibration kurz nach dem Fahrtbeginn einzuschalten, ließ sich nicht verlässlich umsetzen. Das größte Problem beim Einsatz der Universalgrabenwalze mit maximaler Vibration war die Oberflächenzerstörung. Bei maximaler Vibration kam es zum schollenartigen Ablösen großer Oberflächenbereiche vor den Walzen, die in Fahrtrichtung weiter verschoben wurden. Beim Einsatz der Vibration mit halber Amplitude lösten sich keine Schollen an der Oberfläche. Zusätzlich kam es beim Verfahren der Universalgrabenwalze während der Verdichtung zum Wegdriften von der geplanten Bahn; dabei wurde zum Teil ebenfalls Material weggeschoben.

Das hergestellte Mischgut wurde umfangreich beprobt. Die Proben wurden während des Leerens des Zwangsmischers gewonnen. Anhand der Proben wurden später im Labor der Wassergehalt und die Verdichtbarkeit im MARSHALL-Gerät untersucht.

Im Anschluss an den Lageneinbau in beiden Versuchsmulden wurden zusammen 10 Kernbohrungen durch alle eingebauten Lagen in den Versuchsmulden gestoßen. Anhand der gewonnenen Bohrkern wurde die Dichte jeder einzelnen Lage im Labor bestimmt.

3.2.2 Auswertung und Ergebnisse

An den im Labor untersuchten Proben des in situ hergestellten Mischgutes wurde der Wassergehalt und die Porosität nach der Verdichtung im MARSHALL-Gerät bestimmt. Dabei zeigte sich, dass in den Proben des STG-2 ein zu geringer Wassergehalt von durchschnittlich 2,93 vorlag. Optimal ist ein Wassergehalt von 3,40 für das STG-2. Letztendlich war der eingesetzte Zwangsmischer nicht geeignet, um ein homogenes Mischgut herzustellen (vgl. Teilbericht zum AP 3, Abschnitt 2.2.8). Der geringere Wassergehalt führt zu einem etwas schlechteren Verdichtungsergebnis bei der Verdichtung im MARSHALL-Gerät. Im Mittel wurde nach der Verdichtung im MARSHALL-Gerät eine Porosität von 8,5 % nachgewiesen. Insgesamt ist dieser Wert trotzdem noch mit der Laborreferenz von 7,7 % (siehe AP 3.1) vergleichbar.

Die einzelnen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 11 angegeben.

Tabelle 11: Im Labor bestimmter Wassergehalt und Porosität der in den Muldenversuchen eingesetzten Rezeptur STG-2

Probe	Wassergehalt [%]	Porosität [%]
STG-2-05.05.-L2M2-SK2	2,67	8,81
STG-2-05.05.-L2M3-SK3	2,92	8,37
STG-2-06.05.-L3M1-SK4	2,92	8,53
STG-2-06.05.-L3M2-SK1	3,53	8,07
STG-2-06.05.-L3M2-SK2	2,82	8,28
STG-2-06.05.-L3M2-SK3	2,82	8,43
STG-2-06.05.-L3M2-SK4	2,66	9,08
STG-2-06.05.-L3M3-SK4	3,10	8,28

In Abbildung 22 zeigt sich der Einfluss des Wassergehalts auf die Porosität. Nähert sich der Wassergehalt dem Optimum von 3,4%, nähert sich auch die Porosität einem Minimum an.

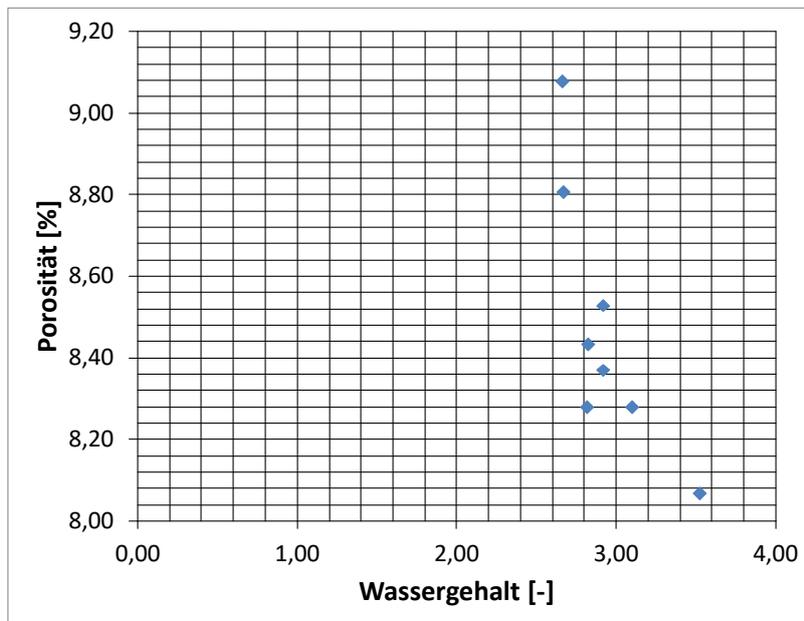


Abbildung 22: Abhängigkeit der Porosität vom Wassergehalt

Im Ergebnis der untersuchten Proben konnte dem Mischgut, trotz der beschriebenen Abweichungen, eine Vergleichbarkeit mit dem Labormaterial unterstellt werden. In der Tabelle 12 und Tabelle 13 ist die integrale Porosität, welche in den Mulden auf Basis der Masse-Volumenbilanzen bestimmt wurde, der an den Bohrkernen bestimmten mittleren Porosität gegenübergestellt.

Generell wurde in der Mulde 1 eine um ca. 10 % höhere Porosität durch die integrale Bilanz, als bei der durch Tauchwägung an den Bohrkernen gemessene Porosität erzielt. Im Fall der Mulde 2 liegt die Porosität aus der integralen Bilanzierung sogar um 20 % höher. Die Ursache liegt in den angewendeten Verdichtungsgeräten. Mit der sperrigen Grabenwalze war es in der Mulde 2 bedeutend schlechter möglich die Ecken der Mulden zu erreichen, während die rechteckigen Vibrationsplatten die Ecken in der Mulde 1 besser erreichten.

Die Bohrkernkerne waren damit eher für die mittigen Bereiche der Mulden repräsentativ, während die integrale Bilanzierung in ihrem Ergebnis stark von den Verdichtungsergebnissen in den schlecht zu verdichtenden Muldenecken beeinflusst war.

Des Weiteren ist die aus den Bilanzierungen berechnete Porosität nur für die jeweilige Lage repräsentativ, während die an den Bohrkernen bestimmte Porosität für den gesamten Lagenaufbau repräsentativ ist, da die jeweils unteren Lagen durch die Verdichtung der darüber liegenden Lagen nachverdichtet wurden.

In den ersten beiden Lagen der Mulde 1 wurde eine deutlich geringere Porosität festgestellt. Die Ursache liegt in dem Einfluss der steifen Muldensohle. Dadurch wurde bei der Vibrationsverdichtung eine deutlich bessere Verdichtung erreicht. In der Mulde 2 konnte beim Einsatz der Grabenwalze dieser Effekt nicht beobachtet werden.

Tabelle 12: In der Versuchsmulde 1 bestimmte Porosität

Lage	Integrale Bestimmung	Tauchwägung an Bohrkernen
M1L1	8,6 %	11,7 %
M1L2	14,4 %	15,4 %
M1L3	23,2 %	17,9 %
M1L4	23,6 %	17,3 %
M1L5	20,4 %	19,5 %

Tabelle 13: In der Versuchsmulde 2 bestimmte Porosität

Lage	Integrale Bestimmung	Tauchwägung an Bohrkernen
M2L1	19,3 %	15,1 %
M2L2	21,7 %	15,0 %
M2L3	17,4 %	15,7 %
M2L4	21,6 %	18,1 %
M2L5	15,8 %	13,6 %
M2L6	15,8 %	15,6 %

Im Sinne einer Erprobung der eingesetzten Verdichtungsgeräte haben sich die durchgeführten Muldenversuche bewährt. Lediglich die eckige Geometrie war aus praktischer Sicht eher nachteilig. Ein direkter Einfluss der durchgeführten Verdichtungsabläufe war aus den in den Lagen gemessenen Porosität nicht ableitbar.

Beim STG-2 wurde typischerweise eine Porosität zwischen 17 % und 18 % erreicht, wobei dies einen lagenweisen Einbau mit Lagenstärken von ca. 10 cm bedingt. Dadurch wurden durch die Tiefenwirkung der Verdichtungsgeräte die einzelnen Lagen mehrfach nachverdichtet.

Das STG-1 wurde nur in den oberen 2 Lagen der Mulde 2 erprobt, wobei eine typische Porosität von ca. 14 % erreicht wurde. Da bei diesen beiden obersten Lagen der Einfluss einer Nachverdichtung kaum auftreten konnte, ist die angegebene Porosität als tendenziell größer zu betrachten.

Für die weitere Auswertung wurde die subjektive Erfahrung der Bedienmannschaft vor Ort herangezogen. Daraus wurde abgeleitet, dass für eine Vorverdichtung des locker eingebauten Salzgrus-Ton-Gemisches eine leichte Rüttelplatte mit unter 200 kg Betriebsgewicht optimal ist. Mit einem spiralförmigen Überfahren der Verdichtungsfläche wird bereits nach 2 Überfahrten ein optimales Verdichtungsergebnis für die leichte Vorverdichtung erreicht.

Danach sollte in einem weiteren Verdichtungsübergang mit einer schweren Vibrationsplatte mit mindestens 600 kg und einer regelbaren Amplitude nachverdichtet werden. Auch dabei reichen 2 spiralförmige Überfahrten aus, um ein optimales Verdichtungsergebnis zu erhalten. Bei der ersten Überfahrt sollte die Amplitude auf ein Mindestmaß abgeregelt werden und erst bei der 2. Überfahrt kann die Amplitude auf das Maximalmaß erhöht werden.

Eine Porosität von unter 10 % kann mit den neu entwickelten Salzgrus-Ton-Gemischen mit konventioneller Verdichtungstechnik aus dem Straßenbau sehr wahrscheinlich nicht erreicht werden.

3.3 Erster Feldversuch zur Impulsverdichtung (STV-3)

Die Muldenversuche zeigten, dass die konventionelle Verdichtungstechnik aus dem Straßenbau eher für eine Vorverdichtung geeignet ist. Daher wurde der Einsatz der Impulsverdichtung erprobt. Da die Impulsverdichtung hinsichtlich der Art der Verdichtung prinzipiell mit der im Labor angewendeten Verdichtung mit dem MARSHALL-Gerät vergleichbar ist, erschien die Impulsverdichtung erfolgshöflich für die nachfolgend genannten Zielstellungen.

Bei der Impulsverdichtung wird eine schwere Fallmasse aus einer bestimmten Höhe auf das zu verdichtende Material fallen gelassen und leitet so einen Kraftimpuls in den Untergrund ein. Im STV-3 betrug die Masse des Fallgewichts 9 t und die Fallhöhe bis zu 1,2 m. Die Fallmasse schlägt auf einen Schlagfuß / Schlagplatte mit etwa 1,2 m Durchmesser auf. Der Durchmesser der Aufschlagplatte ist anpassbar. Mit einem Impulsverdichter (siehe Abbildung 44) kann eine sehr hohe Schlagenergie eingebracht werden. Mit Impulsverdichtern wird im Bauwesen grobkörniges Material in weichen Untergrund eingeschlagen und damit Säulen zur Bodenverbesserung hergestellt.

3.3.1 Versuchsziele

Durch die Anwendung der Impulsverdichtung im halbtechnischen Maßstab wurde untersucht, ob die Verdichtungsergebnisse aus dem Labor (siehe AP 3.1) auch in situ erreichbar sind. Im Labor wurden Proben nach den Referenzrezepturen angemischt und mit max. 15,2 MJ/m³ in einem MARSHALL-Gerät verdichtet. Dabei wurden die in Tabelle 14 angegebenen Porosität erreicht.

Tabelle 14: Referenzwerte der Porosität der im Labor verdichteten Gemische

Gemisch	Referenz (unter Laborbedingungen erreichte gemittelte Porosität)
STM-1 (EBSM)	10,58 % ± 0,17 %
STM-2 (OBSM)	7,49 % ± 0,36 %
STM-3 (mOBSM)	9,36 % ± 0,16 %

Die Referenzwerte dienen zur Bewertung des Verdichtungserfolgs in situ.

3.3.2 Vorversuch

Bereits im Sommer 2013 wurde in Wettmannstätten (Steiermark, Österreich) in Zusammenarbeit mit der Firma *Terra-Mix* ein Vorversuch zur Erprobung der Impulsverdichtung durchgeführt. Dabei wurde ein Salzgrus-Ton-Gemisch auf Basis der Rezeptur STG-1 in einem Stahlbehälter mit einem Durchmesser von 1,0 m und einer Höhe von 1,34 m eingebaut (Abbildung 23).



Abbildung 23: Im Vorversuch verwendeter Stahlbehälter mit dem Impulsverdichter



Abbildung 24: Havarie des Stahlbehälters durch Versagen der Verschraubung (M20 8.8)

Der Impulsverdichter war mit einem Verdichterfuß mit 0,8 m Durchmesser ausgerüstet, welcher direkt auf das gebaute Material aufgesetzt wurde. Das Material wurde vorher lagenweise in 26 Schichten von ca. 50 kg mit einem Kantholz eingestampft, sodass die Dichte nach dem Einbau ca. $1,45 \text{ g/cm}^3$ betrug. Die Probe (Salzgrus-Ton-Gemisch) hatte nach dem Einbau eine Höhe von ca. 1,18 m.

Ursprünglich waren 200 Schläge mit dem 9000 kg schweren Fallgewicht aus 1,2 m Fallhöhe auf das eingebaute Material geplant. Die Schichthöhe des Gemisches wurde während der Verdichtung durch Ausmessen nach jeweils 10 Schlägen an vier um 90° versetzten Messpunkten ermittelt. Nach 20 Schlägen wurde der Verdichtungsfuß aus dem Versuchszylinder genommen und das am Rand aufgelockerte Material in die Mitte gezogen und weiter verdichtet. Nach 40 Schlägen musste der Versuch beendet werden. Hohe Querkräfte und die Querdehnung des Gemisches trieben den Versuchszylinder auseinander. Die Schrauben in den Verbindungsplatten (Abbildung 24) sind dabei teilweise abgeschert. Insgesamt wurde eine spezifische Verdichtungsenergie von ca. $4,8 \text{ MJ/m}^3$ bis zur Havarie des Stahlbehälters eingebracht.

Trotz der Havarie konnte ein intakter Probekörper (ca. 0,8 m hoch) mit ca. 1 t Gewicht gewonnen und an die TU BAF transportiert werden (siehe Abbildung 25).

Die Masse des Probekörpers wurde gewogen und die Abmessungen bestimmt. Daraus wurde eine Trockendichte der Probe von $1,94 \text{ g/cm}^3$ berechnet. Mit einer mittleren Korndichte von $2,23 \text{ g/cm}^3$ wurde eine Porosität von 13,3 % ermittelt. Zum Vergleich: im Labor wurde am STG-1 bei einer spezifischen Verdichtungsenergie von $4,8 \text{ MJ/m}^3$ eine Porosität von ca. 11 % ermittelt.

Um die Dichteverteilung im Innern der gewonnenen Probe zu beurteilen, wurden 2 luftgespülte Kernbohrungen über den gesamten Querschnitt der Probe senkrecht zur Verdichtungsrichtung gestoßen (Abbildung 26).



Abbildung 25: Im Vorversuch gewonnene Probe mit den Ansatzpunkten der Kernbohrungen



Abbildung 26: Luftgespülte Kernbohrung in der gewonnenen Probe (Bohrung 2)

Die Bohrung 1 setzte 63 cm unterhalb der Oberkante der Probe an, während die Bohrung 2 ca. 24 cm unterhalb der Oberkante angesetzt wurde.

Die durch die Bohrungen gewonnenen Kerne (Abbildung 27) wurden in 9 Abschnitte aufgeteilt und daran die Trockendichte bestimmt und anschließend die Porosität berechnet.



Abbildung 27: Kerngewinn der Bohrung 2

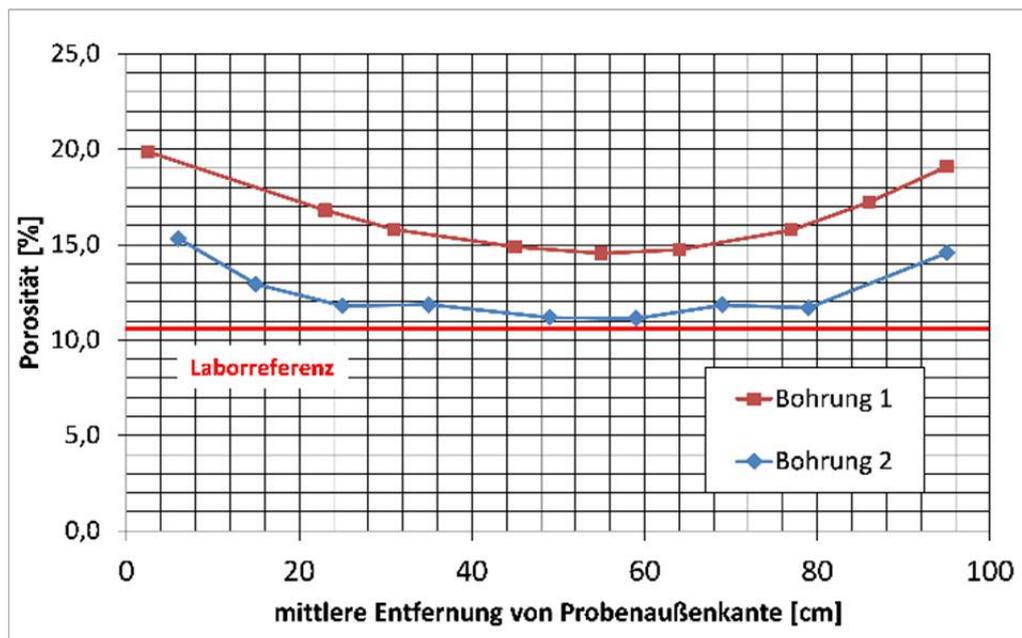


Abbildung 28: Porosität in Abhängigkeit von der Lage im Querschnitt der Probe

In der Abbildung 28 ist die berechnete Porosität in Abhängigkeit von der Lage im Querschnitt der Probe dargestellt. Es zeigte sich, dass entlang der Bohrkern e eine symmetrische Porositätsverteilung vorlag, wobei im Minimum sogar fast die Porosität der Laborreferenz erreicht wurde. Generell wurde bei beiden Bohrkernen an den Rändern eine höhere Porosität als in der Mitte der Bohrkern e festgestellt (Tabelle 15). Dies ist aufgrund der Art der Verdichtung in einem Rohr mit einem Ringraum zwischen der Innenfläche des Rohrs und der Außenkante des Verdichtungsfuß auch plausibel.

Tabelle 15: Mittlere Porosität der der Bohrkern e 1 und 2

Bohrung	Ansatzpunkt	Porosität am Rand	Porosität in der Mitte	mittlere Porosität
1	63 cm unter OK	19,5 %	14,5 %	16,5 %
2	24 cm unter OK	14,9 %	11,2 %	12,5 %

Des Weiteren wurde in der Bohrung 2, welche 24 cm unterhalb der ehemaligen Verdichtungsfläche an der Oberkante (OK) lag, eine mittlere Porosität von 12,5 % berechnet. Im Gegensatz dazu, wurde an der Bohrung 1, welche 63 cm unterhalb der ehemaligen Verdichtungsfläche an der Oberkante (OK) lag, eine mittlere Porosität von 16,5 % berechnet.

An zwei Proben, aus der Mitte und vom Rand der Bohrung 2, wurde durch das Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau die Permeabilität mit Gas bestimmt. Am Rand wurde eine Permeabilität von $2,4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ gemessen, während in der Mitte eine Permeabilität von $1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ gemessen wurde. Der Porositätsunterschied von ca. 4 % (absolut) bewirkte damit einen Unterschied der Permeabilität von fast 2 Größenordnungen.

Da das Schlankheitsmaß der Probe etwa 1 betrug und die Probe sehr groß war, ist die Veränderung der Porosität über die Tiefe und die Breite der Probe plausibel. Die im Labor verdichteten Proben waren eher scheibenförmig mit einem Schlankheitsmaß von ca. 0,3.

Grundsätzlich zeigten die Ergebnisse dieses Vorversuchs die Leistungsfähigkeit der Impulsverdichtung. Gerade durch die Havarie des verwendeten Stahlbehälters konnten wichtige Erfahrungen für die Konzeption und Planung eines größeren halbertechnischen Versuchs gewonnen werden.

3.3.3 Versuchsaufbau und Versuchsa blauf

Für die Erprobung der Impulsverdichtung im halbertechnischen Maßstab wurde ein Standort in einem Hartgesteins-Steinbruch (Diabas) gewählt (Versuchsort 3 im Steinbruch Marxgrün). Der Steinbruch war während des Versuchs gestundet, wodurch bergmännische Arbeiten den Versuch nicht behinderten. In Zusammenarbeit mit dem Steinbruchbetreiber wurden 3 verschiedene Standorte auf der mittleren Sohle ausgewählt und diese durch oberflächennahe Bohrungen erkundet. Danach wurde an allen 3 Standorten eine Mulde schonend gesprengt, das freigelegte Gebirge begutachtet und danach der Versuchsstandort ausgewählt.

3.3.3.1 Erstellung des Gesenks

Das Gesenk wurde mit Untermaß schonend gesprengt. Auf der Oberfläche am Versuchsort lagen ca. 10 cm bis 20 cm Lockermaterial mit teilweisem Bewuchs vor (Abbildung 29). Ca. 50 % bis 70 % des Umfangs der Gesenkstöße waren standfest mit Kluftabständen im Dezimeterbereich. Der Rest war im Vergleich dazu eher aufgelockert. Die Sohle erschien sehr standfest und vergleichsweise wenig aufgelockert (Abbildung 30). Der Durchmesser der Grube betrug ca. 3,3 m bei einer Teufe von ca. 1,2 m.



Abbildung 29: Erkundungsarbeiten auf der mittleren Steinbruchsohle



Abbildung 30: Durch schonendes Sprengen aufgefahrener Gesenk

Das teilweise bewachsene Lockermaterial an der Oberfläche wurde in einem Umkreis von mehreren Metern bis zu 20 cm tief entfernt. Des Weiteren wurde das Lockermaterial an den Gesenkstößen händisch entfernt und durch Spitzarbeiten die Kontur angepasst. Die Sohle des Gesenks wurde durch Spitzarbeiten angepasst, sodass diese relativ eben und ca. 1,35 m unter dem Gelände lag.

Zur Erzielung definierter geometrischer Verhältnisse sollte der Versuch in einem Stahlring durchgeführt werden. Dieser hatte eine Wandstärke von 15 mm, einen Innendurchmesser von 3,0 m und wurde in das Gesenk eingestellt. Der Ring wurde in Halbsegmenten angeliefert und vor Ort auf der Innen- und Außenseite verschweißt. Der Ring hatte eine Höhe von 1,4 m, wodurch dieser ca. 5 cm über der Geländeoberkante stand.

Danach wurde die Sohle innerhalb des Stahlringes ohne Bewehrung auf eine Höhe von ca. 5 cm betoniert. Für alle Betonagen wurde eine Betonfertigmischung auf Basis eines C50/60 mit einem Größtkorn von 8 mm verwendet.

Um die Schub- und Zugfestigkeit im weiterhin zu betonierenden Ringraum zwischen Stahlring und Gesenkstoß zu steigern, wurden 2 geschlossene Ringanker aus gebogenem Betonstahl B500B ($\varnothing \sim 32$ mm) im oberen Bereich des Ringraumes eingelegt. Der Durchmesser des Ringankers betrug ca. 3,25 m, wobei der obere Anker 15 cm unter der Oberkante des Stahlringes positioniert wurde. Der untere Ringanker lag 40 cm unter der Oberkante des Stahlringes. Der Ringanker wurde positioniert, indem er an den Stahlring mit ca. 10 cm langen Stahlstiften angeschweißt wurde. Zur Armierung des Betons wurden in den Ringraum Stahlmatten (Q335A 150 x 150 mm) ringförmig eingestellt. Des Weiteren wurden zur Schubbewehrung 70 Bügel aus Betonstahl B500B ($\varnothing 10$ mm) über den Umfang der Ringanker alle 15 cm eingelegt. In der Abbildung 31 ist der eingestellte Stahlring mit der eingebauten Bewehrung, den eingebauten Ringankern und der bereits betonierten Gesenksohle dargestellt. Die Abbildung 32 zeigt den Bewehrungsaufbau im Detail.



Abbildung 31: Fertig eingebaute Bewehrung für die Ringraumbetonage des Stahlringes



Abbildung 32: Detail der Bewehrung

Drei Tage nachdem der Ringraum betoniert wurde, wurde mit Hilfe von Verpressankern das umliegende Gebirge in 3 verschiedenen Teufen mit ca. 250 kg Injektionsmörtel verpresst. Die Verpressbohrungen wurden kreisförmig mit einem Abstand zum Gesenkstoß von ca. 0,2 m angeordnet. Der Abstand der Verpressbohrungen zueinander lag bei max. 0,8 m.

Das Verpressen erfolgte in 2 Kampagnen mit einem Abstand von einem Tag, wobei, wie in Abbildung 33 schematisch dargestellt, eine Überlappung der Verpresskörper erreicht wurde.

Die Injektionen erfolgten von unten nach oben in 3 verschiedenen Teufen mit den in der Tabelle 16 angegebenen Verpressdrücken. Dadurch wurde sichergestellt, dass durch die Verpressarbeiten keine Hebungen oder Auflockerungen des klüftigen Gebirges provoziert wurden.

Tabelle 16: Teufenabhängige Verpressdrücke

Teufe	Verpressdruck
1,4 m - 1,0 m	1 bar
1,0 m - 0,5 m	0,6 bar
0,5 m - 0,1 m	0,3 bar

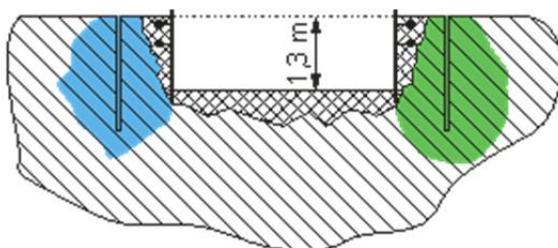


Abbildung 34: Vertikaler Querschnitt des Gesenkaufbaus mit der schematischen Anordnung der Verpresskörper

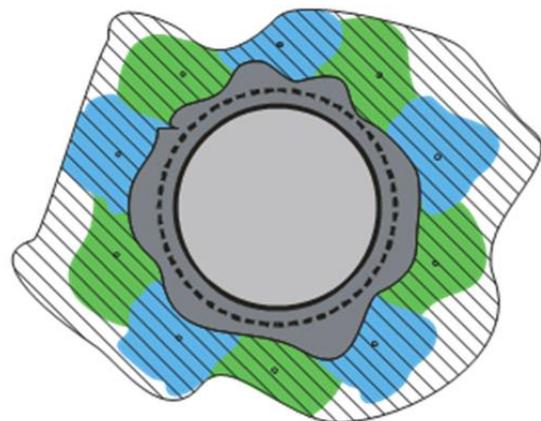


Abbildung 33: Horizontaler Querschnitt des Gesenkaufbaus mit der schematischen Anordnung der Verpresskörper

Die Bauarbeiten waren Ende Juni 2015 abgeschlossen, sodass am 13. Juli 2015 mit der Durchführung des dreiwöchigen Versuchs begonnen wurde. In der Abbildung 35 ist die Einrichtung des Versuchsortes im Steinbruch dargestellt. Neben einem Lager- / Bürocontainer wurden ein Radlader, ein Druckluftkompressor und ein Stromgenerator vorgehalten. Um etwaige Niederschläge von dem Gesenk fernzuhalten, wurde tagsüber ein leichtes Pavillonzelt verwendet. Über Nacht wurde das Gesenk durch einen Aufbau aus Holzbohlen, Europaletten und

Baufolie abgedeckt. Während der Verdichtung mit dem Impulsverdichter war aufgrund der Höhe des Verdichters kein Wetterschutz möglich.



Abbildung 35: Ansicht des vorbereiteten Versuchsortes



Abbildung 36: Fertiggestelltes Gesenk

In der Abbildung 36 ist das fertiggestellte Gesenk dargestellt. Zur Planung und Durchführung des Versuchs wurde ein Polarkoordinatensystem angewendet. Die mittlere Teufe des Gesenks, bezogen auf die Oberkante des Stahlringes, betrug 130,52 cm.

3.3.3.2 Einbau und Vorverdichtung der Einbauschichten

Im Rahmen des Versuchs wurden 3 Salzgrus-Ton-Gemische der Rezepturen STG-1 (EBSM), STG-2 (OBSM) und STG-3 (mOBSM) (siehe AP 3.1) in 3 Einbauschichten S1 bis S3 aus jeweils 8 Einbaulagen L1 bis L8 aufgebaut. Das Material für jede Schicht war auf 8 Big Bags verteilt und wurde lagenweise eingebaut. Die Herstellung des Materials im industriellen Maßstab ist im Bericht zum AP 3.1 beschrieben. Des Weiteren wurden im Bericht zum AP 3.1 die Ergebnisse der Verdichtung im Labormaßstab (siehe Tabelle 14) dokumentiert und diskutiert. Die Zusammensetzung der Gemische ist noch einmal in Tabelle 17 zusammengefasst:

Tabelle 17: Übersicht der Zusammensetzung der Salzgrus-Ton-Gemische

Salzgrus-Ton-Gemisch			STG-1 (EBSM)	STG-2 (OBSM)	STG-3 (mOBSM)
Masseanteile (feucht)	Überkorn Salz	[%]	23,5	46,5	0,0
	Salz B6	[%]	22,0	19,1	56,2
	Salz B8	[%]	35,8	10,6	16,8
	Feinsalz	[%]	0,0	13,0	13,0
	Friedländer Ton	[%]	14,3	7,8	10,4
	Zugabewasser	[%]	4,4	3,0	3,6

Jede Einbaulage war nach der Syntax „SX-LX“ bezeichnet. Damit ergab sich bspw. für die 3. Einbaulage in der 2. Einbauschicht die Bezeichnung „S2-L3“.

Jede Einbaulage wurde mit dem Material aus einem Big Bag geschüttet (Abbildung 37). Dazu wurde der Big Bag mittels Radlader über das Gesenk gehoben und unten geöffnet. Das verstürzte Material wurde sofort mit Schaufeln über die gesamte Fläche verteilt, wobei etwaige Entmischungen ansatzweise homogenisiert wurden. In dem vorangegangenen Vorversuch hatte sich gezeigt, dass die mittlere Schüttdichte bei ca. 1,3 g/cm³ liegt. Daraus ergab sich bei der geplanten Gesenkgeometrie und der Baustoffmenge von ~630 kg pro Big Bag, eine mittlere Schütthöhe des Baustoffes von 7 cm pro Einbaulage. Die Einbaulagen sollten nach dem Verteilen bzw. vor dem Verdichten weitestgehend horizontal sein, was durch Abziehen mit einem Richtscheit und einer Wasserwaage gewährleistet wurde (Abbildung 38).

Tabelle 18: Zuordnung des lagenweisen Vorverdichtungsablaufs

Schicht/ Gemisch	Einbau- lage	Bezeichnung	Verdichtung
1 STG-1 (EBSM)	8	S3-L8	LVV + SVV+IPV
	7	S3-L7	LVV
	6	S3-L6	LVV + SVV
	5	S3-L5	LVV
	4	S3-L4	LVV + SVV
	3	S3-L3	LVV
	2	S3-L2	LVV + SVV
	1	S3-L1	LVV
2 STG-3 (mOBSM)	8	S2-L8	LVV + SVV+IPV
	7	S2-L7	LVV
	6	S2-L6	LVV + SVV
	5	S2-L5	LVV
	4	S2-L4	LVV + SVV
	3	S2-L3	LVV
	2	S2-L2	LVV + SVV
	1	S2-L1	LVV
3 STG-2 (OBSM)	8	S1-L8	LVV + SVV+IPV
	7	S1-L7	LVV
	6	S1-L6	LVV + SVV
	5	S1-L5	LVV
	4	S1-L4	LVV + SVV
	3	S1-L3	LVV
	2	S1-L2	LVV + SVV
	1	S1-L1	LVV

Jede Einbaulage wurde mittels einer leichten Vorverdichtung (LVV) und jede zweite Einbaulage zusätzlich mittels schwerer Vorverdichtung (SVV) verdichtet. Daraus ergab sich der in Tabelle 18 angegebene Ablauf. Jeweils die 8. Einbaulage wurde nach der leichten und schweren Vorverdichtung abschließend mittels Impulsverdichtung (IPV) verdichtet.

Für die leichte Vorverdichtung wurde die leichte Vibrationsplatte RP1 (siehe Tabelle 6) verwendet (Abbildung 39). Für die schwere Vorverdichtung wurde die schwere Vibrationsplatte RP3 verwendet (Abbildung 40).

Die Verdichtung erfolgte spiralförmig in 2 Durchgängen von außen nach innen. Dabei hat sich der Einsatz der leichten Vibrationsplatte RP1 bewährt. Das Handling der schweren Vibrationsplatte RP3 war bei den beengten Platzverhältnissen im Gesenk aufwendig. Durch die kreisförmige Geometrie gelang es jedoch problemlos, das Material randbündig zu verdichten.

Infolge der teilweise aufgetretenen Entmischung des Materials STG-1 und STG-2 mit der Fraktion Überkorn entstanden lokal Inhomogenitäten des vorverdichteten Materials.



Abbildung 37: Verteilen des eingeschütteten Materials einer Einbaulage



Abbildung 38: Abziehen des Materials einer Einbaulage mit einem Richtscheit



Abbildung 39: Einsatz der leichten Vibrationsplatte RP1 bei der leichten Vorverdichtung



Abbildung 40: Einsatz der schweren Vibrationsplatte RP3 bei der schweren Vorverdichtung

In der Abbildung 41 ist der Einbau der 3 Schichten aus jeweils 8 Einbaulagen schematisch dargestellt.

Tabelle 19: Zuordnung des lagenweisen Vorverdichtungsablaufs

Gemisch	Vorverdichtung
STG-1	LVV
STG-1	LVV+SVV
STG-3	LVV
STG-3	LVV+SVV
STG-2	LVV
STG-2	LVV+SVV

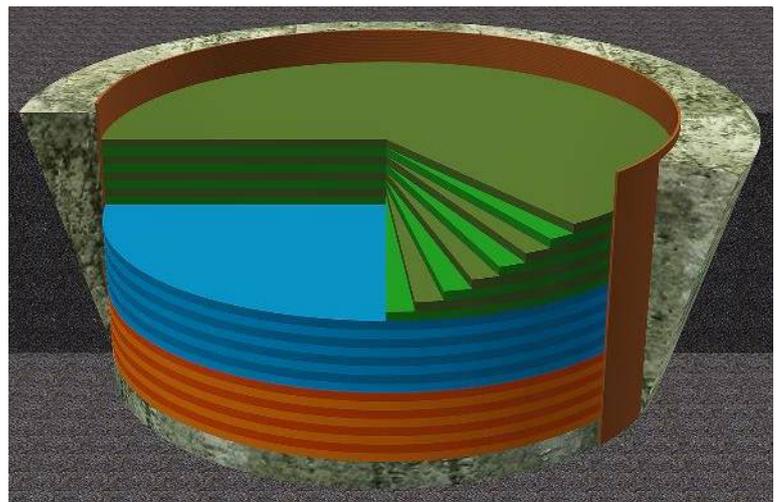


Abbildung 41: Schichtweise Anordnung der verschiedenen Materialien und Art der Vorverdichtung bei den einzelnen Lagen

Nach jedem Verdichtungsvorgang wurde das Niveau der Oberfläche in Bezug auf die Behälteroberkante durch ein Nivellement an 12 Punkten eingemessen. Die dabei gewonnen

Daten sind in der Abbildung 42 grafisch für die einzelnen Schritte der Vorverdichtung in den 3 Schichten dargestellt. Die Ergebnisse der Vorverdichtung wurden unter der Annahme ausgewertet, dass die darunterliegende(n) impulsverdichtete(n) Schicht(en) nicht weiter beeinflusst wurde(n). Durch den hohen Unterschied in der Verdichtungsenergie zwischen der Vorverdichtung und der Impulsverdichtung kann diese Annahme als gerechtfertigt angesehen werden. Innerhalb der einzelnen Schichten bzw. Rezepturen wurden die einzelnen Lagen 1 bis 8 kumuliert ausgewertet.

Durch den abwechselnden Einsatz der leichten und schweren Vorverdichtung ergab sich eine dementsprechend schwankende Gesamtporosität in dem eingebauten Material.

Die Schicht 1 aus STG-2 zeigte einen deutlichen Einfluss der steifen Gesenksohle auf die Vorverdichtung des Materials. Mit zunehmendem Abstand der Einbaulagen von der Gesenksohle steigt die kumulative Porosität asymptotisch an, wobei als Grenzwert eine Porosität von ca. 20 - 22 % für das angewendete Vorverdichtungsregime abgeschätzt wird.

Tabelle 20: Porosität der 3 vorverdichteten Schichten (Gemische) direkt vor der Impulsverdichtung

SGT-Gemisch	Porosität
STG-1	21,2 %
STG-3	21,1 %
STG-2	16,9 %

Bei den darüberliegenden Schichten 2 und 3 ist kein Einfluss der Gesenksohle erkennbar, was durch die vergleichsweise hohe Porosität der jeweils ersten Lage einer Schicht belegt wird. Bei den beiden Schichten 2 (STG-3) und 3 (STG-1) wird durch die Vorverdichtung eine Porosität von ca. 21 % erreicht. Die Porosität der 3 vorverdichteten Schichten direkt vor der Impulsverdichtung ist in Tabelle 20 angegeben.

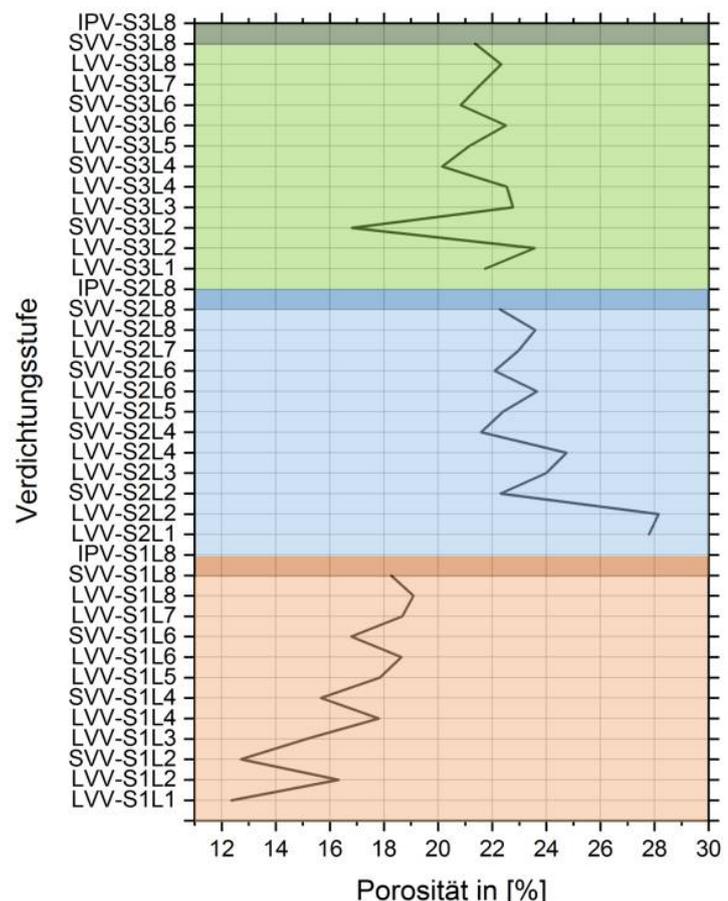


Abbildung 42: Kumulative Entwicklung der Porosität während der Vorverdichtung der 8 Einbaulagen bei allen 3 Gemischen



Um bei der späteren Beprobung die einzelnen Einbaulagen identifizieren zu können, wurde nach der Vorverdichtung ein Teil der Oberfläche mit einem feinen Graphitpuder behandelt. Dabei wurden jeweils ca. 100 g des Graphitpuders mit einem Besen in die verdichtete Oberfläche der Einbaulage „eingerieben“ (Abbildung 43).

Abbildung 43: Markierung der Lagenoberflächen mit einem Graphitpuder

3.3.3.3 Ablauf der Impulsverdichtung

In der Abbildung 44 ist die Position des Impulsverdichters am Gesenk dargestellt, wobei die Verdichtung des Materials von einer Position aus erfolgte. Der verwendete Verdichterfuß hatte einen Durchmesser von 150 cm und die Masse des Fallgewichts betrug 9 t.



Abbildung 44: Positionierung des Verdichters am Gesenk

Ziel der Impulsverdichtung war es eine spezifische Verdichtungsenergie von $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ in jede einzelne Schicht einzuleiten. Die Verdichtungsenergie von $15 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ entspricht der Verdichtungsenergie beim Marshall-Gerät bei gleichzeitig minimaler Porosität. Die spezifische Verdichtungsenergie ist dabei nur auf das Volumen des Feststoffanteils im Baustoff bezogen. Dieses betrug als Vorgabe in jeder der 3 Schichten $2,17 \text{ m}^3$. Nach Formel 3 resultierte daraus, dass in jede Schicht eine Gesamtverdichtungsenergie von $32,5 \text{ MJ}$ eingebracht werden musste.

$$E_{V,dyn} = V \cdot E_{V,spez} \quad \text{Formel 3}$$

$E_{V,spez}$	spezifische Verdichtungsenergie	$[\text{MJ}/\text{m}^3]$
V	Volumen	$[\text{m}^3]$
$E_{V,ges}$	Gesamtverdichtungsenergie	$[\text{MJ}]$

Um die benötigte Verdichtungsenergie möglichst gleichmäßig in die Schichtoberfläche einzuleiten, wurde die Impulsverdichtung in vier Durchgänge (IPV1 bis IPV4) eingeteilt. Weiterhin wurde die Verdichtungsenergie während der vier Durchgänge definiert gesteigert, um die Entstehung von tiefen Senkungstrichtern speziell im ersten Durchgang IPV1 zu vermeiden.

Im ersten Durchgang wurden 9,1 %, im zweiten Durchgang 16,5 %, im dritten Durchgang 24,8 % und im vierten Durchgang 49,5 % der gesamten Verdichtungsenergie von 32,5 MJ eingebracht. Die Verdichtungsenergie wurde variiert, indem die Fallhöhe des Gewichts gesteigert wurde, angefangen bei 30 cm im ersten Durchgang IPV1, 40 cm im zweiten Durchgang IPV2, 60 cm im dritten Durchgang IPV3 und zuletzt 120 cm im vierten Durchgang IPV4. Der beschriebene Ablauf und die Anordnung des Verdichterfußes in Relation zur Geometrie des Gesenks ist in Abbildung 45 angegeben.

In jedem der vier Durchgänge wurde der eingebrachte Anteil der Verdichtungsenergie über die Gesenkfläche „verteilt“. Aufgrund des Gesekndurchmessers von 3 m und einem Durchmesser des Verdichterfußes von 1,5 m wurden vier Ansatzpunkte für den Verdichterfuß gewählt. Das Verdichtungsschema ist in Abbildung 45 dargestellt.

Die Verdichtungsschemen des zweiten, dritten und vierten Durchganges werden relativ zum ersten Schema (IPV1) um 22,5° bzw. 45° verdreht angeordnet. Die Ansatzpunkte wurden mit dem verwendeten Polarkoordinatensystem bestimmt.

Jeder Ansatzpunkt der Impulsverdichtung war nach der Syntax „SX-IPVX-X“ bezeichnet. Damit ergab sich bspw. für den 3. Ansatzpunkt im 2. Verdichtungsdurchgang auf der 1. Einbauschicht die Bezeichnung „S1-IPV2-3“ (siehe Abbildung 45).

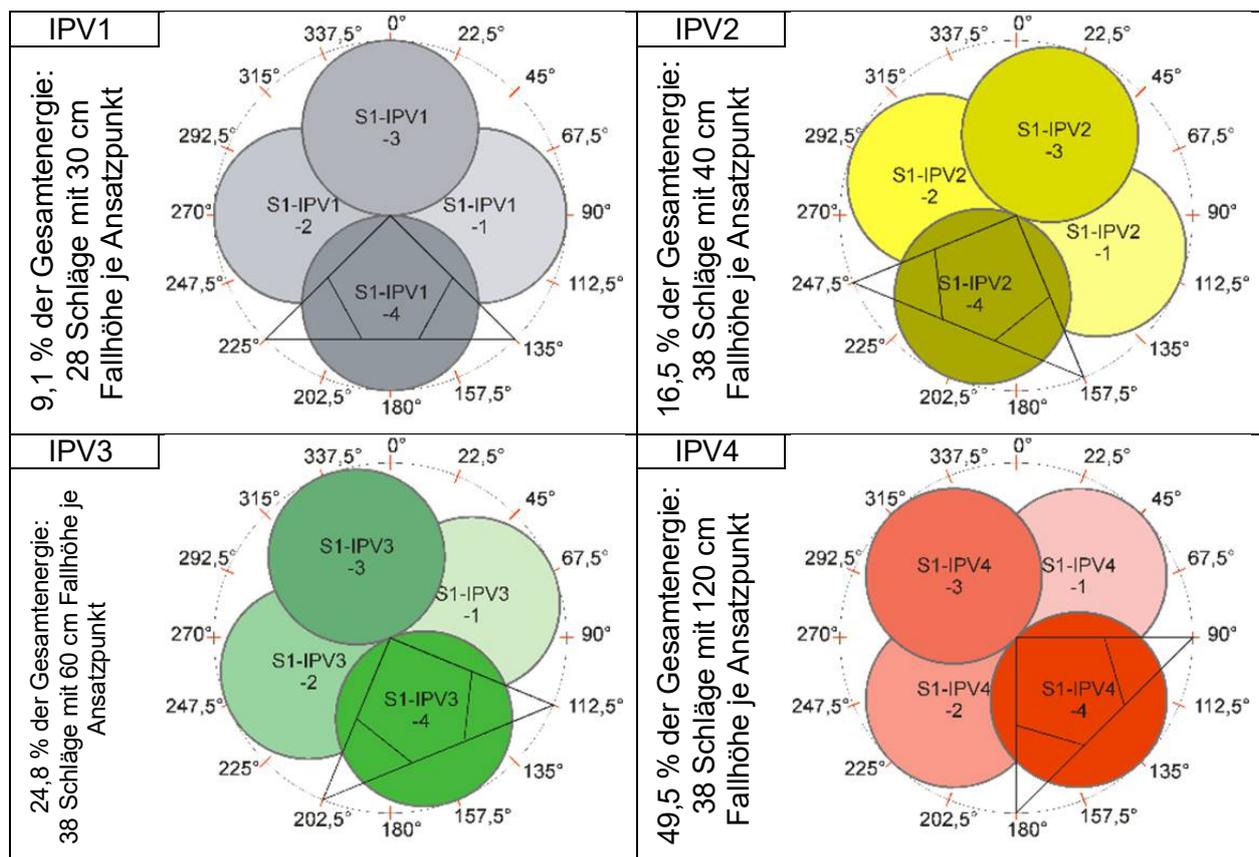


Abbildung 45: Ablauf der Impulsverdichtung in jeweils 4 Durchgängen mit jeweils 4 Ansatzpunkten

Wird das beschriebene Verdichtungsschema angewendet, so wird mit dem Verdichterfuß nicht jeder Punkt / Bereich an der Schichtoberfläche nach allen vier Durchgängen mit der gleichen Häufigkeit verdichtet. Es gibt kleine Bereiche am Rand, die nicht vom Verdichterfuß verdichtet worden sind. In der Mitte gibt es Bereiche, bei denen der Verdichterfuß wesentlich häufiger verdichtet hat. Nimmt man an, dass pro Schlag mit dem Fallgewicht aus einer bestimmten Fallhöhe h eine bestimmte Verdichtungsenergie, bezogen auf die Verdichterfußfläche eingeleitet

wird, so lässt sich errechnen, welcher Anteil der Verdichtungsenergie in welchem Bereich eingeleitet worden ist. In der Abbildung 46 ist die Verteilung der Verdichtungsenergie auf der Schichtoberfläche dargestellt.

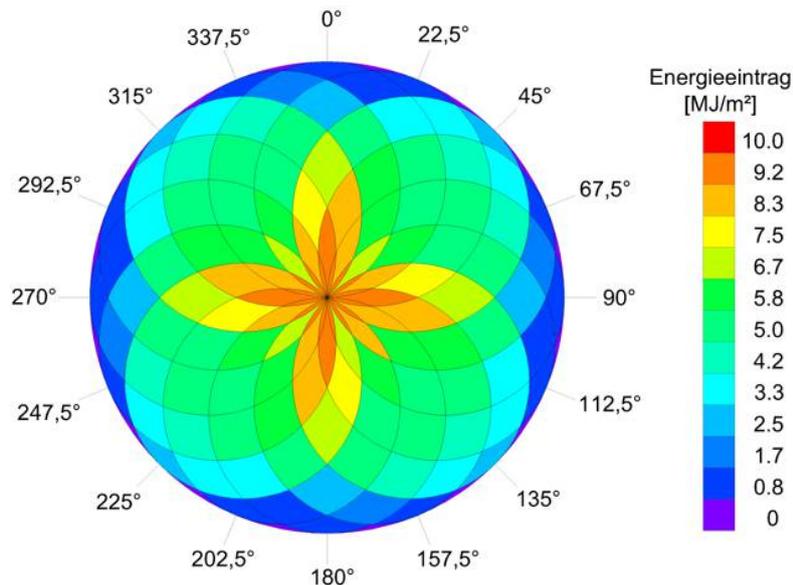


Abbildung 46: Verteilung der durch die Impulsverdichtung summarisch eingeleiteten Verdichtungsenergie

Dabei zeigt sich, dass lokal am Rand nahezu keine und in der Mitte der Gesenksoberfläche ein Großteil der Gesamtenergie summarisch aus allen vier Durchgängen eingeleitet wurde. Die Verteilung besitzt eine Symmetrie, welche bei der späteren Beprobung berücksichtigt wurde.

Unter Ausnutzung der Tatsache, dass bei der weiteren Verdichtung der darüberliegenden Schichten die unteren Schichten zu einem gewissen Anteil „nachverdichtet“ werden, könnte durch Verdrehen des Anfangsschemas um 45° auf jeder folgenden Einbauschicht die resultierende Verteilung im Innern des Baustoffkörpers noch weiter homogenisiert werden. Durch zusätzliche Verdichterschläge in den Randbereichen mit nahezu 0% der Verdichtungsenergie, könnte die eingeleitete Verdichtungsenergie dort erhöht werden, was aber unweigerlich dazu führt, dass in der Mitte die eingeleitete Verdichtungsenergie um den gleichen Anteil erhöht wird. An der relativen Verteilung der Gesamtenergie ändert sich dann nichts.

Die Tatsache, dass am Rand teilweise immer eine geringere Verdichtungsenergie eingeleitet wird, ist eine Folge aus dem Verhältnis aus der Gesenkgeometrie und der Geometrie des Verdichterfußes. Bei einem deutlich kleineren Verdichterfuß (z.B. Ø 80 cm) könnte eine gleichmäßigere Verteilung der Verdichtungsenergie erreicht werden. Dafür müsste aber eine deutlich höhere Anzahl an Ansatzpunkten durch den Verdichter angefahren werden, was den Einbaufortschritt deutlich verlangsamen würde.

Beachtet werden muss, dass die Verdichtungsenergie nicht senkrecht nach unten wirkt, sondern in einem Winkel von bis zu 45° gegen die Vertikale (abhängig vom Reibungswinkel des Schüttmaterials) radial von der Verdichterfläche das Schüttmaterial verdichtet (Lastausbreitung unter Verdichterfuß) [Adam et al., 2011]. Die daraus resultierenden kegelstumpfförmigen Verdichtungsgebiete überlagern sich mit zunehmender Schichtmächtigkeit. Dies führt zu einer Homogenisierung des Verdichtungsgrades im Innern des verdichteten Baustoffkörpers. Auf Grund der Lastverteilung unter dem Verdichterfuß, bedingt durch den Reibungswinkel des Salzgruß-Ton-Gemisches, gibt es aber tatsächlich keine Bereiche, die nicht verdichtet worden sind.

Um genau diesen Effekt auch bei der Auswertung des Versuchs zu erfassen und zu bewerten, wurde das beschriebene Verdichtungsschema für alle 3 Einbauschichten in gleicher Weise angewendet.

3.3.3.4 Erfahrungen im Ablauf der Impulsverdichtung

Trotz der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Gesamtverdichtungsenergie mit dem Ziel, eine möglichst homogene Verdichtung zu erreichen, traten teilweise erhebliche Eindrückungen unter dem Verdichterfuß und Auflockerungen neben dem Verdichterfuß auf. In der Abbildung 47 sind typische Auflockerungen der Schichtoberfläche infolge des Eindrückens des Verdichterfußes dargestellt.

Nach dem ersten Durchgang IPV1 sind im Schnitt ca. 2 cm tiefe Eindrücke des Verdichterfußes auf der Oberfläche zurückgeblieben. Erst mit dem zweiten Durchgang IPV2 kam es dann zu stärkeren Auflockerungen auf der Oberfläche. Ab dem 2. Durchgang wurde das aufgelockerte Material händisch neu verteilt und mit der kleinen Vibrationsplatte RP1 „angerüttelt“.

Mit dem dritten Durchgang IPV3 kam es zu ersten schollenartigen Aufbrüchen in den Bereichen, welche nicht durch den Verdichterfuß abgedeckt waren. Der schichtweise Einbau der vorverdichteten Lagen führte an den Lagengrenzen zu Schwächezonen. An denen brach das Material dann schollenartig auf. Teilweise wurden dabei Bruchstücke aus bis zu 3 Einbaulagen herausgehoben.

Beim letzten Durchgang IPV 4, welcher ca. 50 % der Gesamtenergie in das Material einbrachte, traten die stärksten oberflächigen Aufbrüche auf. Generell wurden dadurch die oberen 3 bis 4 Einbaulagen stark deformiert. Durch die Umverteilung des aufgelockerten Materials auf der Materialoberfläche kam es zu einer teilweisen „Verschmierung“ der Lagengrenzen.



Abbildung 47: Typische Auflockerungen der Schichtoberfläche infolge des Eindrückens des Verdichterfußes

Beim STG-3 traten die tiefsten Abdrücke auf. Auch die Auflockerungen neben dem Verdichterfuß waren bei diesem Gemisch am stärksten ausgeprägt. Diese Beobachtung wird mit dem fehlenden Überkornanteil im Gemisch begründet.

Um die Auflockerungen auf der letzten (3.) Schicht aus dem STG-3 zu minimieren, wurde außerplanmäßig auf einer vorverdichteten Überschüttung mit 15 cm Splitt (0/8 mm) impulsverdichtet. Durch die Überschüttung sollten Spannungsspitzen an den Rändern des Verdichterfußes vergleichmäßigt und damit das Durchstanzen des Verdichterfußes und die damit verbundenen Auflockerungen vermieden werden. Um für den Rückbau den Splitt von der Unterlage zu trennen, wurde ein dünnes Geotextil aus Glasfasergewebe zwischen Splitt und Unterlage eingelegt. (Abbildung 48).



Abbildung 48: Überschüttung der 3. Schicht mit Splitt vor der Impulsverdichtung



Abbildung 49: Oberfläche der impulsverdichteten 3. Schicht

Nachdem die Überschüttung entfernt war, wurde die Verdichtung des Schüttmaterials nach 4 Übergängen mit dem Impulsverdichter untersucht.

Die Topologie der Senkungen nach der letzten Impulsverdichtung auf der Oberfläche der 3. Einbauschicht wurde mit einem Rastermaß von 15 cm eingemessen. Als Bezugsniveau diente die Oberkante des Stahlrings. Die daraus bestimmte Verteilung von Hebungen und Senkungen ist in der Abbildung 50 in Bezug zur mittleren Teufe der Oberfläche visualisiert. Als Bezug sind die Ansätze des Verdichterfußes im 4. Durchgang der Impulsverdichtung zusätzlich dargestellt (vgl. Abbildung 49 und Abbildung 50). Das Material wurde teilweise stark verdrückt und es wurden Hebungen von bis zu 30 cm und Senkungen / Verdrückungen bis zu 20 cm in Bezug auf die mittlere Teufe von 25,12 cm (bzgl. Oberkante Stahlring) festgestellt.

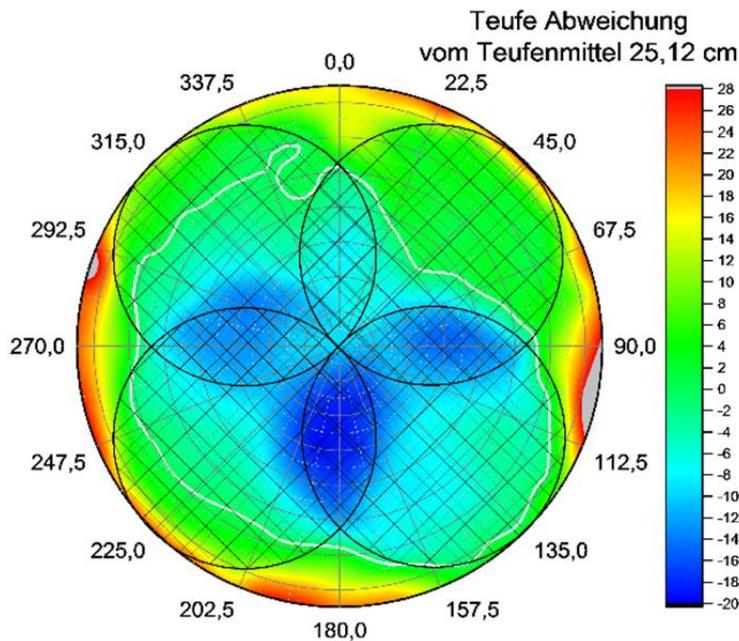


Abbildung 50: Gemessene Oberflächentopologie in Bezug zu den Positionen des Verdichterfußes

Die Senkungen sind in den überlappenden Bereichen des Verdichterfußes am größten. In der Tabelle 21 sind die Verschiebungen der Oberfläche in Bezug zur mittleren Teufe der Oberfläche für die Überlappungen des Verdichterfußes des letzten Durchganges IPV4 angegeben.

Tabelle 21: Relative Verschiebung im Überlappungsbereich des Verdichterfußes

Überlappung der Ansätze	rel. Verschiebung zu mittl. Teufe der Oberfläche
S3-IPV4-3 - 1	-8,0 cm
S3-IPV4-3 - 2	-12,7 cm
S3-IPV4-4 - 1	-14,9 cm
S3-IPV4-4 - 2	-18,8 cm

Tabelle 22: Relative Verschiebung unter dem Verdichterfuß bei den verschiedenen Ansatzpunkten

Ansatz	rel. Verschiebung zu mittl. Teufe der Oberfläche
S3-IPV4-1	+1,4 cm
S3-IPV4-2	-5,3 cm
S3-IPV4-3	-6,1 cm
S3-IPV4-4	-7,3 cm

Die Verschiebungen im Bereich des letzten Ansatzpunktes für den Verdichterfuß sind im Vergleich zu den Verschiebungen im Bereich des vorletzten Ansatzes deutlich höher. Daraus wird geschlussfolgert, dass bei jedem der 4 Verdichtungsansätze im letzten Durchgang, dass Material seitlich verdrückt wurde und damit außerhalb des Einflussbereiches des Verdichterfußes wieder auflockerte.

In der Tabelle 22 sind die Verschiebungen der Oberfläche, in Bezug zur mittleren Teufe der Oberfläche, für die Mitte der jeweiligen Verdichtungsflächen des letzten Durchganges IPV4 angegeben. Auch dabei zeigt sich klar der Trend, dass in der Reihenfolge der Ansätze die Verschiebungen zunehmen, wobei im Bereich des ersten Ansatzes S3-IPV4-1 sich die Oberfläche im Vergleich zur mittleren Oberfläche der 3. Schicht gehoben hat. Auch diese Ergebnisse sind ein Indiz für die oberflächennahe Verdrückung des eingebauten Materials.

Bei einem Vergleich der Verteilung der summarisch aufgebrauchten Verdichtungsenergie mit der Topologie der Oberfläche nach der Impulsverdichtung wird der Effekt der Verdrückung des Materials ebenfalls sehr deutlich.

Ob dieses plastische Materialverhalten nur beim STG-3 aufgetreten ist, kann anhand der Ergebnisse und Beobachtungen nicht abgeleitet werden. Durch die Überschüttung der 3. Schicht mit dem Splitt wurde dieses Verhalten zum Teil provoziert, da im Gegensatz zu den anderen Schichten 1 und 2 keine Umverteilung und Nachverdichtung des aufgelockerten Oberflächenmaterials erfolgte.

Die Konstruktion des Gesenks hat sich bewährt. Augenscheinlich und haptisch spürbar schwang der gesamte betonierte Ring während der Schläge der Impulsverdichtung mit einer deutlich größeren Amplitude ($\sim 1\text{mm}$) im Vergleich zum angrenzenden Gebirge. Die Schwingungen waren auch in 50 m Entfernung am anstehenden Gebirge spürbar. Effektiv dauerte die Impulsverdichtung in 4 Durchgängen pro Schicht ca. 1 h.

3.3.3.5 Beprobung der verdichteten Salzgrus-Ton-Gemische

Mittels luftgespülter Trockenbohrung ($\varnothing 100$) wurden seigere Bohrungen durch das gesamte eingebaute Material bis auf die Gesenksohle gestoßen (Abbildung 51).



Abbildung 51: Probengewinnung mittels druckluftgespülter Kernbohrungen



Abbildung 52: Über die gesamte Gesenkfläche hochgepresstes Schichtpaket

Bereits am Anfang der Bohrarbeiten kam es infolge einer verklemmten Bohrkronen zu einem pneumatischen Frac über die gesamte Fläche des Gesenks an der Schichtgrenze zwischen Schicht 1 und 2. Dabei wurden ca. 10 t Material (Schicht 2 und 3) inkl. des Bohrgerätes und 3 Personen ca. 10 cm angehoben (Abbildung 52). Das Material rutschte danach mit der Zeit wieder etwas zurück, wobei sich teilweise weitere Lagen voneinander trennten.

Zusätzlich wurde die Oberfläche etwas eingeebnet, indem Material vor allem in den Randbereichen entfernt wurde. Dadurch war es nicht mehr möglich, die Schicht 3 über ihre gesamte Höhe und auf der gesamten Gesenkfläche zu beproben.

Trotz der Hebung durch den pneumatischen Frac wurden 22 Bohrungen erfolgreich gestoßen. Das verwendete Bohrraster ist in Relation zu der gemessenen Oberflächentopologie der eingebauten Schichten in Abbildung 53 angegeben.

Die begrenzte Festigkeit des verdichteten Salzgrus-Ton-Gemisches stellte im Zusammenhang mit der seigeren Anordnung der Bohrlöcher eine große Herausforderung hinsichtlich der Gewinnung kompakter und zusammenhängender Kernproben dar.

Die 17 Kerne der rot markierten Bohrungen wurden zur Untersuchung der räumlichen Verteilung der Porosität verwendet. Die Bohrungen wurden wie in Abbildung 53 angeordnet, um vier Vertikalschnitte bei 0° , 45° , 90° und 135° zu erhalten. Der Schnitt bei 45° läuft durch das Zentrum

des 1. Ansatzpunktes der Impulsverdichtung. Der Schnitt bei 135° läuft durch das Zentrum des 4. (letzten) Ansatzpunktes.

Die 6 Kerne der grün markierten Bohrungen wurden für zusätzliche Untersuchungen durch die Projektpartner verwendet. Dabei wurden Dünnschliffe zur Untersuchung des Gefüges durch die BGE TECHNOLOGY GmbH angefertigt. Des Weiteren wurden Kernproben aus allen 3 Schichten bzw. Rezepturen hinsichtlich ihrer Permeabilität durch das IfG Leipzig untersucht.

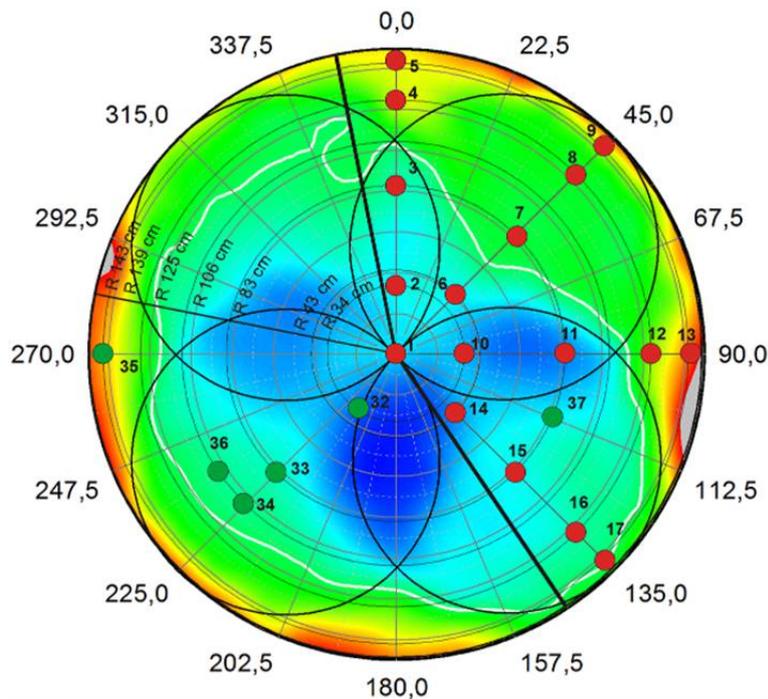


Abbildung 53: Anordnung der Kernbohrungen in Bezug zur Oberflächentopologie des verdichteten Materials

Die Kernproben wurden direkt vor Ort untersucht. Dazu wurden die Kernmarsche vor Ort hinsichtlich der Lagen- und Schichtgrenzen aufgenommen, wobei sich die Markierung der Lagengrenzen mit Grafit maßgeblich bewährte (Abbildung 54).



Abbildung 54: Kernmarsch der Bohrung 11



Abbildung 55: Die Bohrkernproben wurden entlang der Grafit-schichten lagenweise gespalten (STG-3)

Danach wurden die Kernmehrsche entlang der Grafit-schichten lagenweise gespalten (Abbildung 55). Dadurch konnten 262 repräsentative Proben, also ca. 64 % der theoretisch 408 möglichen Proben, aus den 17 Bohrkernen gewonnen werden.

Die Dichte der Proben wurde nach DIN EN ISO 17892-2 bestimmt. Als Bestimmungsverfahren wurde die Tauchwägung mit einem niedrigviskosen Silikonöl gewählt. Dabei wurden die Proben sofort nach dem Spalten gewogen und mittels Tauchwägung das Volumen bestimmt. Um die Aufsättigung eines eventuell vorhandenen zugänglichen Restporenraumes zu minimieren, wurde bei der Tauchwägung bereits wenige Sekunden nach dem Eintauchen in das Silikonöl abgelesen. Teilweise trat an einigen Proben stark Gas aus. Dies betraf hauptsächlich Proben aus der Schicht 3. Bei diesen Proben wurde dann teilweise bis zu einer Minute mit dem Ablesen des Messwertes gewartet, da sonst kaum ein stabiler Messwert abgelesen werden konnte.

Die so ermittelte Dichte wurde später zur Berechnung der Porosität verwendet (siehe Abschnitt 3.3.5).

3.3.4 Rückbau des Gesenkversuches

Im Oktober 2015 wurde das im Gesenk eingebaute Material zurückgebaut. Dabei wurde überprüft, wie weit sich der Gesenkboden in Bezug auf die Oberkante des Stahlringes infolge der beim Verdichten auftretenden Kräfte verschoben hat. Auf die Ergebnisse hat eine eventuell aufgetretene Lageänderung keinen Einfluss, da die Dichten an Bohrkernproben direkt am Material gemessen wurden. Ob sich der Gesenkboden verformt hat, war jedoch für weitere Versuche relevant.

Ein weiteres Ziel war es, das Profil der verdichteten Lagen/Schichten über die gesamte Höhe aufzuschließen. Dazu sollten die Lagen/Schichten über einen möglichst breiten Bereich von einer Behälterseite zur anderen über die gesamte Höhe frei gelegt werden. Um die Lagen gut identifizieren zu können, wurde der Aufschluss in dem Bereich angeordnet, in dem Grafit zwischen die Lagen eingestreut wurde. Durch den eingestreuten Grafit waren die Lagenübergänge gut sichtbar.

In der Zeit zwischen den Kernbohrungen und dem Rückbau wurde das Gesenk gegen Witterung geschützt. Die Oberfläche des verdichteten Salzgrus-Ton-Gemisches wurde mit Kunststofffolien abgedeckt und über dem gesamten Stahlring wurden Kanthölzer und Holzpaletten gelegt, die mit Kunststofffolienbahnen überspannt waren. So hat sich das Material über diesem Zeitraum nicht merklich verändert.

Um eine möglichst glatte Aufschlussoberfläche zu erreichen, wurde das verdichtete Material durch einen Sägeschlitz aufgeschlossen. In Abbildung 56 ist der Sägeschlitz (schwarze Linie) verortet und in Abbildung 57 der ausgeführte Sägeschlitz am Gesenkversuch zu sehen. Das Material links vom Sägeschlitz wurde mit dem Bagger ausgehoben. Der Sägeschlitz schneidet den Bereich unterhalb des 1. und des 4. Verdichtungspunktes des jeweils letzten Verdichtungsdurchganges (IPV4) (s. Abbildung 45 und Abbildung 49).

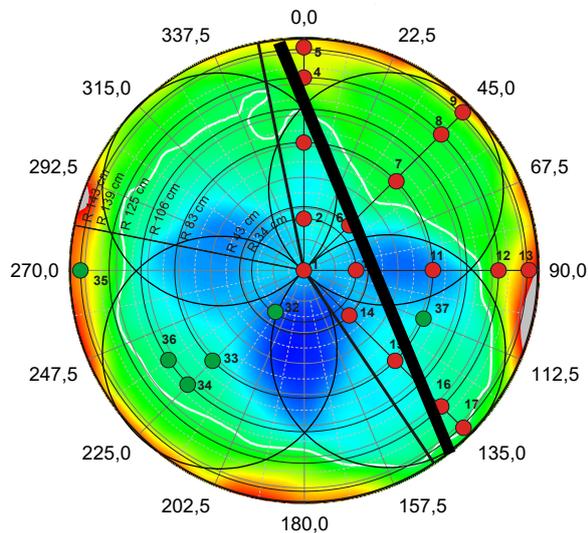


Abbildung 56: Anordnung des Sägeschlitzes



Abbildung 57: Ausführung des Sägeschlitzes

Für die Erstellung des Sägeschlitzes wurde eine druckluftbetriebene Kettensäge eingesetzt. Aufgrund der geringen Schwertlänge konnte nicht die gesamte Schichthöhe in einem Arbeitsgang eingesägt werden, sondern musste abschnittsweise freigelegt werden. Nach dem ersten Auftrennen wurde das links vom Sägeschlitz liegende Material aus dem Gesenk entfernt, danach die Schicht auf dem tieferen Niveau neu eingesägt und anschließend das links davon liegende Material wieder entfernt. Auf diese Weise wurde die gesamte Schicht bis zum Betonboden freigelegt. Abbildung 58 und Abbildung 59 zeigen den aufgeschlossenen Bereich durch das Gesenk.

Um die Lagengrenzen noch besser sichtbar zu machen, wurde Silikonöl auf die freigelegte Fläche des verdichteten Salzgrus-Ton-Gemisches aufgetragen. Durch das Grafit waren die Grenzen der einzelnen Einbaulagen zum großen Teil deutlich erkennbar. In Abbildung 59 ist das Gesamtprofil der verdichteten Lagen und Schichten zu sehen. Die Lagen- und Schichtgrenzen wurden an 5 Stellen verteilt über die Gesamtlänge des Aufschlusses aufgemessen.



Abbildung 58: Fertiggestellter Aufschluss

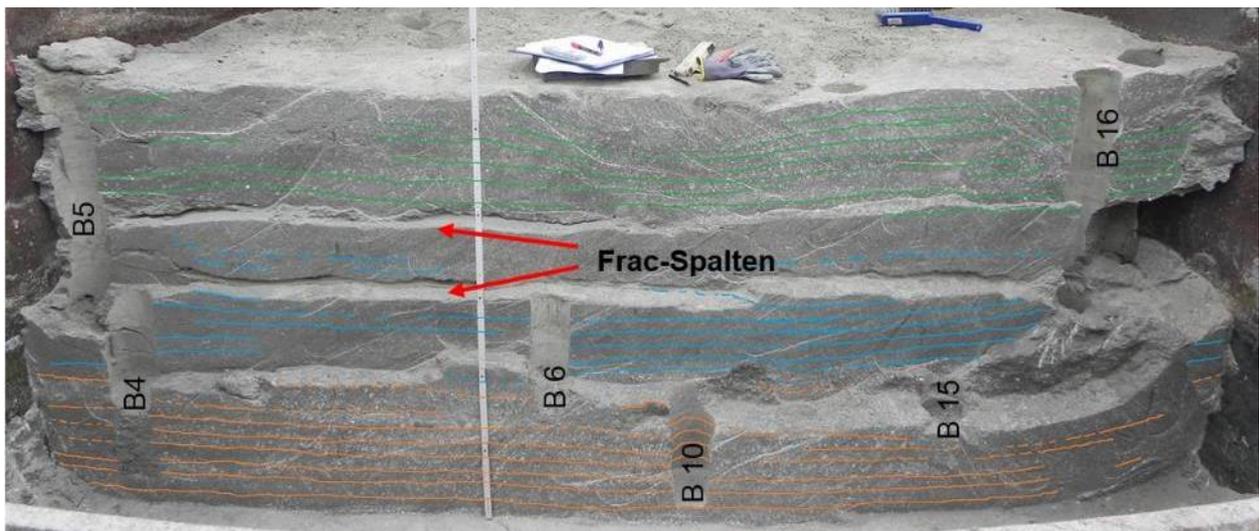


Abbildung 59: Aufschluss durch alle Schichten der Salzgrus-Ton-Gemische

Die einzelnen Lagen konnten zumeist identifiziert werden. Die oberen Lagen einer Schicht waren oftmals nicht eindeutig zuzuordnen, da sich die Lagen direkt unterhalb des Verdichterfußes bei der Impulsverdichtung stark verformt hatten. Die Verschiebung der ursprünglich eben eingebauten Lagen ist deutlich im aufgeschlossenen Höhenprofil wiederzuerkennen (wellige Linien in Abbildung 59). Die Lagengrenzen der obersten Salzgrus-Schicht aus dem STG-1 bildeten im Überschneidungsbereich unterhalb der Verdichtungsunkte IPV4-1 und IPV4-4 eine Senke (vgl. Abbildung 53). In diesem Überschneidungsbereich ist entlang der Aufschlusskante die höchste Verdichtungsenergie eingetragen worden. Die Lagengrenzen lagen enger beieinander als im restlichen Bereich. Der Verlauf der Lagengrenzen in den beiden darunterliegenden Schichten aus dem STG-2 und dem STG-3 ist weniger wellig als bei der Schicht aus dem STG-1. Vermutlich ist das darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Überdeckung einer Schicht der Gesamtenergieeintrag über die Schichtfläche immer homogener wird.

Das Höhenprofil der mittleren Schicht zeigt aber eine starke Faltung der obersten Lagen L6 bis L8. Die oberste Lage L8 erscheint teilweise um das Mehrfache mächtiger als die darunterliegenden Lagen. Evtl. wurde beim händischen Ausgleichen der unregelmäßigen Verdichtungsoberfläche Salzgrusmischung aus anderen Bereichen auf die Fläche aufgetragen, sodass die oberste Lage entlang der Aufschlusssebene so stark erscheint.

In der Aufschlussfläche sind zwei horizontal verlaufende Spalten erkennbar, die durch den Frac des Gesenkversuchs bei der ersten Bohrung entstanden sind. Der untere Spalt verläuft über die komplette Aufschlussbreite und befindet sich auf seiner Hauptlänge in der Lage L6 bzw. in der Lagengrenze L5-L6. Der zweite Riss befindet sich in der Schichtgrenze zwischen Schicht 2 (STG-3) und Schicht 3 (STG-1) und verläuft vom linken Rand bis in etwa zur Bohrung B10 und fällt am Ende nach unten ab. Nach dem Frac hat sich wahrscheinlich das über dem Frac hängende Lagenpaket S3-L6 bis S3-L8 durch dessen Eigengewicht von der restlichen Schicht gelöst, so dass sich dieser obere Spalt aufgetan hat. Direkt beim Frac, waren die Spaltweiten größer. Durch Erstellung des Sägeschlitzes wurde die Einspannung zur Wandung weggenommen, sodass die hängende Scheibe wieder auf das darunterliegende Material aufgerutscht ist.

Nachdem die Lagen und Schichten aufgenommen waren, wurde auch der restliche verdichtete Salzgrus ausgebaggert. Anschließend wurde die Gesenkteufe mit dem Zollstock nachgemessen.

Gemessen wurde an den gleichen Stellen wie bei der Erstmessung vor dem Einbau des Salzgruses. Im Vergleich zeigt sich, dass sich der Abstand zwischen Betonuntergrund zur Stahlringoberkante im Mittel um 8 mm vergrößert hat. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorverdichtung aufgrund geringerer Krafteinwirkung und aufgrund des festen Fundamentes keine Veränderung des Gesenkes bewirkt hat und die Lageverschiebung des Gesenkbodens zum Stahlring allein durch die bei der Impulsverdichtung aufgetretenen Kräfte verursacht wurde.

3.3.5 Ergebnisse und Auswertung

Im Anschluss an den Feldversuch STV-3 wurden die Gemische, hinsichtlich

- der Porosität,
- der luftgefüllten Porosität und
- der MARSHALL-Dichte ausgewertet.

Hierfür wurde mit Hilfe des Tauchwägeverfahrens nach DIN EN ISO 17892-2 zunächst die Dichte der Proben nach Formel 4 bestimmt.

$$\rho = \rho_{\text{öl}} \cdot \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad \text{Formel 4}$$

ρ	Dichte der Probe	[g/cm ³]
$\rho_{\text{öl}}$	Dichte des Silikonöls	[g/cm ³]
m_1	Masse der Probe an der Luft	[g]
m_2	Masse der Probe bei der Tauchwägung [g]	

Aus der Dichte der Proben und dem Wassergehalt des Salzgrus-Ton-Gemischs wurde die Trockendichte nach Formel 5 berechnet.

$$\rho_{\text{tr}} = \frac{\rho}{1 + \left(\frac{w}{100}\right)} \quad \text{Formel 5}$$

ρ_{tr}	Trockendichte der Probe	[g/cm ³]
w	Wassergehalt der Probe	[%]

Aus der Trockendichte und der zuvor laborativ bestimmten mittleren Korndichte des Salzgrus-Ton-Gemischs wurde anschließend die Porosität der Proben nach Formel 6 berechnet.

$$n = \left(1 - \frac{\rho_{\text{tr}}}{\rho_0}\right) \cdot 100 \quad \text{Formel 6}$$

n	Porosität	[%]
ρ_0	mittlere Korndichte des Gemischs	[g/cm ³]

Zur Berechnung der luftgefüllten Porosität wird zunächst die mittlere Stoffdichte nach Formel 7 ermittelt:

$$\rho_{St} = \frac{1 + \frac{w}{100}}{\frac{1}{\rho_0} + \frac{w}{100}} \quad \text{Formel 7}$$

ρ_{St} mittlere Stoffdichte [g/cm³]

Die luftgefüllte Porosität berechnet sich mit Formel 8:

$$n_L = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) \cdot 100 \quad \text{Formel 8}$$

n_L luftgefüllte Porosität [%]

Die luftgefüllte Porosität leitet sich dabei aus dem offenen und luftgefüllten Porenraum ab, während sich die Porosität aus der luftgefüllten Porosität und dem Volumenanteil des im Baustoff enthaltenen Wassers zusammensetzt. Sinkt die luftgefüllte Porosität auf null, wird ein nahezu optimales Verdichtungsergebnis erreicht. Bei weiterer Verdichtung des Versuchskörpers würde danach Wasser abgepresst werden.

Der Verdichtungsgrad ist das prozentuale Verhältnis der in situ bestimmten Dichte bezogen auf die im Labor ermittelte Marshall-Dichte und berechnet sich nach Formel 9:

$$D_{MA} = \frac{\rho}{\rho_{MA}} \quad \text{Formel 9}$$

D_{MA} Verdichtungsgrad bezogen auf die Marschalldichte [%]

ρ_{MA} Marshall-Dichte [g/cm³]

Die Marshall-Dichte dient als Bezugsdichte bei der Verdichtungsprüfung in gleicher Weise, wie sie im Straßenbau bei der Asphalt-Prüfung verwendet wird und auch in ähnlicher Weise im Erdbau die Proctor-Dichte bei der Berechnung des Verdichtungsgrades als Bezugsdichte dient.

Anhand der gewonnenen Daten wurde die Verteilung der Porosität in vertikalen und horizontalen Schnitten bei einem Winkel von 0°, 45°, 90° und 135° dargestellt (Abbildung 60). Zusätzlich sind in Abbildung 60 die an den Kernmarschen bestimmten Schichtgrenzen als rote Linien eingezeichnet.

Im STG-2, welches in der untersten (1.) Schicht eingebaut wurde, schwankte die Porosität zwischen 7,2 % und 10,5 %. Die Schwankungsbreite beträgt somit 3,3%. Im STG-3, welches in der mittleren (2.) Schicht eingebaut wurde, schwankte die Porosität zwischen 9,2 % und 12,4 % und damit um 3,2%. Bei beiden Schichten ist deutlich zu erkennen, dass die tendenziell geringere Porosität im unteren Bereich und eine höhere Porosität im oberen Bereich der Schichten auftrat. Das Gleiche gilt auch für die oberste (3.) Schicht mit dem STG-1, bei der die Porosität zwischen 10,9 % und 15,9% und damit um 5% schwankte. Die Mittelwerte, die Standardabweichung, die minimale und maximale Porosität der drei Salzgrus-Ton-Gemische in den Schichten sind weiter unten in Tabelle 23 zusammengestellt.

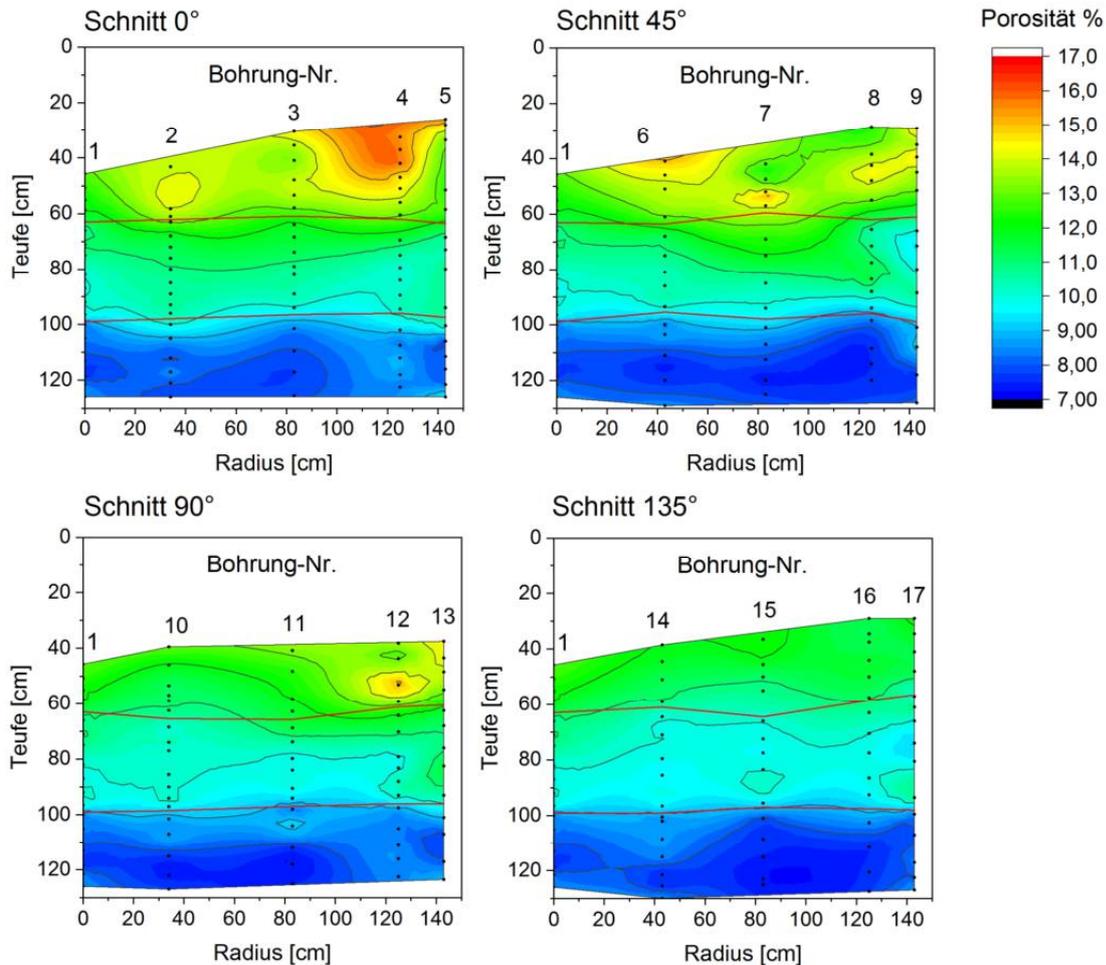


Abbildung 60: Verteilung der Porosität in den vertikalen Schnitten STV-3

In den Schnittzeichnungen 0°, 45° und 90° tritt lokal eine deutlich höhere Porosität auf. Die Schnittzeichnung 135° zeigt im Vergleich dazu eine niedrigere Porosität. Die Ursache ist auf den Impulsverdichtungsprozess zurückzuführen. Der Schnitt 135° verläuft durch die Mitte der Verdichtungsfläche IPV 4-4, während das Material entlang der anderen Schnitte wieder aufgelockert wurde. Die Auflockerungen reichen nahezu bis an die untere Schichtgrenze des STG-1. Die Grafik belegt zudem, dass die beschriebenen sichtbaren Verdrückungen auf der Oberfläche auch in der Tiefe der 3. Schicht stattfanden (Verlauf der roten Linien).

Es ist anzunehmen, dass auch in den unteren Schichten Auflockerungen auftraten. Diese wurden jedoch durch die Verdichtung der darüberliegenden Schicht wieder ausgeglichen, wodurch in den unteren beiden Schichten ein homogeneres Ergebnis vorlag.

Da das Verdichtungsschema in allen 3 Schichten gleich war, war die Wirkung der Nachverdichtung mit der Wirkung der jeweiligen Verdichtung auf den Schichten vergleichbar. Wie schon beschrieben, kann durch eine schichtweise Anpassung des Verdichtungsschemas eine Optimierung der Nachverdichtung in den darunterliegenden Schichten erfolgen.

Anhand des Schnittes bei einem Winkel von 135°, welcher direkt unter dem Verdichterfuß der Verdichtungsfläche IPV4-4 lag, kann für das STG-1 eine näherungsweise realistische Einschätzung des Verdichtungsergebnisses gemacht werden. Die beobachteten Auflockerungen infolge von Materialverschiebungen sind in diesem Bereich minimal.

Die bisherigen Ergebnisse spiegeln sich naturgemäß auch in der Verteilung der luftegefüllten Porosität in den 4 Schnitten wieder, welche in Abbildung 61 dargestellt ist. In den unteren 2 Schichten schwankte die luftegefüllte Porosität zwischen 0,5 % und 3,5 %. Damit wurde eine niedrige luftegefüllte Porosität durch Verdichtung erreicht. Erfahrungsgemäß ist die luftegefüllte Porosität durch Verdichtung nicht weiter absenkbar, da die Luftdurchlässigkeit des verdichteten Materials so gering ist, dass beim weiteren Verdichten die noch eingeschlossene Luft nicht mehr entweichen kann. Damit wurde eine Art „Endzustand“ erreicht. In der obersten Schicht aus dem STG-1 schwankte die luftegefüllte Porosität zwischen 0,8 % und 6,4 %. Die oberste Schicht wäre weiter verdichtet und auch hinsichtlich der Porosität homogenisiert worden, wenn weitere Schichten mit Salzgrus-Ton-Gemisch aufgebracht worden wären. Bei einem realen Schachtverschluss wäre dies der Fall.

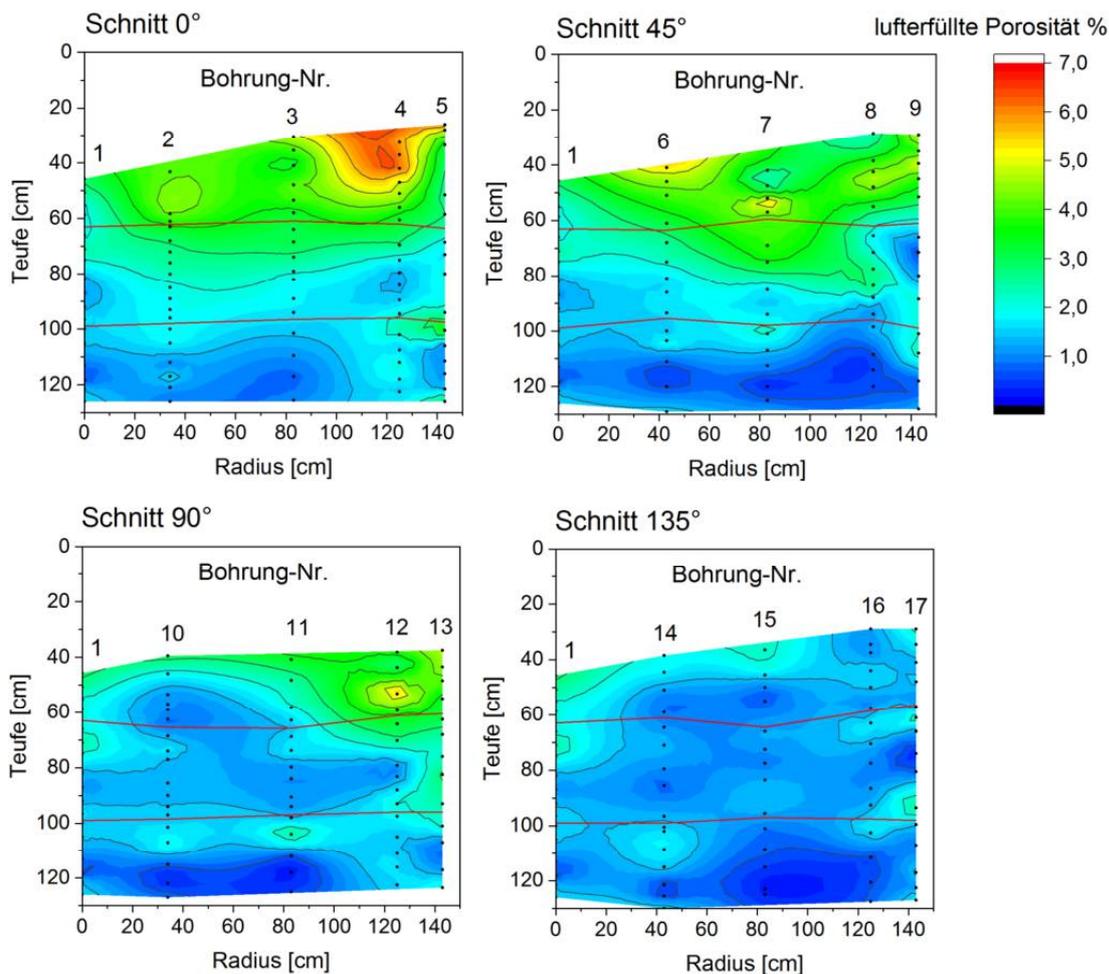


Abbildung 61: Verteilung der luftegefüllten Porosität in den vertikalen Schnitten STV-3

In der Abbildung 62 ist die Verteilung des Verdichtungsgrades mit der Marshall-Dichte als Bezugsdichte abgebildet. Der Verdichtungsgrad nimmt in allen vier Schnitten mit der Tiefe zu. In der untersten Schicht wurde lokal eine MARSHALL-Dichte von $\geq 100\%$ erreicht. Im Schnitt bei 0° , welcher hinsichtlich des Verdichtungsschemas am ungünstigsten lag, wurde in der untersten Schicht an keinem Messpunkt eine MARSHALL-Dichte von $\geq 100\%$ erreicht.

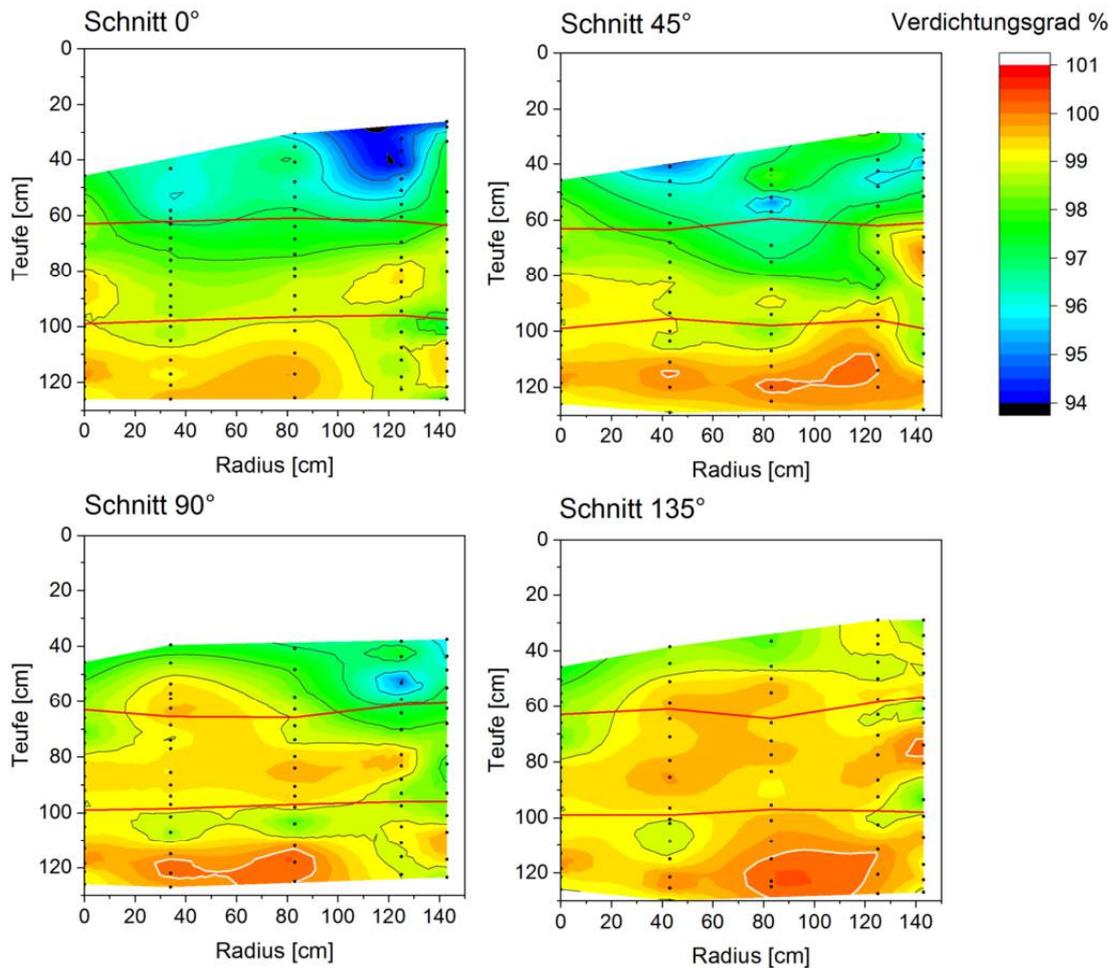


Abbildung 62: Verteilung der erreichten MARSHALL-Dichte in den vertikalen Schnitten STV-3

Zusammenfassend zeigt sich, dass die gefundenen inhomogenen Verteilungen eine Folge des angewandten Verdichtungsschemas sind. Gerade bei den Schnitten, welche bei 0° und bei 90° liegen, ergeben sich in der Darstellung der Porosität, der luftgefüllten Porosität und der MARSCHALL-Dichte vergleichbare Verteilungsmuster über alle 3 Schichten. Die Ungleichmäßigkeiten in der Verdichtung verringern sich mit zunehmender Tiefe. Dies zeigen die horizontalen Schnitte in unterschiedlichen Tiefen (siehe Abbildung 63).

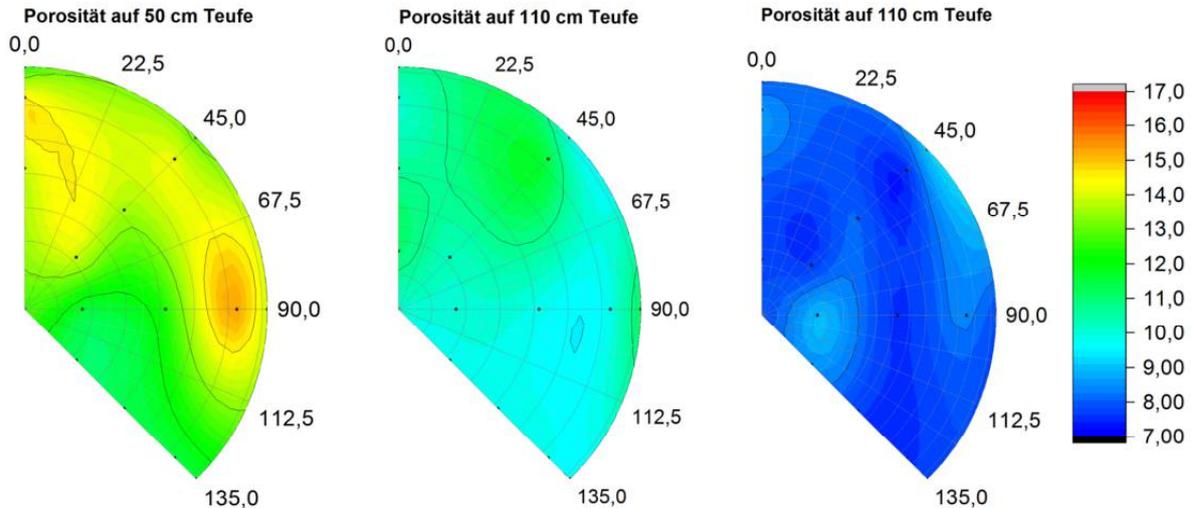


Abbildung 63: Verteilung der Porosität in den horizontalen Schnitten

Die durchschnittliche Porosität in den drei Schichten (Gemischen), wurde unabhängig zur Lage im Verdichtungsschema betrachtet. Damit ergaben sich die in Tabelle 23 genannten Ergebnisse.

Tabelle 23: Gesamtergebnis der 3 verschiedenen Gemische im Vergleich

Rezeptur		STG-2	STG-3	STG-1
Anzahl der Messwerte		84	97	81
Porosität	[%] Mittelwert	8,2	10,4	13,0
	Max.	10,5	12,4	15,9
	Min.	7,2	9,2	10,9
	Spannweite	3,3	3,2	5,0
	Standardabweichung	0,6	0,7	1,3
luffterfüllte Porosität	[%] Mittelwert	1,3	1,8	3,1
	Max.	3,7	3,9	6,4
	Min.	0,3	0,4	0,8
	Spannweite	3,4	3,5	5,8
	Standardabweichung	0,6	0,7	1,4
Verdichtungsgrad bezogen auf die Marschaldichte	[%] Mittelwert	99,3	98,8	97,3
	Standardabweichung	0,7	0,7	1,5

Der Verdichtungsgrad des STG-2 (unterste Schicht) betrug im Mittel 99,3 %. Der Mittelwert des Verdichtungsgrades im STG-3 (zweite Schicht) lag bei 98,8 %. Die Standardabweichung des Verdichtungsgrades war mit 0,7 % in beiden Schichten gleich. Die Standardabweichung ist sehr gering. Dies zeigt, dass die Schichten durch den Impulsverdichter trotz der Verdrückungen homogen verdichtet worden sind.

In der oberen (3.) Schicht aus dem STG-1 wurde ein mittlerer Verdichtungsgrad von 97,3 % bei einer doppelt so hohen Standardabweichung von 1,5 % erreicht. Die hohe Standardabweichung wurde durch noch vorhandene oberflächennahe Auflockerungen verursacht. Wäre die oberste Schicht mit weiterem Salzgrus-Ton-Gemisch überschüttet worden und wiederum mit einem Impulsverdichter verdichtet wurden, so hätte sich auch der Verdichtungsgrad in der Schicht 3 im Mittel erhöht und die Standardabweichung reduziert.

Grundsätzlich verlief die Übertragung des Verdichtungsverfahrens Impulsverdichtung vom Labor in den ersten Feldversuch STV-3 erfolgreich. Durch die bis dahin gesammelte Erfahrung mit drei

verschiedenen Salzgrus-Ton-Gemischen, welche in ihrem Schichtaufbau miteinander interagierten, war eine abschließende Bewertung des eingesetzten Verdichtungsschemas nur bedingt möglich. Hinsichtlich eines optimalen Verdichtungsschemas bestand somit noch ein deutliches Optimierungspotential.

Für die weiteren Untersuchungen wurde nach Festlegung eines Vorzugsgemischs, eine Optimierung des Verdichtungsschemas (Ansatzpunkte und Verdichtungsenergie) vorgenommen.

3.4 Zweiter Feldversuch zur Impulsverdichtung (STV-4)

3.4.1 Allgemeines zum zweiten Versuch

In einem zweiten Feldversuch (STV-4) wurde das Verdichtungsschema weiter optimiert. Zudem wurde der Verdichterfuß des Impulsverdichtungsgeräts so angepasst, dass im Randbereich keine Stellen vorhanden waren, die vom Verdichterfuß nicht erreicht wurden. Gerade die Verdichtung der Randbereiche ist bei einem Schachtverschluss entscheidend, um mögliche Flüssigkeitsdurchtritte im Randbereich bzw. in der Kontaktzone zu verringern. Zudem kann durch eine intensive Verdichtung des Randbereichs auch eine erhebliche Horizontalspannung auf die Auflockerungszone ausgeübt werden, die dadurch weiter komprimiert wird. Infolgedessen wird die Durchlässigkeit der Auflockerungszone ebenfalls verringert.

Der STV-4 war ähnlich aufgebaut wie der STV-3 von 2015 (siehe Abschnitt 3.3). Dabei wurden drei Schichten zu je acht Lagen aus einem Salzgrus-Ton-Gemisch eingebaut. Darüber war eine vierte Schicht aus vier Einzellagen geplant. Diese sollte ebenfalls aus dem Salzgrus-Ton-Gemisch erstellt und anschließend verdichtet werden, um für die dritte Schicht ein optimales Verdichtungsergebnis zu erreichen. Ein schematischer Aufbau ist Abbildung 64 zu entnehmen.

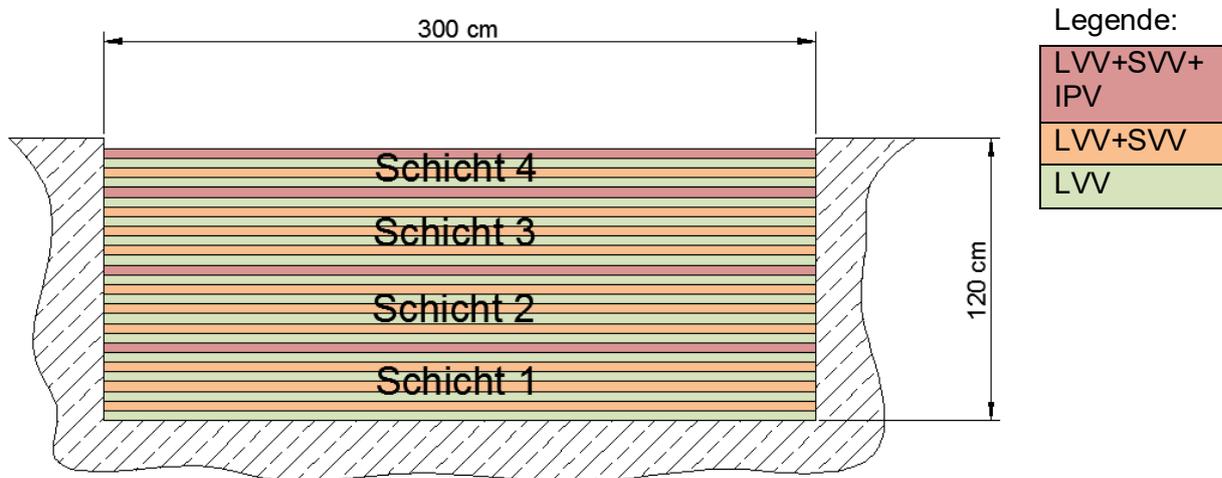


Abbildung 64: Schematischer Schichtaufbau des zweiten Versuches mit dem Impulsverdichter

Aufgrund eines außerordentlich starken Niederschlagsereignisses konnte die dritte Schicht nicht mehr vollständig verdichtet und die vierte Schicht nicht mehr eingebaut werden. Trotz entsprechender Schutzvorkehrungen gegen Regenfälle konnte Regenwasser unter die Abdeckplane gelangen und über die Gesenkoberkante in das Gesenk eindringen. Für die Auswertung des Versuchs wurde daher nur auf die Ergebnisse zurückgegriffen, die aus den unteren beiden Schichten gewonnen wurden. Eine Beeinflussung durch zugetretenes Süßwasser wurde hierdurch weitgehend ausgeschlossen.

Für die Salzgrus-Ton-Mischung wurde das STG-2 mit einem Anteil von 7,8 Ma% Friedländer Ton verwendet. Das Salzgrus-Ton-Gemisch ließ sich in den vorangegangenen Versuchen (STV-1 bis

STV-3) am stärksten verdichten. Untermauern lässt sich dies mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen mit einem Marschallverdichter, wobei das STG-2 die geringste Porosität aller drei getesteten Salzgrus-Ton-Gemische aufwies (siehe Teilbericht zum AP3, Abschnitt 1.2).

3.4.2 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

3.4.2.1 Materialherstellung

Das Gemisch setzte sich aus Steinsalz, Friedländer Ton und Wasser zusammen (vgl. Tabelle 17). Das Salz wurde aus dem Bergwerk Sondershausen der GSES Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH, das Tonmehl (Fimonit®) vom Hersteller Friedland Industrial Minerals GmbH bezogen. Für den Wasseranteil wurde Leitungswasser genutzt. Das Material wurde durch die Firma IBU-tec Advanced Materials AG gemischt. Die Mischarbeiten wurden von Mitarbeitern der TS Bau GmbH und der TU BAF begleitet. Die genaue Zusammensetzung des Schüttgutes ist in Tabelle 24 aufgeführt. Die Kornverteilung der einzelnen Mischgutfractionen sowie des fertigen Mischgutes ist in Abbildung 65 ersichtlich.

Tabelle 24: Zusammensetzung Einbaumaterial

Fraktion	Korngröße	Korndichte	Anteil	Masse für den Versuch (gerundet)
	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[kg]
Salz Überkorn	3,0 bis 10,0	2,168	46,7	9.000
Salz Band 6	0,4 bis 4,0	2,168	19,2	3.700
Salz Band 8	0,1 bis 1,0	2,177	10,6	2.000
Feinsalz	0,03 bis 0,3	2,178	13,0	2.500
Friedländer Ton		2,740	7,8	1.500
Wasser			2,7	500
Summe			100,0	19.200

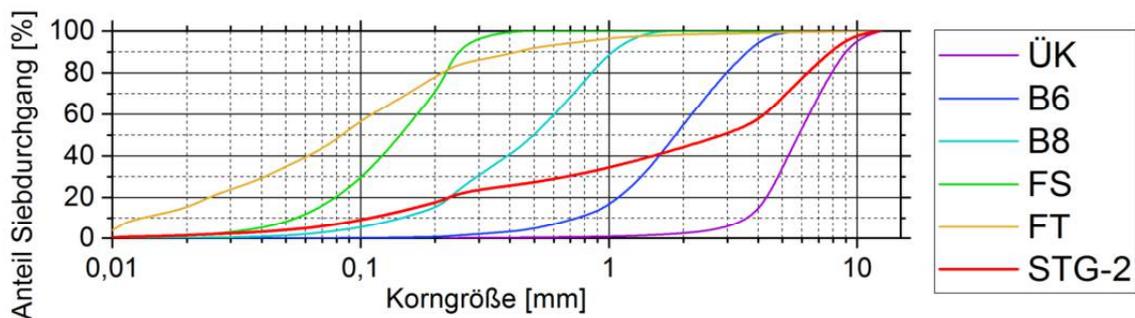


Abbildung 65: Kornverteilung der Mischgutfractionen im STG

Das Einbaumaterial wurde in Big Bags mit Inlay zum Erhalt des Wassergehaltes abgefüllt. Jeder Big Bag wurde mit ca. 643 kg befüllt und enthielt das Material für genau eine Lage. Somit ergaben sich 28 Big Bags für 28 Einzellagen. Als Reserve für Störereignisse (z.B. Beschädigungen beim Transport, Justierung der Mischanlage) sowie für Nachuntersuchungen in Freiberg wurde jeweils ein weiterer Big Bag zurückgestellt. Die Gesamtmenge betrug damit 30 Big Bags mit 19.200 kg.

3.4.2 Materialeinbau und Verdichtung

Der Einbau und der Verdichtungsprozess erfolgten grundsätzlich wie im STV-3. Das Salzgrus-Ton-Gemisch wurde für jede Lage einzeln und nacheinander eingebaut. Dafür wurde je ein mit dem Baustoff befüllter Big Bag im Gesenk entleert und der Baustoff gleichmäßig per Hand über den Querschnitt verteilt (siehe Abbildung 66 und Abbildung 67).



Abbildung 66: Gesenkbefüllung



Abbildung 67: Händische Verteilung des Baustoffs

Jede Lage wurde anschließend mit einer Vibrationsplatte Typ Wacker Neuson DPU 2550H (siehe Abbildung 68) vorverdichtet (leichte Vorverdichtung LVV). Jede zweite Lage wurde zusätzlich mit einer regelbaren Vibrationsplatte Typ Bomag BPR 100/80 D verdichtet (schwere Vorverdichtung SVV) (siehe Abbildung 69).



Abbildung 68: Wacker Neuson DPU 2550H



Abbildung 69: Bomag BPR 100/80 D

Die LVV erfolgte spiralförmig von außen nach innen in zwei Durchgängen. Die SVV erfolgte ebenfalls spiralförmig von außen nach innen in drei Durchgängen, wobei die erste Überfahrt mit halber Amplitude und die zweite sowie dritte Überfahrt mit voller Amplitude durchgeführt wurde.

Die Impulsverdichtung wurde alle acht Lagen bzw. nach Aufbau einer Schicht und nach der Vorverdichtung mit den Vibrationsplatten umgesetzt. Hierfür wurde das Verdichtungsgerät der Firma Terra-Mix bestehend aus einem 9 t schweren Fallhammer, welcher an einen 50 t Hydraulikbagger montiert war, verwendet (gleiches Verdichtungsgerät wie beim STV-3, jedoch anderer Verdichterfuß). Dabei wurde die Fallenergie des Hammers über einen Verdichterfuß in den Untergrund eingeleitet. Die Form des Fußes wurde einem „Bogendreieck“ nachempfunden,

um auch in den Randbereichen des Gesenks eine optimale Verdichtung zu erreichen (siehe Abbildung 70). Der Ausrundungshalbmesser betrug an den Seiten 1,5 m. Dies entsprach genau dem Radius des Gesenkes. Damit konnte der Verdichterfuß bündig an die Innenfläche des Stahlzylinders im Gesenk angelegt werden.

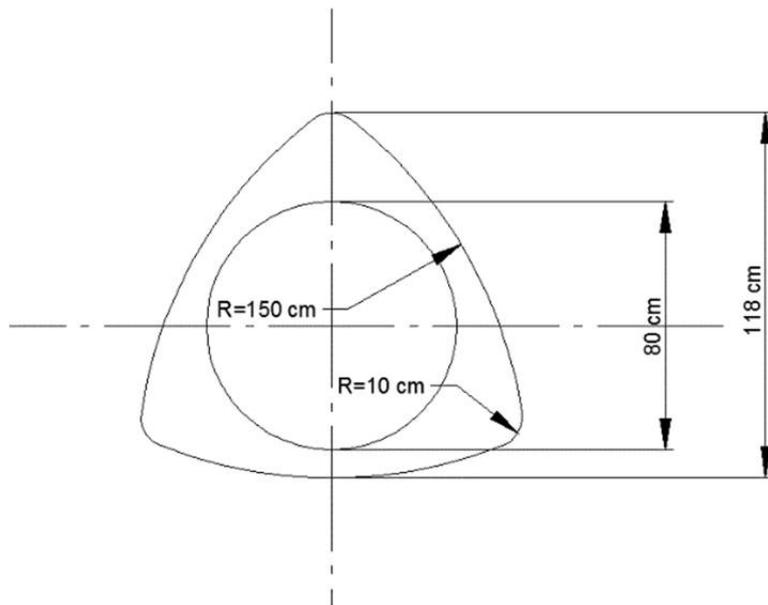


Abbildung 70: Konstruktionsskizze Verdichterfuß

Ungewollte Auflockerungen um den Verdichterfuß, wie sie im ersten Gesenkversuch auftraten, wurden durch Stahlplatten, welche als Gegengewichte bündig an den Fuß angelegt wurden, minimiert (siehe Abbildung 71).



Abbildung 71: Beschwerungsplatten am Impulsverdichter

Die mit der Impulsverdichtung eingebrachte Energie beträgt $32,55\text{ MJ}$ je Schicht. Dies entsprach einer spezifischen Verdichtungsenergie von $15,01\text{ MJ/m}^3$. Für eine gleichmäßige Verteilung der Verdichtungswirkung wurden wieder vier Durchgänge (IPV 1 bis IPV 4) durchgeführt. Das Schema ist grafisch in Abbildung 72 dargestellt. In jedem Durchgang wurde das Verdichtungsgerät nach einem vorgegebenen Schema umgesetzt. Dabei wurden neun Ansatzpunkte angefahren und an jedem Ansatzpunkt mit einer vorgegebenen Schlagzahl „impulsverdichtet“. Nach jedem Durchgang wurde das Verdichtungsschema um $22,5^\circ$ relativ zum Gesenk gedreht.

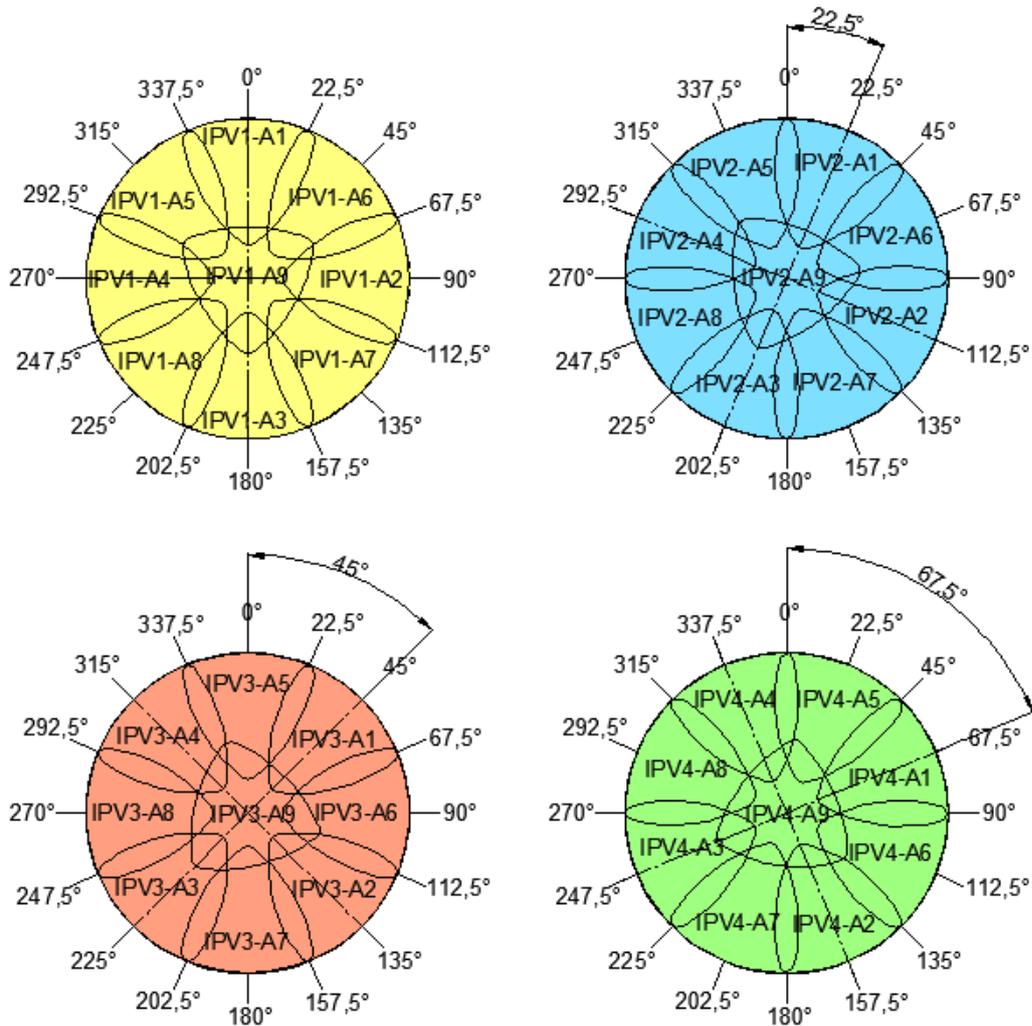


Abbildung 72: Verdichtungsschema Impulsverdichtung

Mit jedem Durchgang wurde die Fallhöhe des Hammers und somit die Fallenergie gesteigert. Hierdurch wurden im ersten Durchgang IPV 1 bei einer Fallhöhe von 0,15 m 8,8 % der Verdichtungsenergie, im IPV 2 bei 0,2 m Fallhöhe 16,6 %, im IPV 3 bei 0,3 m Fallhöhe 24,9 % und im IPV 4 bei 0,6 m Fallhöhe 49,8 % eingebracht. Eine Aufstellung der eingebrachten Verdichtungsenergie ist Tabelle 25 zu entnehmen.

Tabelle 25: Aufstellung der Fallhöhe und der Verdichtungsenergie

Verdichtungsdurchgang	IPV 1	IPV 2	IPV 3	IPV 4
Anzahl Ansatzpunkte	9	9	9	9
Schlagzahl je Ansatzpunkt	24	34	34	34
Verdichtungsenergie je Schlag	0,013 MJ	0,018 MJ	0,026 MJ	0,053 MJ
Verdichtungsenergie je Ansatzpunkt	0,32 MJ	0,60 MJ	0,90 MJ	1,80 MJ
Fallhöhe	0,15 m	0,20 m	0,30 m	0,60 m
Prozentualer Anteil der Gesamtenergie	8,8 %	16,6 %	24,9 %	49,8 %
Eingebrachte spez. Verdichtungsenergie (kumulativ)	1,32 MJ·m ⁻³	3,81 MJ·m ⁻³	7,54 MJ·m ⁻³	15,01 MJ·m ⁻³

Ein Gesamtüberblick über den Verdichtungsablauf ist in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 26: Überblick über den Verdichtungsablauf im STV-4

Schicht	Einbaulage	Bezeichnung	Verdichtung
1 STG-2	8	S3-L8	LWV + SVV+IPV
	7	S3-L7	LWV
	6	S3-L6	LWV + SVV
	5	S3-L5	LWV
	4	S3-L4	LWV + SVV
	3	S3-L3	LWV
	2	S3-L2	LWV + SVV
	1	S3-L1	LWV
2 STG-2	8	S2-L8	LWV + SVV+IPV
	7	S2-L7	LWV
	6	S2-L6	LWV + SVV
	5	S2-L5	LWV
	4	S2-L4	LWV + SVV
	3	S2-L3	LWV
	2	S2-L2	LWV + SVV
	1	S2-L1	LWV
3 STG-2	8	S1-L8	LWV + SVV+IPV
	7	S1-L7	LWV
	6	S1-L6	LWV + SVV
	5	S1-L5	LWV
	4	S1-L4	LWV + SVV
	3	S1-L3	LWV
	2	S1-L2	LWV + SVV
	1	S1-L1	LWV

Nach dem Einbau und der Vorverdichtung der dritten Schicht kam es zu einem Starkregenereignis. Dabei sammelte sich innerhalb kürzester Zeit Regenwasser um das mit einer Schutzplane abgedeckte Gesenk. Der Wasserspiegel stieg über den Stahlrand hinaus an, wodurch ein Teil des Regenwassers in die dritte Schicht eindrang und diese unbrauchbar machte. Das Wasser am Versuchsort und der oberste, geschädigte Bereich wurden entfernt. Die Impulsverdichtung der dritten Schicht sowie der Einbau der vierten Schicht konnte somit nicht mehr durchgeführt werden.



Abbildung 73: Versuchsort nach dem Starkregenereignis



Abbildung 74: Gesenk nach der Entfernung des geschädigten Bereichs

3.4.2.3 Versuchsbegleitende Untersuchungen

Der Versuch wurde während der Einbau- und Verdichtungsarbeiten messtechnisch begleitet. Die Oberfläche jeder Lage wurde nach der leichten sowie der schweren Vorverdichtung an 15 zuvor festgelegten Punkten vermessen. Dabei wurde der Abstand der Lagenoberfläche zur Gesenkoberkante (Stahlrand) aufgemessen und mit Hilfe der Höhendifferenz die kumulative Mächtigkeit des eingebauten Materials bestimmt. Die Schichtmächtigkeit nach der Impulsverdichtung wurde mit der gleichen Methode ermittelt. Die Messpunkte wurden wie schon im STV-3 gewählt.

Weiterhin wurde durch das IfG Leipzig eine Ultraschallsonde im Salzgruß-Ton-Gemisch installiert. Durch die versuchsbegleitende Messung der Ultraschalllaufzeiten konnten zeitabhängig Rückschlüsse auf den Verdichtungszustand des verdichteten Schüttgutes an der Position der Sonde gezogen werden. Die Messsonde wurde in der Ebene der zweiten und dritten Lage der ersten Schicht eingebaut (Abbildung 75 und Abbildung 76).

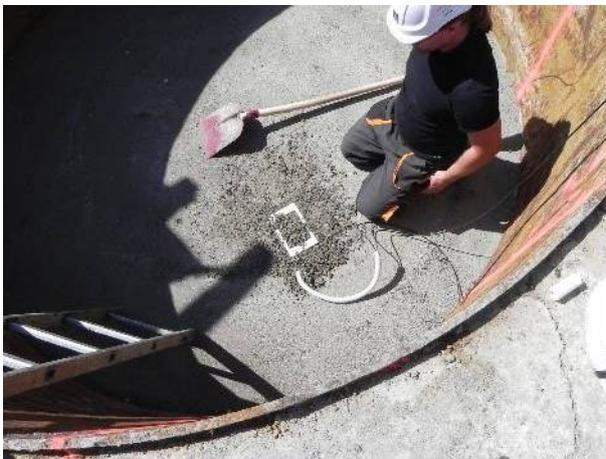


Abbildung 75: Installation der Ultraschallsonde



Abbildung 76: Ultraschallsonde des IfG Leipzig

Die Vorverdichtung mittels Rüttelverdichter erzeugt eine glatte Oberfläche. Die STG-Oberfläche nach der Verdichtung mit dem Verdichterfuß ist ebenfalls sehr glatt. Eine glatte Oberfläche könnte bei einem Schachtverschluss die Zirkulation von Flüssigkeit an den Schichtgrenzen begünstigen. Zudem sind die Festigkeitsparameter (Reibungswinkel und Kohäsion) zwischen zwei Lagen mit glatter Oberfläche ebenfalls kleiner im Vergleich zu den Festigkeitsparametern längs einer Schnittfläche durch das Innere einer Lage. Aus diesem Grund wurde im zweiten Versuch die Oberfläche zwischen zwei Lagen aufgeraut. Zwei Methoden wurden zur Aufrauhung der Oberfläche erprobt. Hintergrund dieser Untersuchung war die Verzahnung der einzelnen Lagen untereinander näher zu bestimmen und ggf. eine bautechnisch einfach umzusetzende Technologie zu entwickeln. Die Aufrauhung erfolgte in einem Teilbereich des Gesenks innerhalb der zweiten Schicht. Dabei wurde einerseits eine rotierende Stahlbürste getestet, die jedoch nur polierend wirkte und sich somit als ungeeignet erwies (vgl. Abbildung 77). Des Weiteren wurde eine Stahlmatte mit einer Maschenweite von 40 mm aufgelegt und mit dem schweren Rüttelverdichter überfahren. Dabei prägte die Matte ein charakteristisches Muster in die Oberfläche ein, welches in Abbildung 78 zu sehen ist. Die Verzahnung der Schichten wurde später an Kernproben weiter untersucht (siehe Abschnitt 3.4.3).

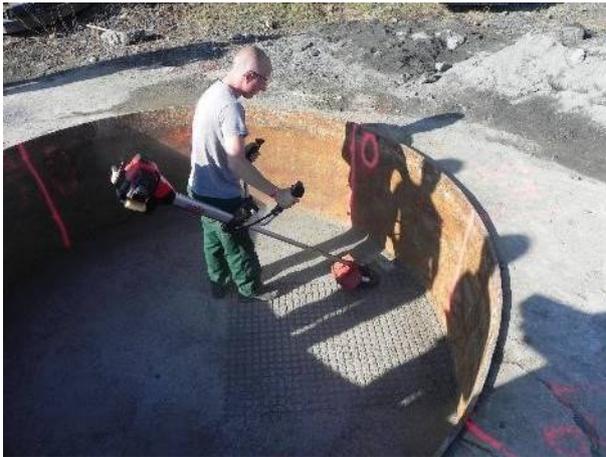


Abbildung 77: Aufrauungsversuch mittels Stahlbürste

Abbildung 78: Aufrauungsversuch mittels Stahlmatte

3.4.2.4 Beprobung des Versuchskörpers

Der Versuchskörper wurde nach Abschluss des Verdichtungsversuchs mittels Kernbohrungen beprobt. Die Bohrungen wurden seiger mit einem Bohrlochdurchmesser von 100 mm bis zur Betonsohle des Gesenks gestoßen. Als Bohrspülung wurde Druckluft verwendet, um den Baustoff nicht anzulösen.

Zur Untersuchung der Porosität des Baustoffkörpers wurden Kernproben aus 18 Bohrungen gewonnen, wobei die Kerne in maximal 10 cm lange Teilstücke zerlegt wurden. Die Dichte der Proben wurde wieder mittels Tauchwägung nach DIN EN ISO 17892-2 bestimmt. Eingesetzt wurde das gleiche niedrigviskose Silikonöl wie im STV-3. Anschließend wurde die Porosität der in Summe 127 Teilstücke vor Ort berechnet. Die Lage der Bohransatzpunkte ist in Abbildung 79 dargestellt.

Weitere Kernproben wurden zur Untersuchung der Scherfestigkeit sowie für die Anfertigung von Dünnschliffen gewonnen. Die Scherfestigkeit wurde am IfG Leipzig bestimmt (siehe Abschnitt 3.4.3.1). Die Dünnschliffe wurden von der BGE TECHNOLOGY GmbH hergestellt und ausgewertet.

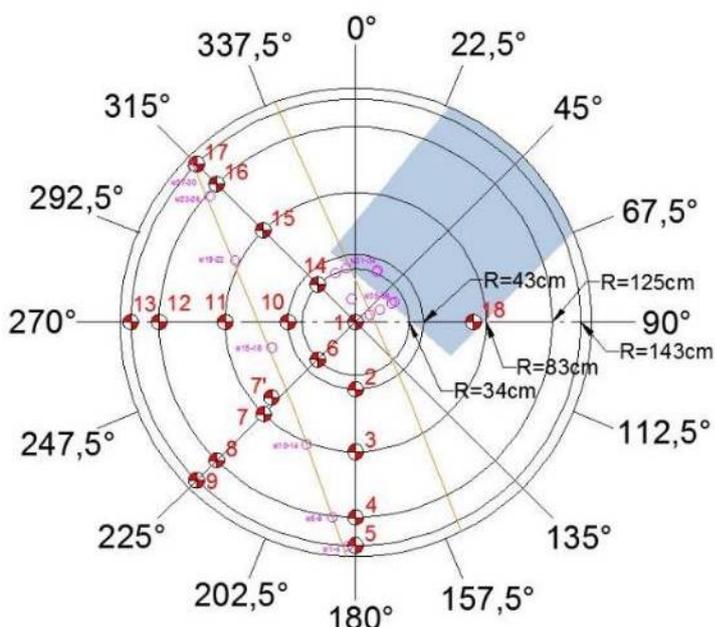


Abbildung 79: Lageplan zur Probennahme

Um einen möglichen Einfluss des Süßwasserzutritts in den Versuchskörper zu bewerten, wurde im Anschluss an die Bohrkampagne ein Baggerschurf angelegt (in Abbildung 79 durch orange Linien angedeutet) und Proben zur Wassergehaltsbestimmung entnommen (lila Ansatzpunkte). Eine Messung der Wassergehalte an den für die Porositätsbestimmung gewonnenen Proben war nicht möglich, da bei der Tauchwägung Silikonöl verwendet wurde.



Abbildung 80. Kernbohrungen zur Probennahme



Abbildung 81: Versuchskörper nach der Beprobung

3.4.2.5 Nachfolgende Laboruntersuchungen

Die Porosität wurde vor Ort unmittelbar nach der Probennahme berechnet. Die Bohrkern wurden zunächst fotografiert und in maximal 10 cm lange Teilstücke zersägt. Die Kernstücke wurden danach einzeln und nacheinander gewogen und das Volumen über Tauchwägung bestimmt. Um zu vermeiden, dass sich Salzbestandteile lösen, wurde Silikonöl als Tauchmedium verwendet. Die Eintauchzeit bis zur Gewichtsablesung wurde mit 180 Sekunden festgelegt, damit sich an der Oberfläche anhaftende Luftblasen, die den Auftrieb der Probe erhöhen und damit das Ergebnis verfälschen, ablösen. Die Ergebnisse der Porositätsbestimmung werden im folgenden Abschnitt erläutert.

Abbildung 82 zeigt die Messapparatur für die Tauchwägung und Abbildung 83 ein für die Tauchwägung präpariertes Kernstück.

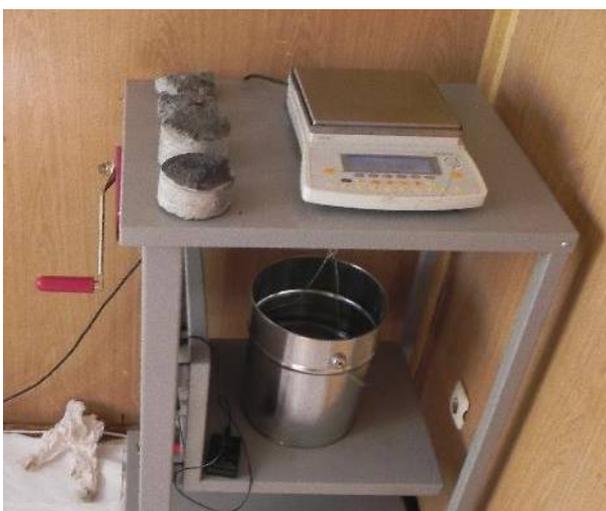


Abbildung 82: Messapparatur für die Tauchwägung



Abbildung 83: Kernstück aus dem Gesenkversuch

Der Wassergehalt wurde an für den Transport in Folie verpackte und eingeschweißte Proben bestimmt. Die Proben wurden bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

3.4.3 Auswertung des Versuchs

3.4.3.1 Porosität

Die Porosität wurde mit Hilfe zwei verschiedener Verfahren bestimmt. Zunächst wurde die Porosität über die Masse des eingebrachten Salzgrus-Ton-Gemisches und das messtechnisch ermittelte Volumen (Gesenkdurchmesser und Höhen der Einbaulagen nach der Verdichtung) berechnet. Dabei ergab sich eine integrale Porosität für die erste Schicht von 19,65 % nach der Vorverdichtung und eine integrale Porosität von 10,88 % nach der Impulsverdichtung. Nach dem Einbau der zweiten Schicht und der zweiten Impulsverdichtungskampagne betrug die Porosität der ersten beiden Schichten 10,90 %. Im Vergleich zum STV-3 aus dem Jahr 2015 wurde das Verdichtungsergebnis damit verbessert (siehe Tabelle 27).

Tabelle 27: Vergleich der Porosität zwischen den Gesenkversuchen von 2015 und 2017

	Gesenkversuch 2015	Gesenkversuch 2017
Porosität der ersten Schicht nach der Vorverdichtung	19,15 %	19,65 %
Porosität der ersten Schicht nach der Impulsverdichtung	12,21 %	10,88 %
Porosität der ersten und zweiten Schicht nach der Impulsverdichtung (Integral über 1. und 2. Schicht)	13,18 %*	10,90 %

* Porosität der Rezepturen STG-2 und STG-3

Über das Tauchwägeverfahren wurde das Volumen der 126 Kernproben gemessen und aus der Trockendichte und dem Wassergehalt die Porosität und die luffterfüllte Porosität ermittelt. Die Proben verteilten sich über ca. ein Drittel der Gesenkfläche und die untersten beiden Schichten des Salzgrus-Ton-Gemischs. Aus der dritten Schicht konnten keine Proben gewonnen werden, da diese nach dem Niederschlagsereignis ausgebaggert wurde.

Im Ergebnis variierte die Porosität zwischen 7,46 % und 14,40 %. Abbildung 84 zeigt die Verteilung der Porosität in vier vertikalen Schnitten. Gut zu erkennen ist die niedrige Porosität im unteren Bereich nahe dem Gesenkrand. Mit zunehmender Entfernung von der Gesenkssohle steigt die Porosität erwartungsgemäß an, da die oberen Bereiche eine geringere Anzahl an Verdichtungsdurchgängen erfahren haben.

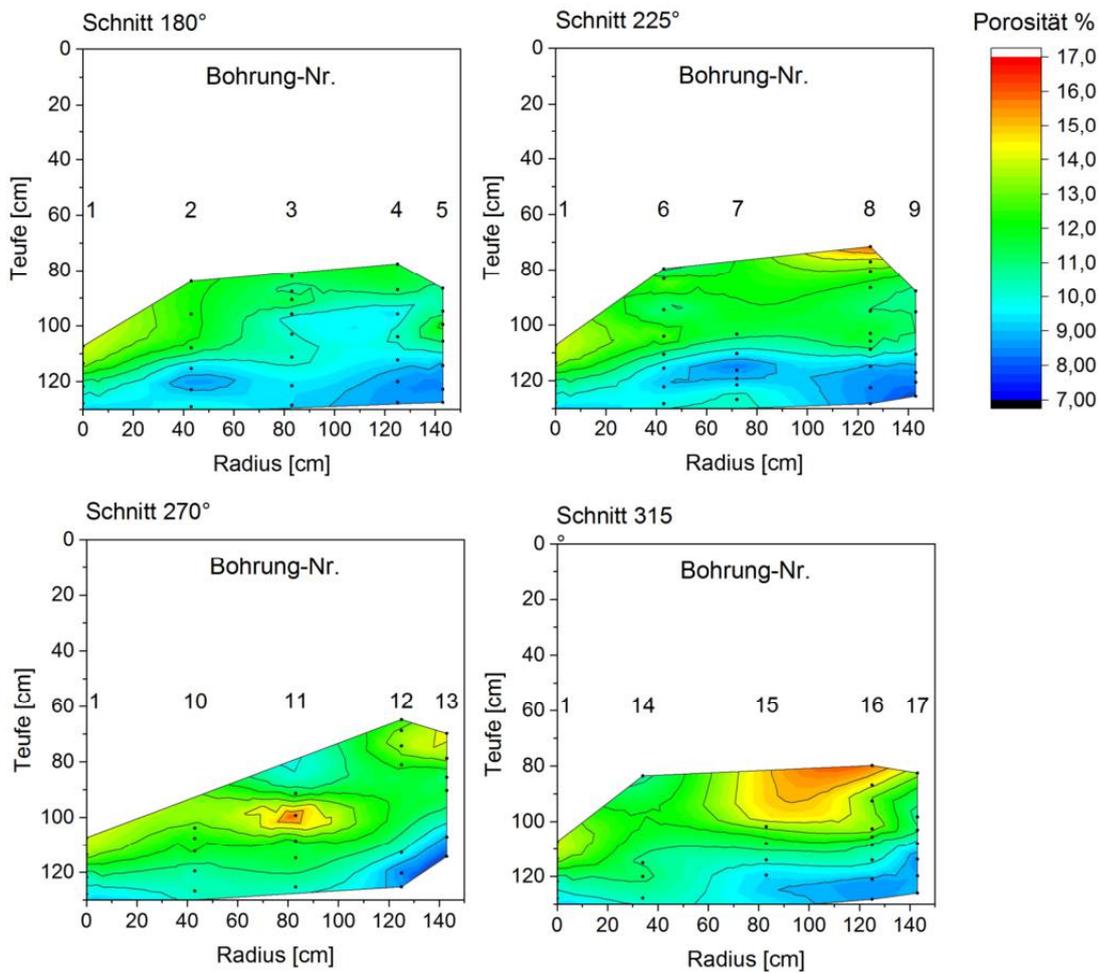


Abbildung 84: Verteilung der Porosität STV-4

Die luftgefüllte Porosität schwankte zwischen 1,14 % und 8,56 %. Die Verteilung der luftgefüllten Porosität ähnelt der Verteilung der Porosität, weist jedoch auch deutliche Unterschiede auf (siehe Abbildung 85). Die luftgefüllte Porosität in den unteren Randbereichen ist gering, während die oberen Bereiche eine höhere luftgefüllte Porosität zeigen. Darüber hinaus sind weitere Bereiche mit sehr geringer luftgefüllter Porosität zu erkennen. An diesen Stellen ist die Gesamtporosität fast ausschließlich auf den Volumenanteil des Wassers zurückzuführen.

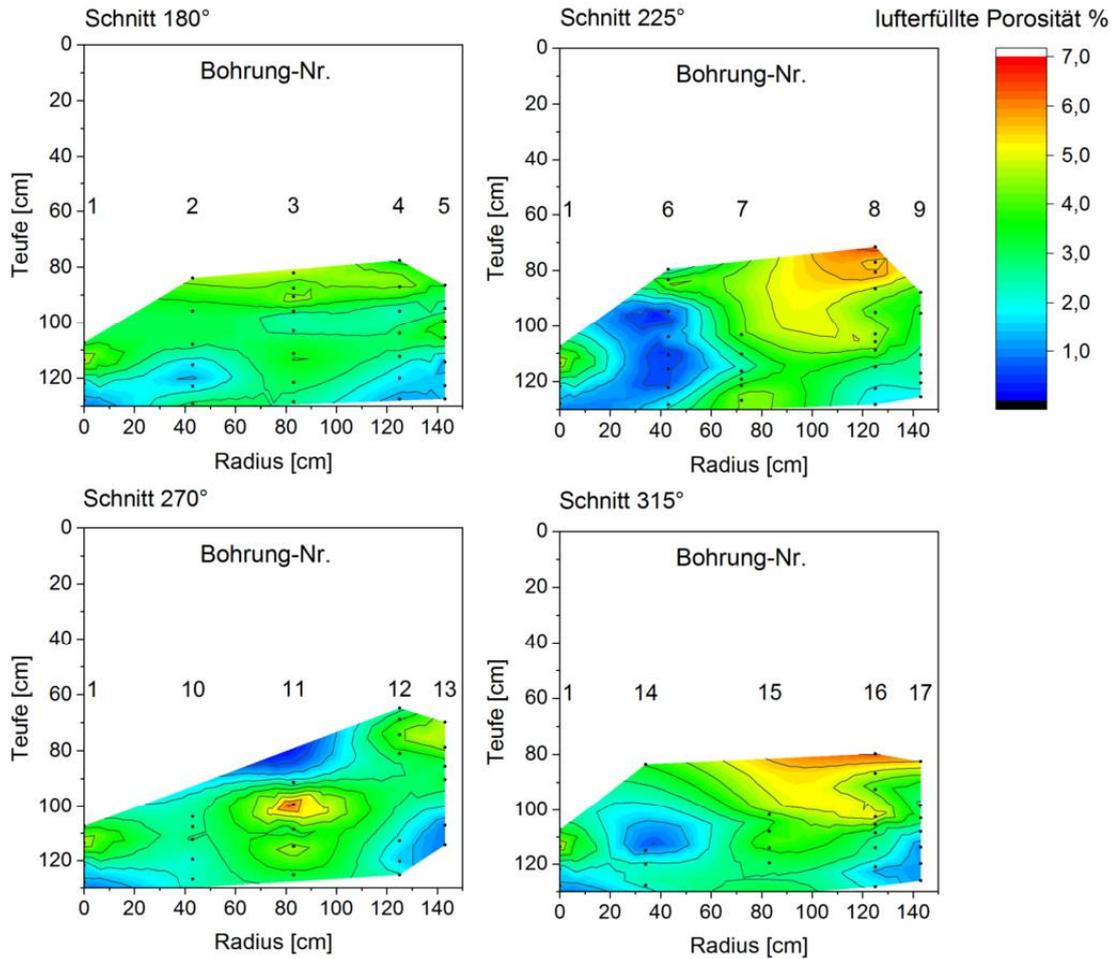


Abbildung 85: Verteilung der Gasporosität STV-4

Der erreichte Verdichtungsgrad bezogen auf die Marshalldichte ist demzufolge in diesem unteren Randbereich bei annähernd 100 %. In Bereichen mit höherer luftgefüllter Porosität und in Bereichen mit höherem Wassergehalt sinkt die Dichte des Materials. Lokal ist dort der Verdichtungsgrad geringer (vgl. Abbildung 86) und liegt teilweise bei unter 92 %.

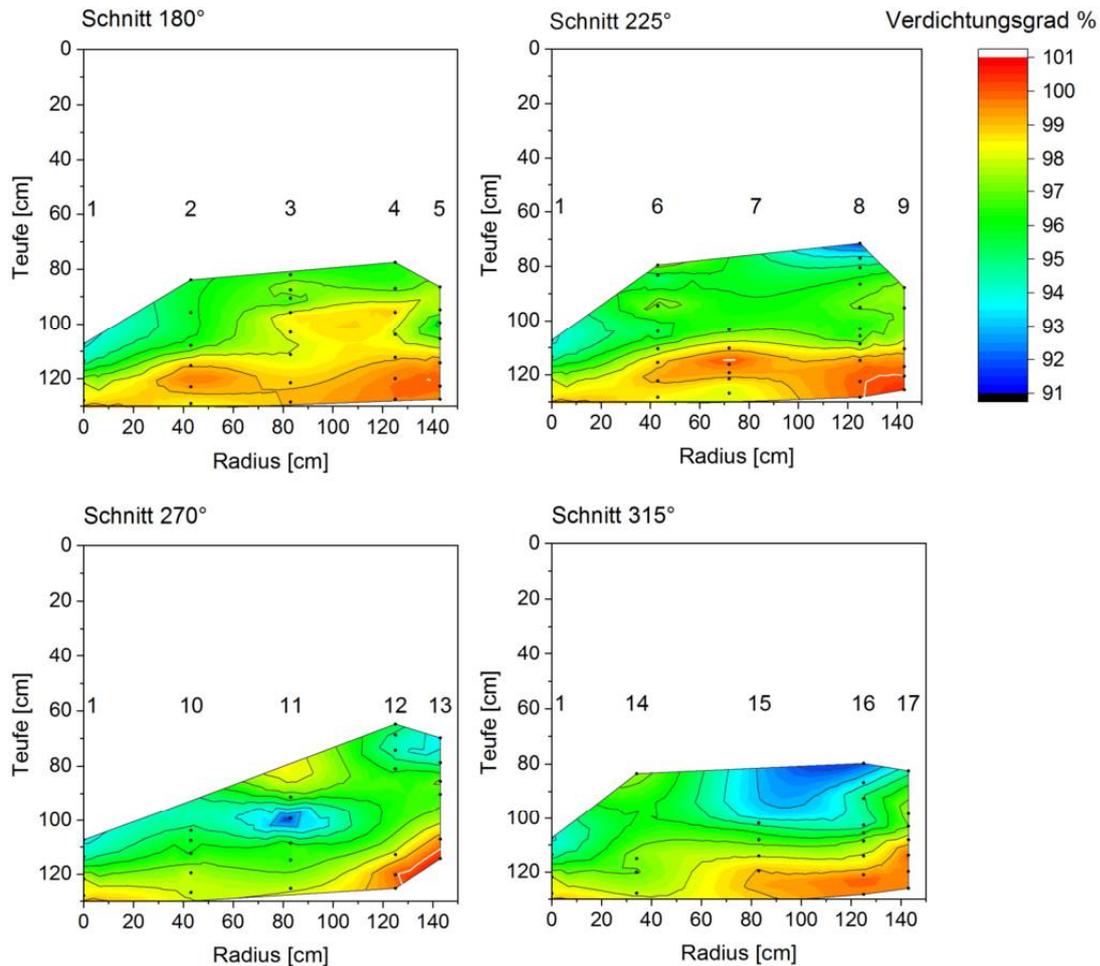


Abbildung 86: Verteilung der erreichten MARSHALL-Dichte in den vertikalen Schnitten STV-4

In Tabelle 28 sind die mittels Tauchwägung ermittelten Werte aus dem STV-3 und dem STV-4 gegenübergestellt. Die Porosität liegt hierbei im STV-4 höher. Die Verdichtung der über der 1. und 2. Schicht liegenden 3. und 4. Schicht führte im STV-3 zu einer weiteren Nachverdichtung des unteren Bereichs, sodass die Porosität von 12,2 % (vgl. Tabelle 27) weiter auf 8,2 % reduziert wurde. Diese Nachverdichtung fehlt im STV-4. Die Ergebnisse aus der Tauchwägung des STV-3 konnten somit nicht reproduziert werden.

Tabelle 28: Vergleich der Messergebnisse zwischen STV-3 und STV-4

Rezeptur		STV-3 (STG-2)	STV-4 (STG-2)
Anzahl der Messwerte		84	126
Porosität	[%]	Mittelwert	8,2
		Max.	10,5
		Min.	7,2
		Spannweite	3,3
		Standardabweichung	0,6
luftegefüllte Porosität	[%]	Mittelwert	1,3
		Max.	3,7
		Min.	0,3
		Spannweite	3,4
		Standardabweichung	0,6
Verdichtungsgrad bezogen auf die Marschaldichte	[%]	Mittelwert	99,3
		Standardabweichung	0,7

3.4.3.2 Ergebniss der Dünnschliffuntersuchungen

Zur Charakterisierung der Porenraumverteilung wurden von der BGE TECHNOLOGY GmbH Dünnschliffe aus einer Kernprobe angefertigt und untersucht (vgl. Anhang A: Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben). Das ca. 11 cm lange Kernstück stammte aus den untersten drei Lagen der ersten Schicht (Teufe 122 cm bis 133 cm) und wurde hierfür entlang der vermuteten Lagengrenzen in drei Bereiche eingeteilt. Von jedem Bereich wurde ein horizontaler Schnitt angelegt. Die Probe ist in Abbildung 87 zu sehen.



Abbildung 87: Kernprobe für die Dünnschliffanalyse

Zur Präparation wurde ein blau eingefärbtes niedrigviskoses Harz verwendet, dass in die Porenräume eindrang und dort erstarrte.

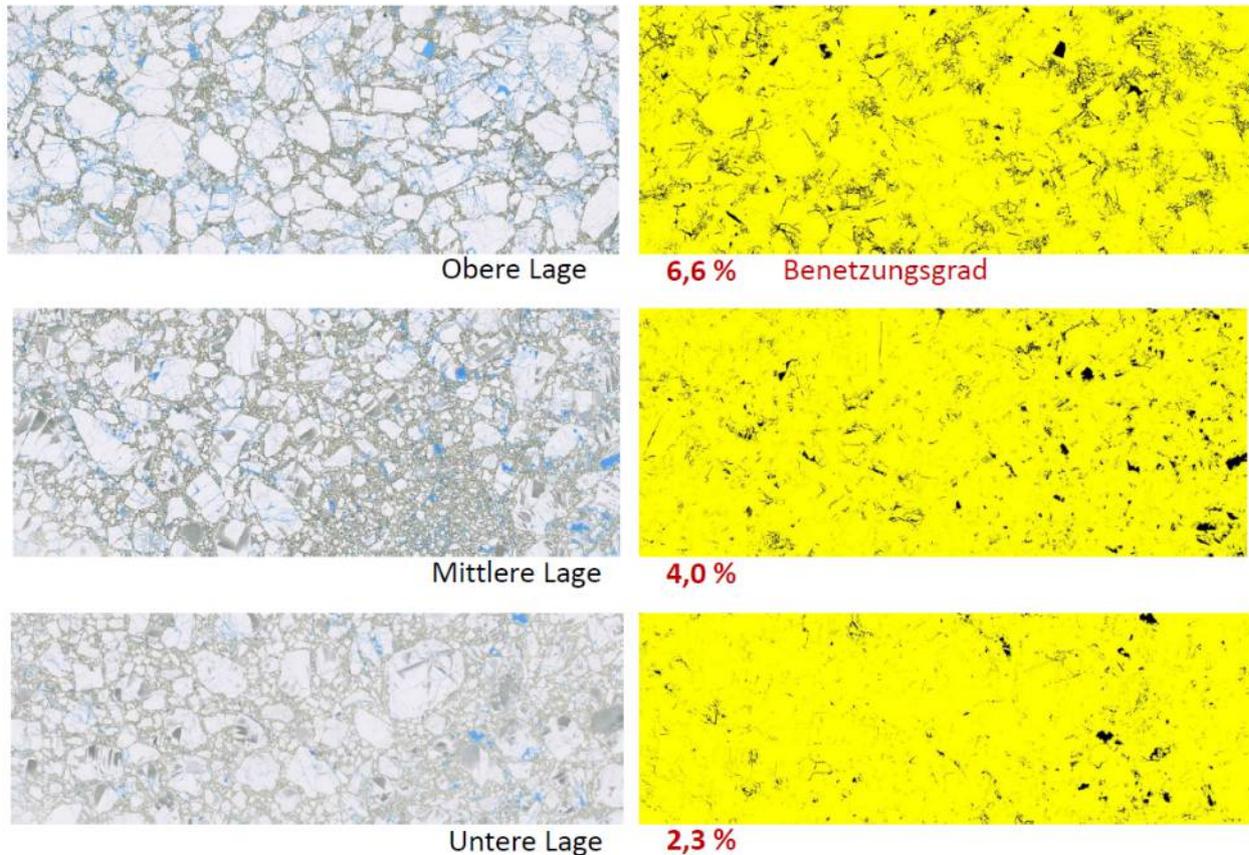


Abbildung 88: Horizontale Dünnschliffe zur Untersuchung der Porenraumverteilung

Auf der linken Seite der Abbildung 88 sind die weißen Salzkörner erkennbar. Die grauen Partien stellen den im Salzgrus-Ton-Gemisch enthaltenen Ton dar. Das blau gefärbte Harz füllt die freien Porenräume aus. Auf der rechten Seite wurde mit Hilfe einer Falschfarbenaufnahme der optische Effekt verstärkt, um die Verteilung der Porenräume zu verdeutlichen. Diese wurden schwarz dargestellt. Der Hintergrund, d.h. die festen Bestandteile des Salzgrus-Ton-Gemisches wurden gelb überblendet.

Anschließend wurde der relative Flächenanteil der Porenräume durch digitale Bildverarbeitung bestimmt. Der relative Flächenanteil der Porenräume betrug 2,3 % von der Gesamtfläche in der untersten Lage. In der zweiten Lage wurden 4,0 % ermittelt und in der dritten 6,6 %. Dieser relative Flächenanteil kann als luftgefüllter Porenraum interpretiert werden. Er entspricht näherungsweise der luftgefüllten Porosität der Probe. Die Werte von 2,3 % bis 6,6 % sind vergleichbar mit den Ergebnissen der Porositätsbestimmung und bestätigen die niedrige luftgefüllte Porosität des Versuchskörpers.

Um den Einfluss des Starkregenereignisses und damit die Schädigung des Versuchskörpers besser charakterisieren zu können, wurde eine weitere Probe analysiert. Diese neue Probe aus einem 13 cm langen Kernstück entstammt einem lokal durchfeuchteten Bereich des Gesenks (Teufe 108 cm bis 121 cm). Das obere Drittel der Probe zeigte einen Benetzungsgrad von 18,1 %. Eine signifikante Schädigung durch den Süßwasserzutritt ist somit offensichtlich. Wenige Zentimeter tiefer im unteren Probenabschnitt wurde ein Benetzungsgrad von 7,3 % bestimmt, was darauf hindeutet, dass mit zunehmender Tiefe keine Schädigung mehr auftrat.

3.4.3.3 Bewertung des modifizierten Verdichtungsgeräts

Im Rahmen des ersten Gesenkversuchs im Jahr 2015 zeigte sich eine ungleichmäßige Verteilung der Verdichtungswirkung (siehe Abbildung 89). Die Ursache wurde auf die Kreisgeometrie des Verdichterfußes zurückgeführt und bedingt stärker verdichtete Zonen im Zentrum des Gesenks sowie weniger stark verdichtete Areale am Gesenkrand.

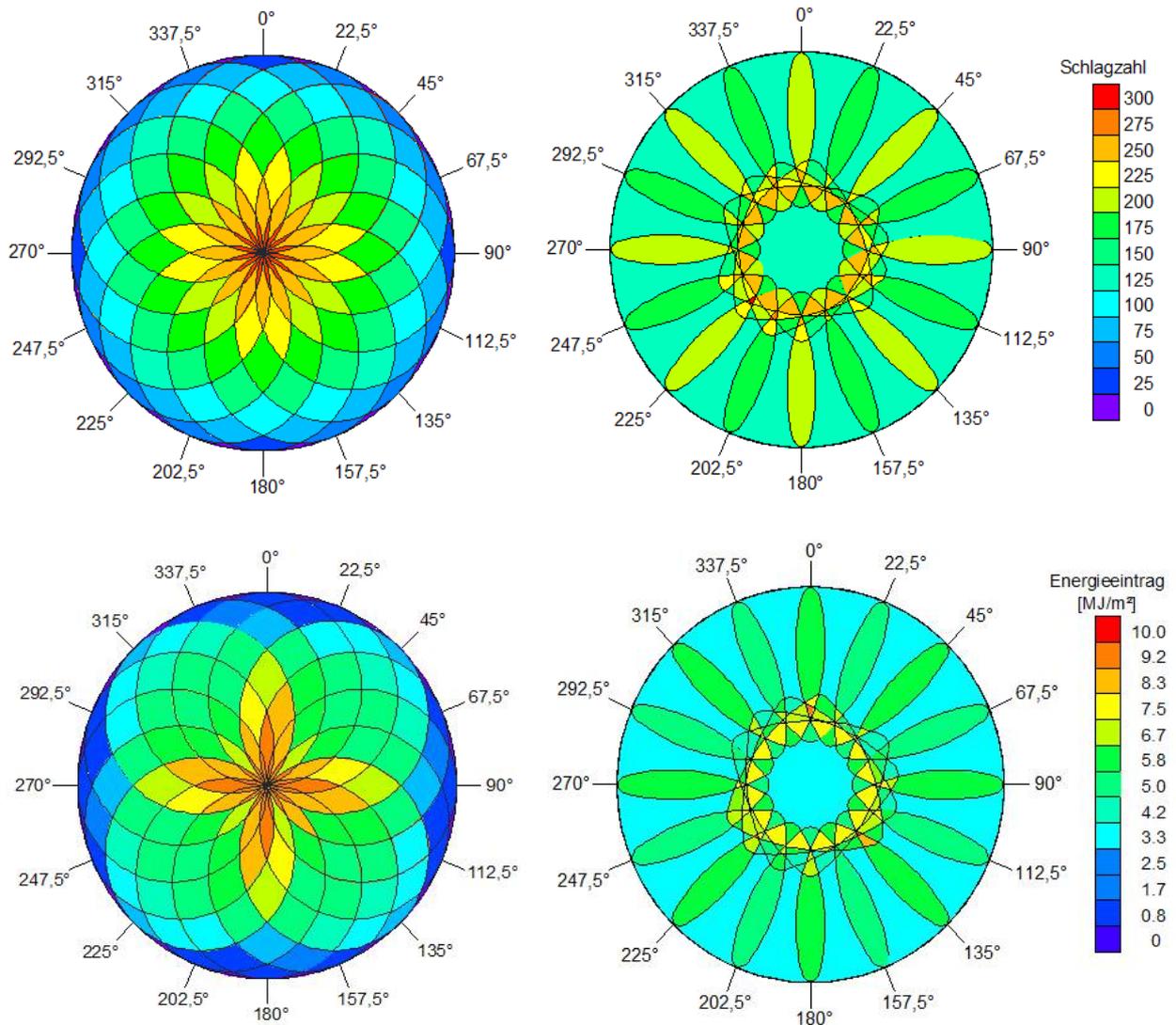


Abbildung 89: Vergleich der Auswirkungen der Fußgeometrie

Besonders deutlich wird der Unterschied im Vergleich eines einzelnen Impulsverdichtungsdurchgangs (Abbildung 90 und Abbildung 91). Im Versuch von 2015 wurde der Effekt durch Drehung des Verdichtungsschemas um 22,5° mit jedem weiteren Impulsverdichtungsdurchgang teilweise kompensiert. Dennoch blieben weniger stark verdichtete Bereiche erhalten. Zur Vergleichmäßigung des Energieeintrags wurde die Fußgeometrie 2017 angepasst und die Kreisform durch ein Bogendreieck ersetzt, welches bündig an die Stahlwandung des Gesenks angelegt wurde. Infolgedessen wurde der gesamte Querschnitt bedeckt und insbesondere die Verdichtung der Randbereiche verbessert.



Abbildung 90: Bauzustand der ersten Schicht nach dem ersten Impulsverdichtungsdurchgang im Gesenkversuch 2015



Abbildung 91: Bauzustand der ersten Schicht nach dem ersten Impulsverdichtungsdurchgang im Gesenkversuch 2017

Ein weiteres Problem ergab sich aus Auflockerungseffekten um den Verdichterfuß. Durch die hohen Schlagenergien wurde das Baumaterial zum Teil seitlich verdrückt. Im jeweils vierten Impulsverdichtungsdurchgang einer jeden Schicht, welche die größte Fallhöhe des Fallgewichts und damit den höchsten Energieeintrag aufwies, zeigten sich schollenartige Abbrüche an der Oberfläche. Dies führte zu einer Wiederauflockerung des Versuchskörpers an den Schichtoberflächen, wie sie in Abbildung 92 und Abbildung 93 zu erkennen sind.



Abbildung 92: Zustand der Oberfläche nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2015



Abbildung 93: Schollenartige Ablösungen nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017

Um die oberflächige Auflockerung zu reduzieren, wurde im Gesenkversuch 2017 ein System aus Beschwerungsplatten getestet. Diese 10 cm starken Stahlplatten wurden während der Verdichtung um den Verdichterfuß positioniert und brachten durch ihr Eigengewicht eine Gegenlast auf (siehe Abbildung 94).



Abbildung 94: Beschwerungsplatten zur Reduktion der oberflächigen Auflockerungen während der Impulsverdichtung

Während des ersten und zweiten Impulsverdichtungsdurchgangs einer jeden Schicht wurde die Auflockerung und Schollenbildung durch die aufgelegten Stahlplatten deutlich verringert. Für den dritten und vierten Impulsverdichtungsdurchgang, welche höhere Verdichtungsenergien in den Versuchskörper einleiteten, stellte sich die Auflast als nach wie vor zu gering heraus. Es traten abermals Verdrückungen und Bruchschollen auf (siehe Abbildung 95). Der Verdichterfuß wurde mit hoher Energie in das Material eingestanzt und hinterließ bis zu 8 cm tiefe Abdrücke (siehe Abbildung 96). Dadurch lagen die Beschwerungsplatten nicht mehr mit ihrer gesamten Fläche auf und verloren teilweise ihre Auflastfunktion.



Abbildung 95: Zustand der Oberfläche nach der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017



Abbildung 96: Stanzeffekt der Impulsverdichtung im Gesenkversuch 2017

3.4.3.4 Auswertung der Ultraschallmessung

Der Versuch wurde vom IfG Leipzig mit Hilfe einer Ultraschallmesssonde begleitet. Die Sonde wurde nahe der Gesenksohle positioniert und erfasste die Wellenlaufzeiten während der Vor- und Impulsverdichtung. So konnte das Materialverhalten lokal in der ersten Schicht beobachtet werden und Rückschlüsse auf die Nachverdichtung dieser Stelle bei der Verdichtung der zweiten Schicht gezogen werden.

Die Vorverdichtung mittels Rüttelverdichter führte zu einer Verkürzung der Laufzeiten von ca. 115 μs auf 105 μs , was den Verdichtungseffekt widerspiegelt. Durch den ersten und zweiten

Impulsverdichtungsdurchgang reduzierte sich die Laufzeit noch einmal deutlich auf unter 90 μs . Mit Ende des dritten und Beginn des vierten Impulsverdichtungsdurchgangs stieg die Wellenlaufzeit wieder auf rund 95 μs an. Anschließend schien sich das Material wieder zu konsolidieren, wobei sich die Laufzeit mit dem Einbau und der Vorverdichtung der darüber befindlichen zweiten Schicht bei ca. 84 μs einpegelte. Die Impulsverdichtung der zweiten Schicht führte vorübergehend zu neuen Veränderungen der Laufzeit. Die Laufzeit behielt aber ihr Niveau bei. Das Laufzeitdiagramm der Ultraschallmessung ist in Abbildung 97 aufgeführt.

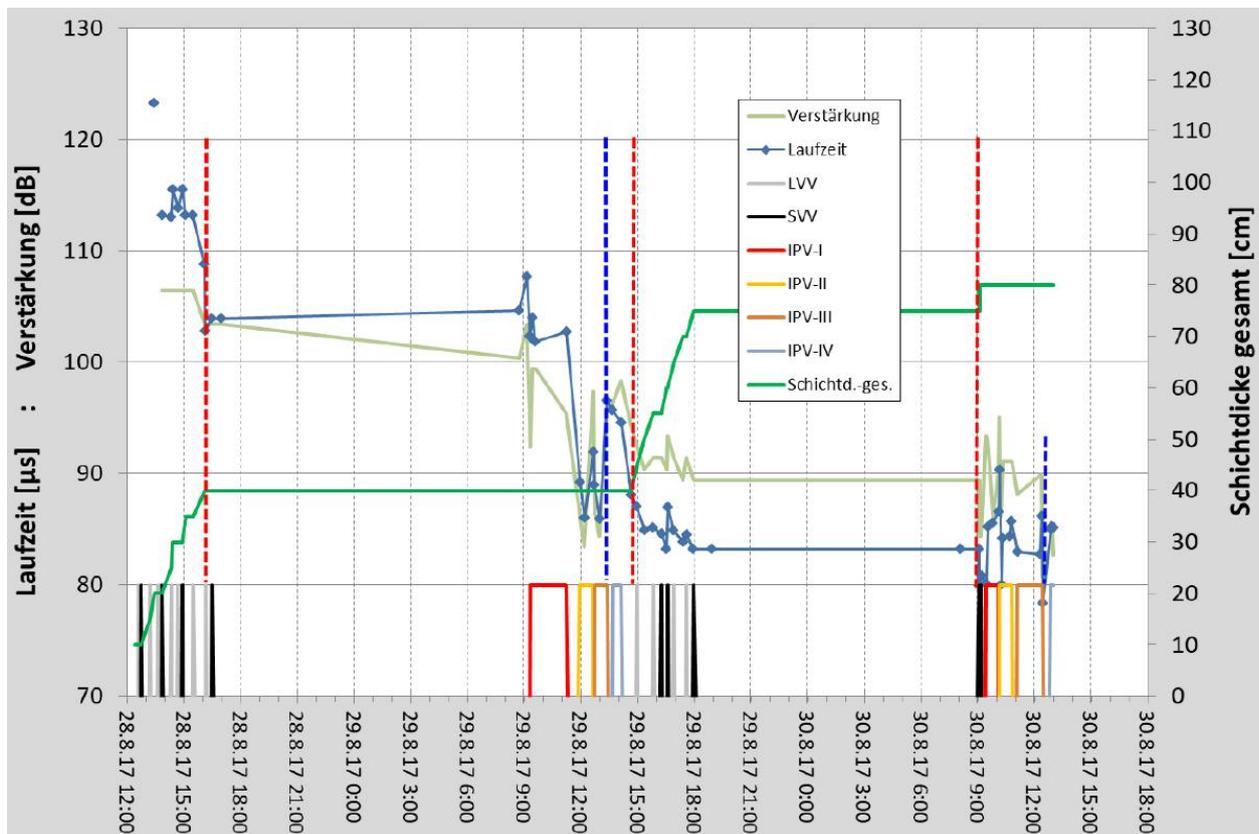


Abbildung 97: Laufzeitdiagramm der Ultraschallmessung

Die Ultraschallmessung deutet darauf hin, dass die Wellenlaufzeit mit dem dritten Impulsverdichtungsdurchgang annähernd ein Minimum erreichte. Da die Wellenlaufzeit von der Dichte des Mediums abhängt, wird davon ausgegangen, dass ein weiterer Energieeintrag über den dritten Impulsverdichtungsdurchgang hinaus zu keiner spürbaren Verdichtung des Baustoffs führte. Das bedeutet, dass für ein optimales Verdichtungsergebnis unter Feldbedingungen ein spezifischer Energieeintrag von $< 15 \text{ MJ/m}^3$ benötigt wird.

3.4.3.5 Betrachtung der Schicht- und Lagengrenzen

Die Vor- und Impulsverdichtung des Versuchskörpers erzeugte an den Lagen- und Schichtgrenzen glatte Ebenen. Diese Ebenen lassen eine schlechte Verzahnung der einzelnen Lagen untereinander vermuten.

Zunächst wurden die für die Tauchwägung vorgesehenen Kernproben begutachtet. Exemplarisch sind die Kerne der Kernbohrungen 3 und 4 in Abbildung 98 dargestellt.



Abbildung 98 Kernproben aus den Kernbohrungen 3 und 4



Abbildung 99: Glatte Bruchfläche entlang einer Lagengrenze



Abbildung 100: Rauhe Bruchfläche an einer Kernprobe

In Einzelfällen brachen die Kerne entlang der Lagengrenzen sauber ab und hinterließen eine glatte Oberfläche (siehe Abbildung 99). Generell zeigte sich jedoch keine Tendenz zum bevorzugten Abscheren der Kernstücke entlang der Lagen- oder Schichtgrenzen. Häufig brachen die Kerne schräg und an Stellen, an denen keine Grenzen vermutet wurden. Des Weiteren konnten Kernstücke gewonnen werden, die sich über mehrere Lagen erstreckten und intakt blieben.

Zwei Kernstücke wurden beim IfG Leipzig einem direkten Scherversuch unterzogen. Die erste Probe wurde innerhalb der Matrix einer Lage abgeschert. Die zweite Probe wurde hingegen entlang einer Schichtgrenze belastet. Die Normalspannung betrug bei beiden Proben 0,25 MPa. Die Scherfestigkeit in der Matrixebene wurde mit 0,71 MPa ermittelt. Dem Gegenüber lag die Scherspannung an der Schichtgrenze bei 0,49 MPa und damit signifikant niedriger.

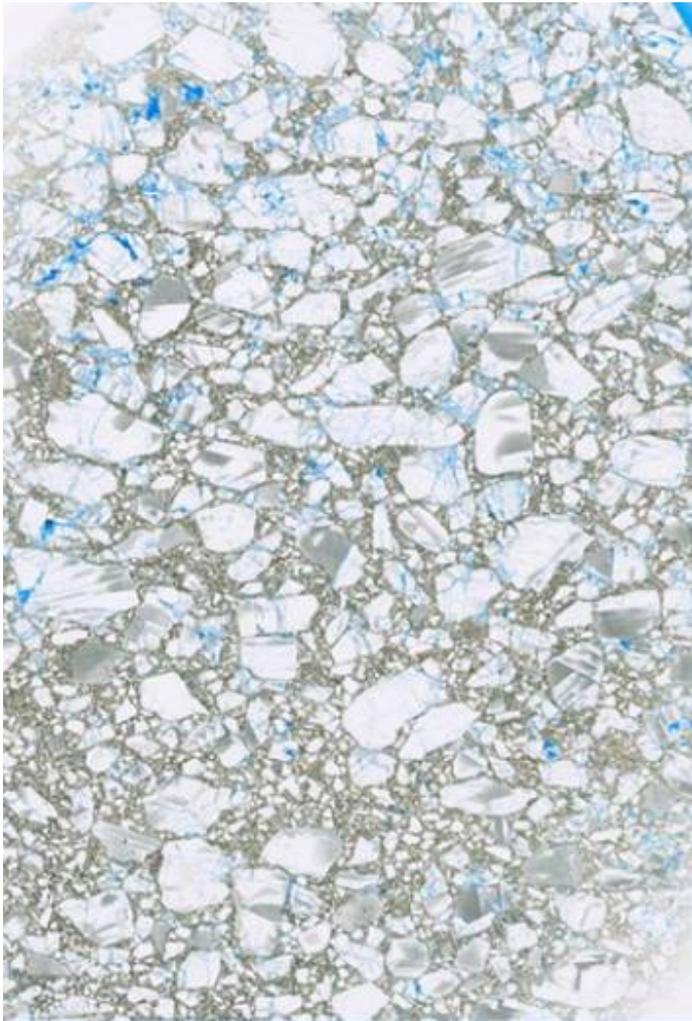


Abbildung 101: Vertikaler Dünnschliff durch eine Kernprobe über drei Lagen

Da jedoch lediglich zwei Proben untersucht wurden, kann keine generelle Aussage zur Scherfestigkeit getroffen werden. Das Ergebnis zeigt aber, dass lokal Zonen auftreten, in denen die Scherfestigkeit herabgesetzt ist. Da die Bruchflächen der Probe mit Schichtgrenze rau und unregelmäßig verliefen, kann die niedrigere Scherfestigkeit nicht auf die geringere Verzahnung zurückgeführt werden. Vermutlich nehmen auch der lokale Wassergehalt und die Kornertrümmerung an der Schichtobergrenze Einfluss auf das Materialverhalten.

Ergänzend wurde von der BGE TEC ein vertikaler Dünnschliff auf erkennbare Lagengrenzen untersucht. Durch die ca. 12 cm lange Probe verliefen mutmaßlich zwei Lagengrenzen, die in Abbildung 101 jedoch nicht zu erkennen sind. Vielmehr greifen die Salzkörner ineinander und bilden mit dem Ton eine feste Matrix (vgl. Anhang A: Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben).

3.5 Zusammenfassende Wertung zum Arbeitsschritt 4.1

Für Füllsäulen aus verdichtetem Steinsalz wurde im AP3 des Vorhabens ELSA – Phase 2 die Korngrößenverteilung und der Wassergehalt von Salzgrus-Ton-Gemischen optimiert und mit Referenzmaterialien aus dem Vorhaben REPOPERM verglichen. Für diese STG wurden verschiedene Verdichtungsverfahren in vier Feldversuchen evaluiert.

Die nachfolgenden Schlussfolgerungen werden aus den Ergebnissen der Abschnitte 3.2 Konventionelle Verdichtung von Salzgrus-Ton-gemischen, 3.3 Erster Feldversuch zur Impulsverdichtung (STV-3) und 3.4 Zweiter Feldversuch zur Impulsverdichtung (STV-4) unter Beachtung der Ergebnisse der Laboruntersuchungen (Teilbericht zum AP 3) abgeleitet:

- Durch die Impulsverdichtung wurden sehr hohe spezifische Verdichtungsenergien eingebracht. Unter den Bedingungen der Gesenkversuche konnte eine Porosität von < 10 % sicher erreicht werden. Allerdings war es nicht möglich, unter den gegebenen technischen Umständen eine spezifische Verdichtungsenergie > 8 MJ/m³ ohne sekundäre negative Effekte (Wiederauflockerung im Randbereich) sinnvoll einzubringen. Bei hoher Intensität (viele Schläge auf der gleichen Position) kann es zu Wiederauflockerungen im Randbereich kommen. In einer zukünftigen Anwendung muss dieser Punkt erkannt werden. Alternativ muss das Gerät öfter umgesetzt werden, was aber die Verdichtungszeit und den Arbeitsaufwand enorm erhöht. Eine Vorverdichtung mit leichterem Verdichtungsgerät ist zwingend erforderlich, um seitliche Verdrückungen (ausweichen des Materials) zu minimieren.
- Die Ergebnisse der Laborversuche im Marshallgerät können ein Maßstab für die in situ erreichbare Porosität sein. Eine Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf die in-situ-Bedingungen ist gut möglich. Allerdings wird in situ nur unter günstigen Bedingungen die gleiche Dichte, wie im Laborversuch erreicht. Für eine konservative Bewertung sollte bei gleicher eingebrachter spezifischer Verdichtungsenergie von einer in situ erreichbaren Dichte in Höhe von ca. 97 % der im Marshallgerät ermittelten Dichte ausgegangen werden.
- Unter den gegebenen Bedingungen ist mit der getesteten Rezeptur STG-2 (OBSM) der Eintrag einer spezifischen Verdichtungsenergie bis 7,54 MJ/m³ ausreichend. Unter diesen Bedingungen kann eine Porosität von ca. 9 % sicher erreicht werden. Bei einer höheren spezifischen Verdichtungsenergie findet keine weitere Verbesserung statt.
- Nach den Laborergebnissen (siehe Teilbericht zum AP3) kann bei einer moderaten spezifischen Verdichtungsenergie von 3 bis 5 MJ/m³ mit der Tonreichen Rezeptur STG-1 (EBSM) bei dem Wassergehalt von 5,1 % bei qualitätsgerechter Durchmischung bereits eine Porosität von ca. 11 % erreicht werden. Die luftegefüllte Porosität beträgt dann 0,9 %. Dieser Wert weist darauf hin, dass bei dieser Mischung mit der eingetragenen Verdichtungsenergie eine Maximalverdichtung erreicht ist, da eine luftegefüllte Porosität von 0,9 % nicht weiter verringert werden kann. Die Poren stehen dann nicht mehr in Verbindung miteinander, so dass die Luft nicht entweichen kann.
- Bei der Verdichtung der obersten Schicht werden zwangsläufig die darunterliegenden Schichten nachverdichtet. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf das Materialgefüge aus, da v.a. oberflächlich aufgelockerte Bereiche (technologisch bedingte Verdrückungen seitlich des Verdichterfußes) wieder kompaktiert werden. Die Wirkungstiefe dieser Nachverdichtung ist materialabhängig und wurde nicht abschließend für das verwendete Materialgemisch bestimmt.

- Obwohl der Einsatz der vorliegenden Verdichtungseinheit (ohne Bagger) mit technischen Anpassungen zur Führung der Verdichtungseinheit in einem Schacht durchaus denkbar ist [Knorr 2013], wird für den zukünftigen Einsatz im Schacht empfohlen, das Fallgewicht auf ca. 2 t zu verringern und im Ausgleich dazu die Fallhöhe auf ca. 1,5 bis 2 m zu erhöhen. Dies würde nach mündlichen Informationen der Firma TerraMix den Anbau der Verdichtungseinheit an eine kompaktere fahrbare Einheit mit Hydraulikaggregat ermöglichen. Ein derartiges Gerät könnte nach dem Baukastenprinzip aus vorhandenen Baugruppen zusammengestellt werden. Da dies weitere finanzielle Aufwendungen erfordert, die nicht Inhalt des vorliegenden FuE-Vorhabens waren, wurde auf die Entwicklung eines neuen Verdichtungsgerätes verzichtet.
- Solange ein im Schacht flexibel einsatzfähiges, kompaktes und unter diesen Bedingungen getestetes Impulsverdichtungsgerät nicht verfügbar ist, kann in der praktischen Umsetzung das vorgeschlagene Salzgrus-Ton-Gemisch nur mit konventionellen Rüttelplatten auf eine Porosität von ca. 15 % verdichtet werden. In diesem Fall soll die Rezeptur STG-1 (EBSM) bevorzugt werden, da schon mit einer geringen spezifischen Verdichtungsenergie eine vergleichbare Porosität von 15 % erreichbar ist. Dabei wird zuerst mit einer leichten Rüttelplatte mit unter 200 kg Betriebsgewicht bei einem spiralförmigen Überfahren der Verdichtungsfläche mit zwei Überfahrten vorverdichtet. Danach wird mit einer schweren Vibrationsplatte mit mindestens 600 kg Betriebsgewicht und einer regelbaren Amplitude nachverdichtet. Auch dabei reichen zwei spiralförmige Überfahrten aus, um ein optimales Verdichtungsergebnis zu erhalten. Bei der ersten Überfahrt sollte die Amplitude auf ein Mindestmaß abgesenkt werden und erst bei der 2. Überfahrt kann die Amplitude auf das Maximalmaß erhöht werden.
- Im Falle der praktischen Umsetzung muss gegebenenfalls die Zusammensetzung des Salzgrus-Ton-Gemisches (Tongehalt, Wasserzugabe) an die Qualität des verfügbaren Salzgruses (Kornband, Kornform) und die realisierbare Verdichtungsenergie bei dem vorhandenen Verdichtungsgerät angepasst werden. Dabei sollen begleitende Laborversuche im Marshallgerät durchgeführt werden.

4 KALOTTEN AUS BASALTSTEINEN ALS ZUSATZELEMENT IN SETZUNGSSTABILEN SCHOTTERSÄULEN (AP 4.2)

Zu diesem Arbeitsschritt wurden keine halbtechnischen Versuche durchgeführt, da kein Hersteller oder Partner gefunden wurde, der Basaltformsteine mit passender Geometrie und Größe für ein Versuchsgewölbe bereitstellt. Theoretische Ansätze zu diesem Arbeitsschritt werden im Teilbericht zum AP 3 behandelt.

LITERATURVERZEICHNIS

- Adam, Chr.; et al. (2011): „*Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden*“, in Baugrundverbesserung in der Geotechnik, Institut für Geotechnik der Universität Siegen, S. 113-121
- Fleiß, Th. (2003): „*Entwicklung eines Algorithmus zum Entwurf und zur Abschätzung der mehraxialen Beanspruchungen von Mauerwerksverbänden unter Berücksichtigung der Langzeitstabilität, sowie Bestimmung der Verbandparameter*“, Dissertation, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, 2003
- Knorr, P. (2013): „*Möglichkeiten des Einsatzes der Impulsverdichtung für den Einbau einer Füllsäule aus Salzgrus als Schachtverschlusselement*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung Bergbau, Studienarbeit TU Bergakademie Freiberg
- 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
- Lindner, S. (2014): „*In-situ-Erprobung der Verdichtung eines Salzgrus-Ton-Gemisches für Schacht-Verschlusselemente im Salinar*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung: Bergbau; Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg
- Matzke, B. (2017): „*Durchführung und Auswertung eines halbtechnischen Versuches zur Verdichtung eines Salzgrus-Ton-Gemisches für Schachtverschlusselemente im Salinar*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung: Spezialtiefbau, Studienarbeit TU Bergakademie Freiberg
- Melzer, M. (2011): „*Untersuchungen zur Bauausführung einer setzungsarmen Füllsäule aus Salzgrus für Schachtverschlüsse im Salinar*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung: Spezialtiefbau, Studienarbeit TU Bergakademie Freiberg
- Minkley, W.; Wüste, U.; Popp, T.; Naumann, D.; Wiedemann, M.; Bobinsky, J.; Tejchman, J. (2010): „*Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss*“, IfG Leipzig GmbH, Leipzig, 2010
- Schulze, R. (2014): „*Optimierung von Salzgrusgemischen für Schachtverschlusselemente mit hoher Einbaudichte*“, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Studienrichtung Bergbau, Studienarbeit TU Bergakademie Freiberg

VERZEICHNIS DER ANHÄNGE

Anhang A: Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben



BGE TECHNOLOGY GmbH

ELSA Phase II

Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben

BGE TEC 2020-10

ELSA Phase II

Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben

BGE TEC 2020-10

Autor Michael Jobmann

Datum 10.03.2020

Auftraggeber BMWI (PTKA/KIT)

Förderkennzeichen 02E11193B

Dieser Bericht wurde erstellt im Rahmen des FuE-Projektes

*"Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle, ELSA-Phase 2:
Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von
Schachtverschlüssen."*

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von der BGE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

ELSA Phase II

Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben

BGE TEC 2020-10

Autor Michael Jobmann

Datum 10.03.2020

Auftraggeber BMWI (PTKA/KIT)

Förderkennzeichen 02E11193B

Gesamtzahl der Seiten: 28

Ersteller:	Prüfer:	QS:	Freigabe:
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Untersuchungsmethode.....	2
3	Schlagende Verdichtung im Labor	2
4	Rüttelverdichtung in-situ	8
5	Schlagende Verdichtung in-situ	12
5.1	Gesenkversuch 1.....	12
5.2	Gesenkversuch 2.....	16
6	Bitumen-Versuch	20
7	Zusammenfassung	23
8	Literaturverzeichnis.....	24

1 Einleitung

Im Rahmen des Vorhabens ELSA Phase II wurden neue Materialien und Materialkombinationen untersucht. Dabei handelte es sich unter anderem um Mischungen aus Salzgrus und feinem Ton, die gegenüber reinem Salzgrus Vorteile hinsichtlich des Abdichtungsverhaltens aufweisen können. Während reines Salzgrus eine geraume Zeitspanne benötigt, um durch Kompaktion eine ausreichende Dichtigkeit zu bekommen, kann eine Beimischung von Ton durch seine Quelleigenschaften bei Zustrom von Flüssigkeit die feinen Poren innerhalb des Salzgrußes verstopfen. Dadurch ist es möglich, dass dieses Gemisch seine abdichtende Wirkung wesentlich früher entwickelt als reines kompaktiertes Salzgrus. Eine Voraussetzung dafür ist eine ausreichende mechanische Vorverdichtung während der Installation. Zu diesem Zweck wurden an der TU Bergakademie Freiberg Laborversuche zur Verdichtung ebenso durchgeführt, wie in-situ Verdichtungsversuche im Bergwerk Sondershausen und im Steinbruch Marxgrün. Im Anschluss an die jeweiligen Verdichtungsversuche wurden Proben entnommen, um diese hinsichtlich der erzielten Porosität und Permeabilität zu untersuchen. Aus diesen Proben wurden auch Teile für mikrostrukturelle Untersuchungen bereitgestellt.

In Ergänzung dazu wurden im Bergwerk Sondershausen auch in-situ Versuche mit Bitumen als Dichtmaterial in salinärer Umgebung durchgeführt. Eine Frage in dem Zusammenhang war, wie weit dünnflüssiges Bitumen in den aufgelockerten Randbereich einer Bohrung im Steinsalz einzudringen vermag. Um diese Frage zu beantworten, wurden die Versuche überbohrt und Probenmaterial für mikrostrukturelle Untersuchungen gewonnen.

Die Ergebnisse der oben genannten Untersuchungen sind in diesem Bericht dokumentiert.

2 Untersuchungsmethode

Die mikrostrukturellen Untersuchungen wurden anhand von Dünnschliffen durchgeführt. Die Herstellung der Dünnschliffe erfolgte durch die Firma MKFactory dergestalt, dass das jeweils zu untersuchende Probenmaterial zunächst in einem Exccikator evakuiert wurde, um möglichst alle Fluide, die sich im Porenraum befinden, aus der Probe zu entfernen. Der auf diese Weise evakuierte Porenraum wurde anschließend mit einem dünnflüssigen Harz getränkt, das vorher mit blauer Farbe eingefärbt wurde. Auf diese Weise kann unter dem Mikroskop oder einem Scanner der Porenraum sichtbar gemacht werden, der von dem blauen Harz erreicht wurde. Damit wird eine Analyse des für eine Flüssigkeit erreichbaren Porenraumes möglich. Abb. 2.1 illustriert dieses Verfahren der Dünnschliffherstellung.

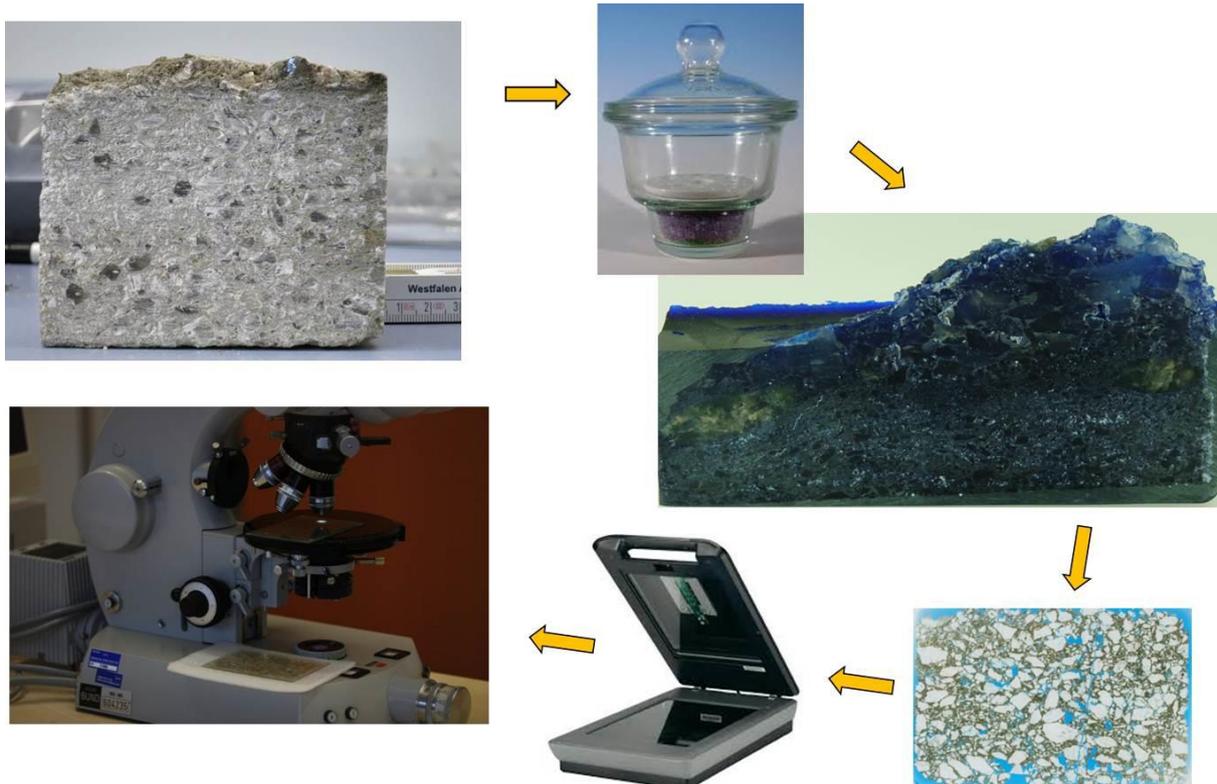
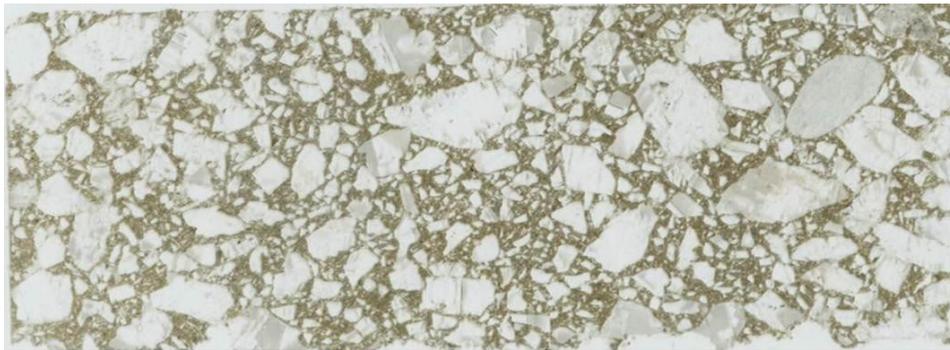


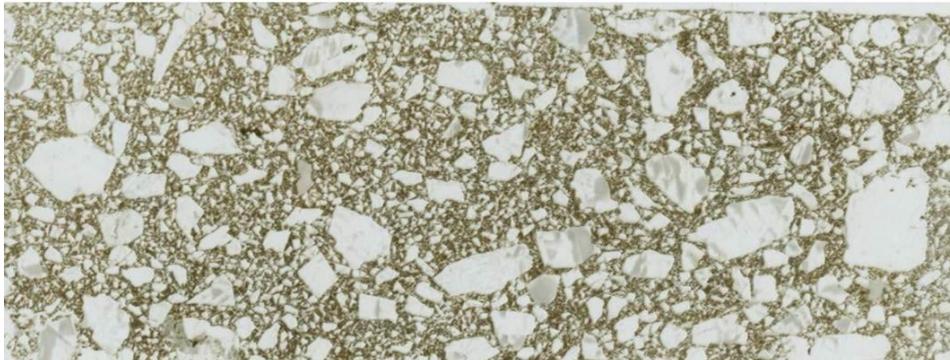
Abb. 2.1: Illustration zur Herstellung und Analyse von Dünnschliffen.

3 Schlagende Verdichtung im Labor

Die Verdichtungsversuche im Labor wurden an zwei unterschiedlichen Mischungen von Salzgrus und Ton durchgeführt. Die beiden Mischungen werden unter den Bezeichnungen EBSM (zwischenzeitlich benannt als Knorr-Mischung) und OBSM (zwischenzeitlich benannt als Glaubach-Mischung) geführt und unterscheiden sich in mehrerer Hinsicht. In Abb. 3.1 sind die Mischungsverhältnisse sowohl tabellarisch angegeben als auch anhand einer Scanneraufnahme bildlich dargestellt. Die wesentlichen Unterschiede bestehen darin, dass bei OBSM der Überkornanteil fast doppelt so hoch ist wie bei EBSM, dass ein Feinsalzanteil vorhanden ist und dass der Tonanteil nur etwa halb so groß ist. Diese Unterschiede werden auch anhand der Dünnschliff-Scanner-Aufnahmen visuell deutlich. Diese Aufnahmen wurden ohne eine Tränkung mit blau gefärbtem Harz gemacht um zunächst den reinen strukturellen Aufbau sichtbar zu machen.



OBSM
 ÜK: 46,80
 B6: 19,15
 B8: 10,56
 FS: 12,98
 FT: 7,78



EBSM
 ÜK: 23,70
 B6: 22,10
 B8: 36,00
 FS: 0,00
 FT: 14,40

Abb. 3.1: Mischungsverhältnisse der untersuchten EBSM und OBSM-Mischung in tabellarischer und bildlicher Darstellung.

Analoge Aufnahmen mit blau gefärbtem Harz sind in Abb. 3.2 zu sehen. Die oberen Bilder zeigen Aufnahmen von OBSM und die unteren Bilder Aufnahmen von EBSM. Auf der linken Seite sind originale Aufnahmen der Dünnschliff dargestellt. Die Bilder auf der rechten Seite zeigen die gleichen Aufnahmen, aber unter Anwendung einer Bildbearbeitung. Dabei wurden aus den linken Bildern jeweils die Blautöne extrahiert und in schwarz dargestellt. Sämtliche anderen Farbtöne wurden summarisch in Gelb dargestellt.

Vor dem Hintergrund, dass die Blautöne das eingedrungene gefärbte Harz darstellen bedeutet das, das alle schwarzen Bereiche gleichbedeuten sind mit eingedrungener Flüssigkeit, während gelb die trockenen Bereiche darstellt.

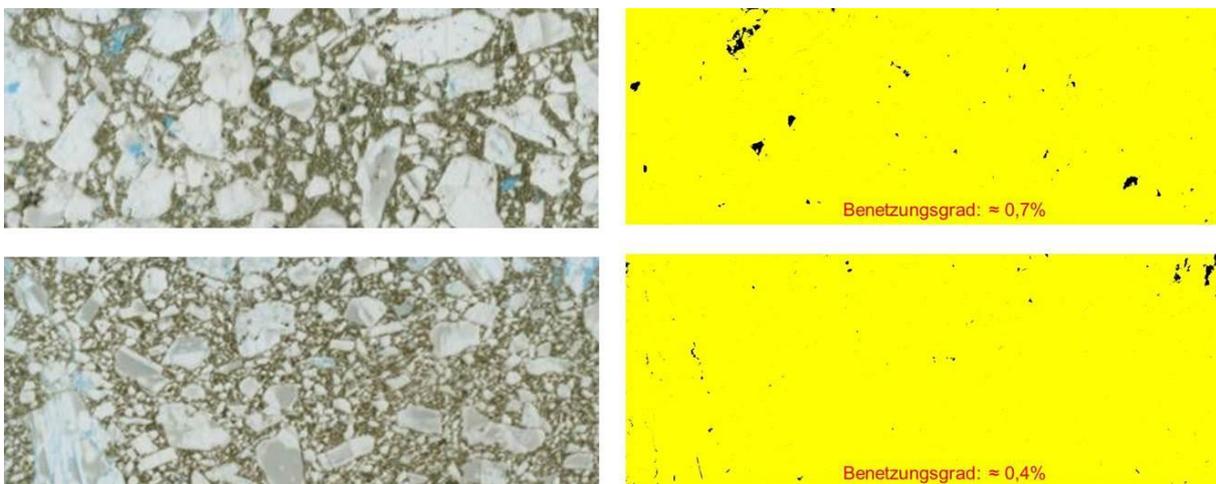


Abb. 3.2: Illustration der Benetzung mit Flüssigkeit im Porenraum.

Auf diese Weise lässt sich auf die jeweilige Fläche bezogen der "Benetzungsgrad" bestimmen. Das heißt, es lässt sich angeben, wieviel Prozent der Fläche jeweils mit Flüssigkeit belegt sind. Bei der Mischung OBSM sind es 0,7% während es bei EBSM nur etwa 0,4% sind. Das bedeutet, dass aus diesen Aufnahmen deutlich wird, dass die Mischung EBSM augenscheinlich abdichtender wirkt als OBSM, da während der Aufsättigung nach der Evakuierung deutlich weniger Flüssigkeit eindringen konnte.

Die nächste Frage, die sich stellt, ist an welchen Stellen die Flüssigkeit eingedrungen ist. Dazu lässt sich feststellen, dass vor allem Risse, die in den großen Körnern vorhanden sind und die aller Wahrscheinlichkeit nach durch die schlagende Verdichtung erzeugt wurden, mit blauer Flüssigkeit benetzt sind. In Abb. 3.3 sind vier vergrößerte Ausschnitte eines Dünnschliffes dargestellt, die unter dem Mikroskop aufgenommen wurden. Die Bilder zeigen deutlich, dass die Flüssigkeit sowohl entlang von Korngrenzen als auch in den teils regelmäßig angeordneten Rissen in den Körnern eingedrungen ist. Die Bereiche, die mit feinem Ton durchsetzt sind, zeigen wenig blaue Färbung und das auch nur sehr lokal. Abb. 3.4 zeigt zwei hochauflösende Mikroskopaufnahmen mit kleinen lokalen Bereichen in die Flüssigkeit eingedrungen ist.

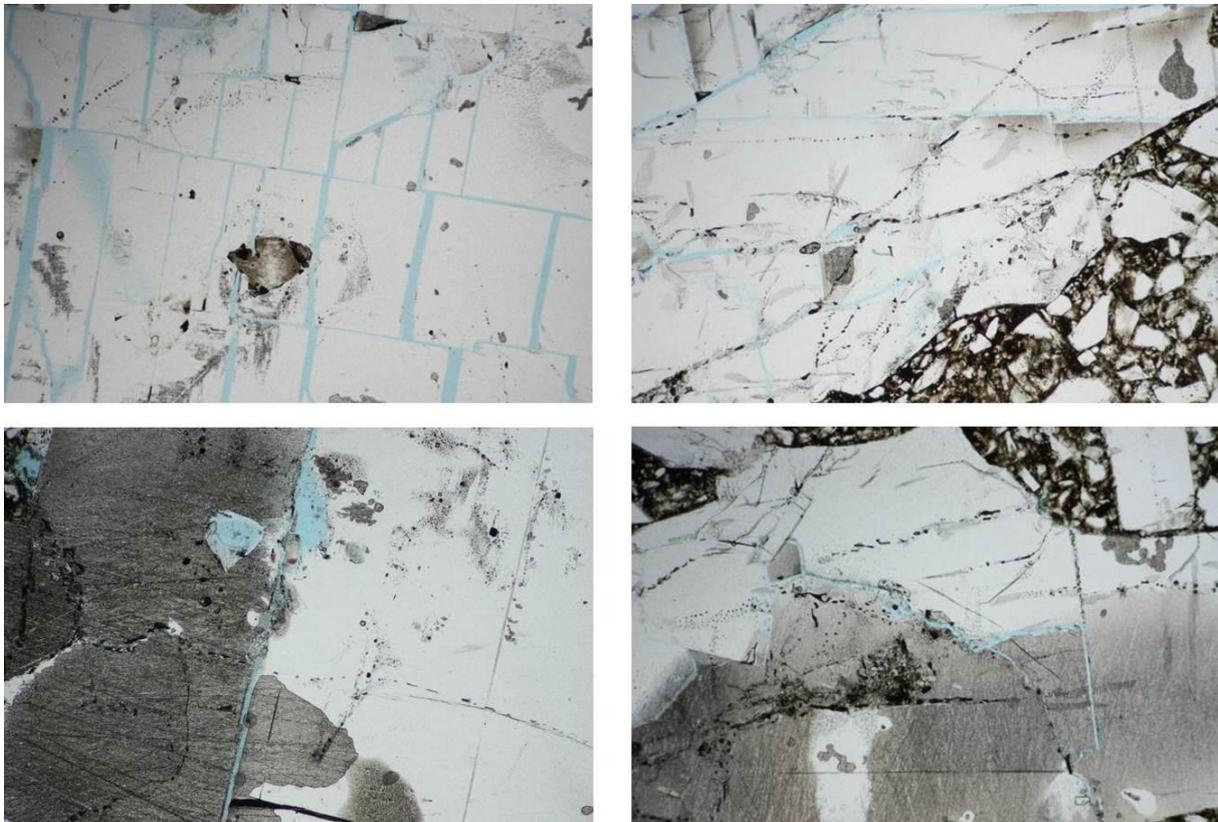


Abb. 3.3: Benetzte Risse in großen Körnern.

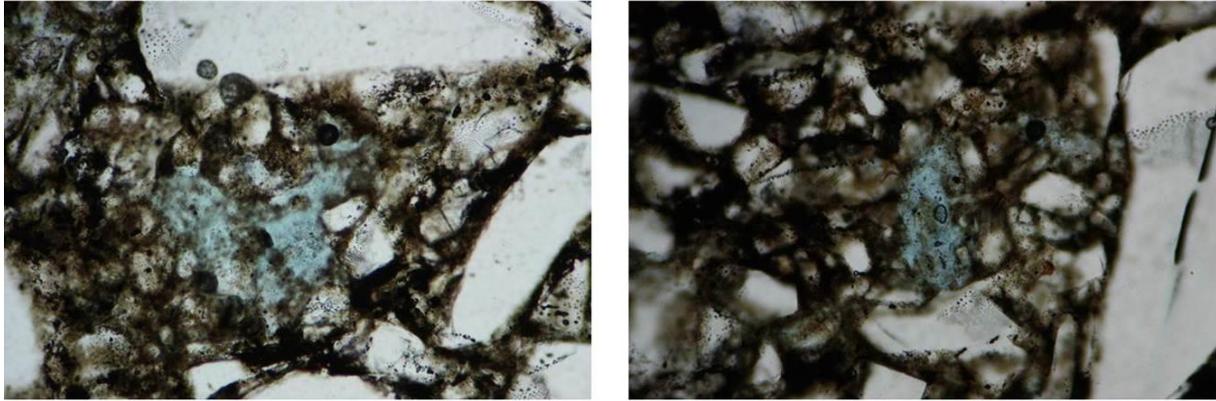


Abb. 3.4: Hochauflösende Mikroskopaufnahmen eines Dünnschliffes von OBSM im feinkörnigen Bereich. Blau = eingedrungene Flüssigkeit.

Darüber hinaus lässt sich noch ein anderer interessanter Effekt feststellen. Die Mikroskopaufnahmen in Abb. 3.5 zeigen, dass im Bereich der großen Körner zwischen diesen sich kleine dünne "Fäden" mit eingedrungener Flüssigkeit ausgebildet haben. Diese "Fäden" sind oft auch angeschlossen an Risse oder Korngrenzen, entlang derer die Flüssigkeit eingedrungen ist. Im Prinzip ist dieses Phänomen analog den in kompaktierten Bentoniten beobachteten "Piping"-Effekten zu sehen, allerdings in einem deutlich kleinskaligeren Bereich. Bisherige mikrostrukturelle Untersuchungen an reinem kompaktierten Salzgrus ohne Tonanteil, die im Rahmen des FuE-Vorhabens REPOPERM-II durchgeführt wurden, zeigen derartige Effekte nicht (Jobmann et al. 2014).

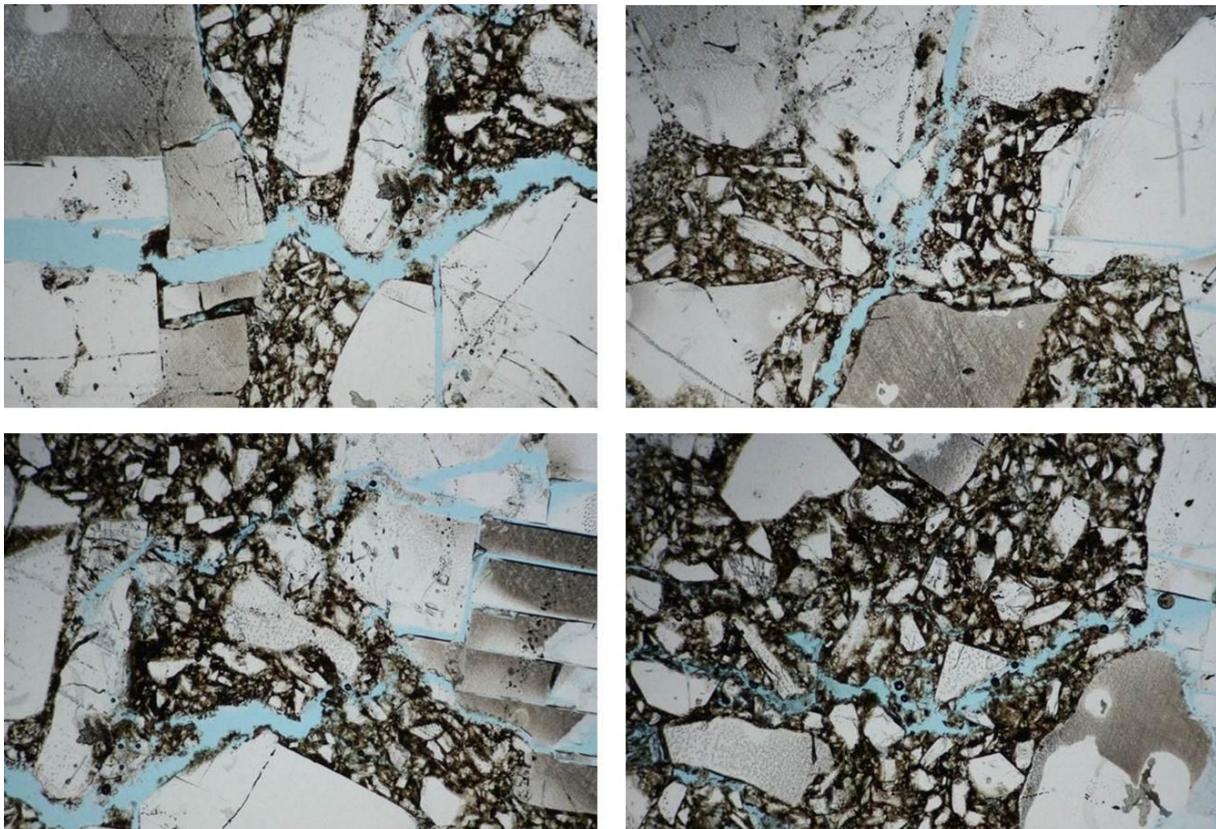


Abb. 3.5: Ausbildung dünner Flüssigkeitsfäden in der Nähe großer Körner (Piping-Effekt).

Die beobachteten Phänomene deuten insgesamt darauf hin, dass das Eindringverhalten der Flüssigkeit in erster Linie durch Korngrenzen bzw. Risse in den großen Körnern bestimmt wird und dass der Benetzungsgrad sich größtenteils dadurch ergibt.

Ähnliche Effekte lassen sich auch an den Dünnschliffen erkennen, die aus der Probe mit der Mischung EBSM angefertigt wurden. Auch bei dieser Mischung sind Korngrenzen bzw. Risse in den größeren Körnern maßgeblich an dem Eindringverhalten der Flüssigkeit beteiligt (Abb. 3.6). Die oben beschriebenen Piping-Effekte lassen sich ebenfalls wieder beobachten (Abb. 3.7). Die Tatsache, dass diese Effekte in beiden Mischungen auftreten, aber bei reinen Salzgrusproben bisher nicht beobachtet wurden, lässt vermuten, dass dies ein Effekt ist, der durch die Beimischung von Ton hervorgerufen wird. Allerdings tritt dieser Effekt nur sehr lokal auf und ist offensichtlich an die Nähe zu großen Körnern gebunden, wobei Korngrenzen bzw. Risse in den Körnern oft an diese Fäden gekoppelt sind.

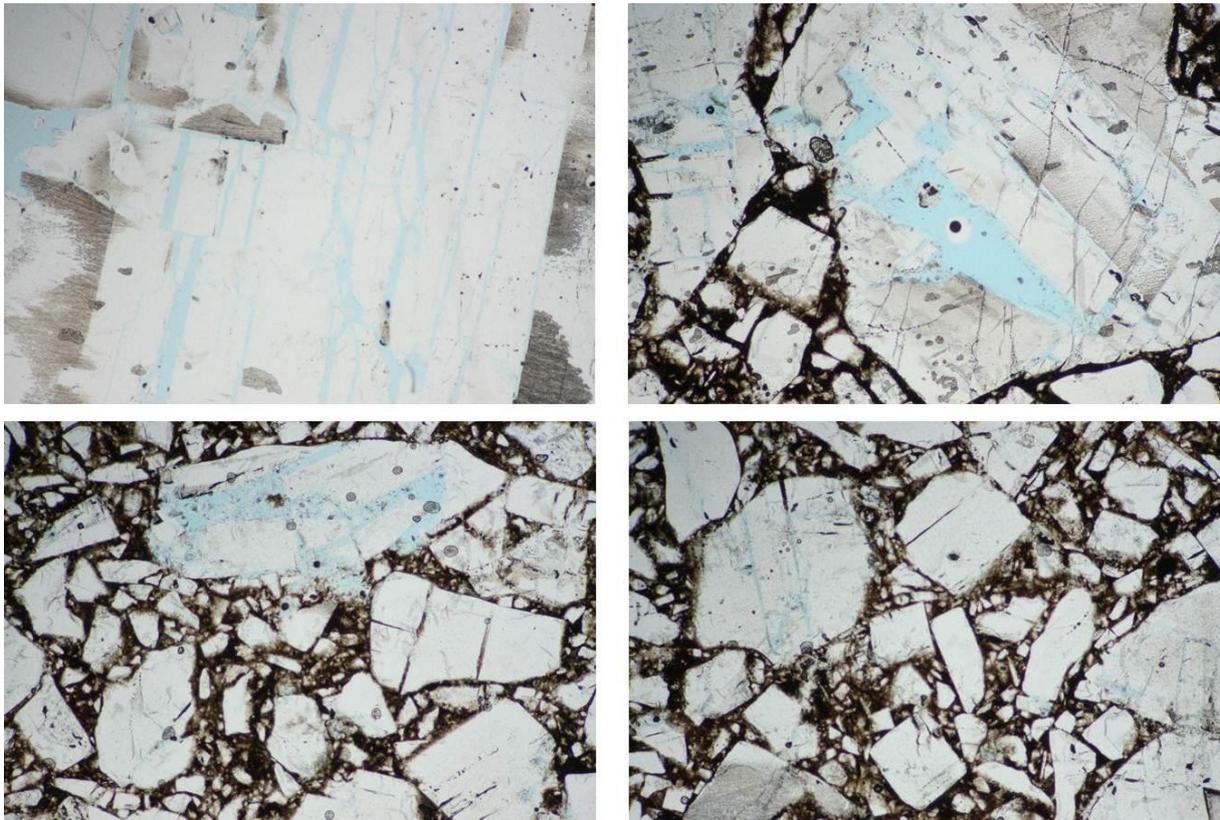


Abb. 3.6: Dünnschliffaufnahmen einer verdichteten EBSM-Mischung.

Beide Mischungen zeigen aber in einem Punkt ein unterschiedliches Verhalten. Es lässt sich beobachten, dass das Tonmehl dazu neigt, vorhandene Risse zu verstopfen. Dieser Effekt ist in Abb. 3.8 gezeigt. Die Aufnahmen auf der linken Seite wurden an Dünnschliffen von OBSM gemacht, während die auf der rechten Seite von EBSM stammen. Die Aufnahmen wurden mit hoher Vergrößerung gemacht und zeigen, dass Risse teilweise mit Tonmehl gefüllt sind. Tendenziell ist der Verstopfungseffekt bei der Mischung EBSM ausgeprägter als bei der Mischung OBSM. Es liegt nahe zu vermuten, dass dies bedingt ist durch den etwa doppelt so hohen Tonanteil in EBSM.

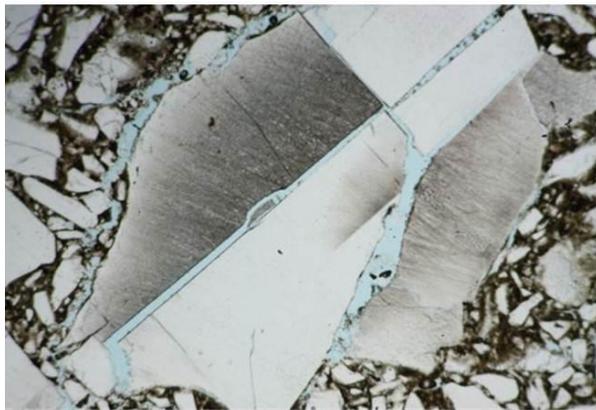
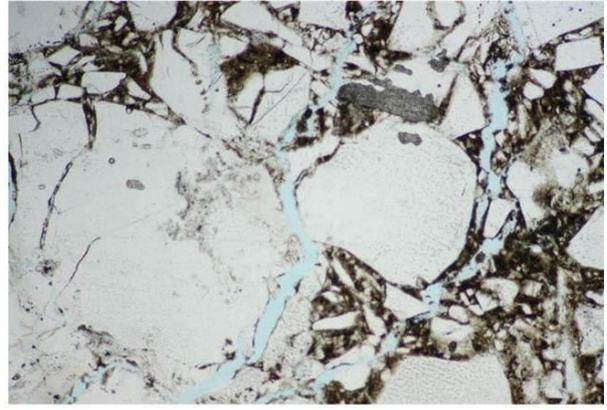
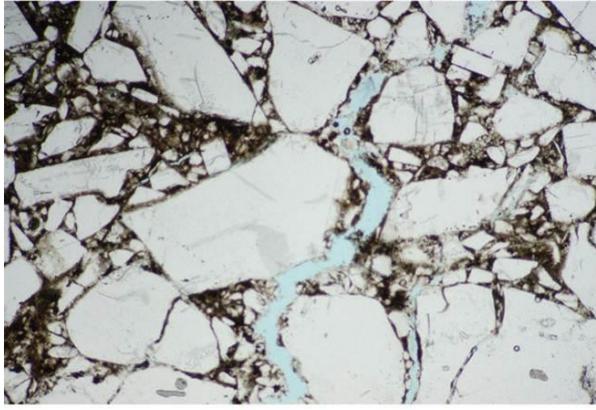
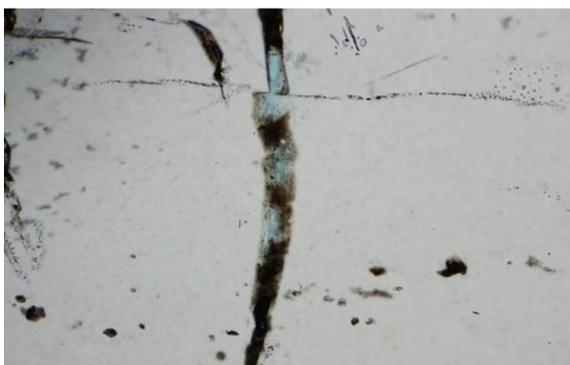
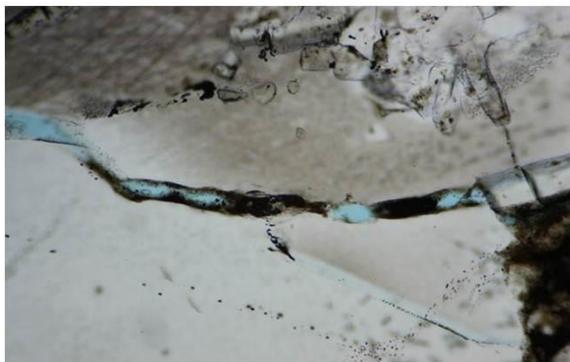


Abb. 3.7:
Dünnschliffaufnahmen einer verdichteten Mischung
EBSM (blaue Fäden = eingedrungene Flüssigkeit).

OBSM



EBSM

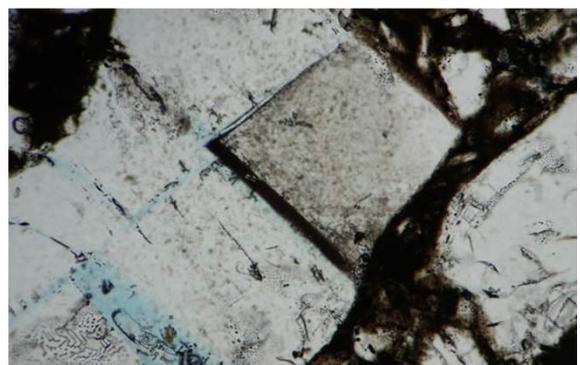
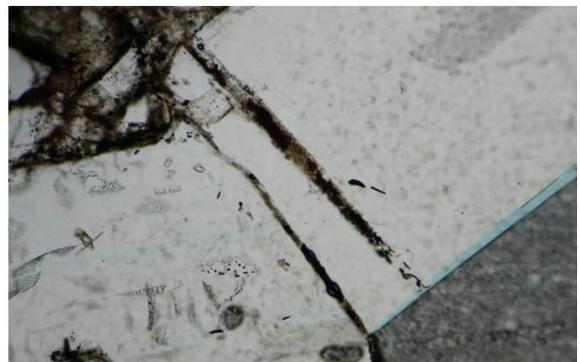


Abb. 3.8: Mikroskopaufnahmen mit hoher Vergrößerung im Bereich von Rissen in größeren Körnern.

4 Rüttelverdichtung in-situ

In Ergänzung zu den im vorigen Kapitel beschriebenen Untersuchungen an Laborproben konnte auch Probenmaterial untersucht werden, dass im Rahmen von in-situ Verdichtungsversuchen gewonnen wurde (Glaubach et al. 2016b). Versuche mittels Rüttelverdichtung fanden im Bergwerk in Sondershausen statt und wurden in Gesenken in der Sohle einer Streckennische durchgeführt. Abb. 4.1 zeigt den Versuchsort und die anschließende Probengewinnung. Die Versuche wurden mit verschiedenen Rüttelplatten durchgeführt, die sich hinsichtlich Gewicht und Rüttelfrequenz unterschieden. Die Verdichtung erfolgte dabei in fünf Lagen. Für die Dünnschliffuntersuchungen wurden Proben aus den Lagen 1, 2 und 5 (jeweils OBSM) ausgewählt.



Abb. 4.1: In-situ Verdichtungsversuche im Bergwerk Sondershausen und Probengewinnung.

Die Verdichtungsbilder unterscheiden sich nur geringfügig. Porositätsmessungen haben ergeben, dass die durch Rüttelverdichtung erreichte Porosität bei etwa 15% liegt. Die Verdichtung ist damit deutlich geringer als in den Laborversuchen. Die Abb. 4.2a und Abb. 4.2b zeigen Dünnschliffaufnahmen aus den Lagen 1 (unterste Lage) und 5 (oberste Lage). In beiden Fällen erhält man ein ähnliches Bild bezüglich der Verteilung der eingedrungenen Flüssigkeit. Im Gegensatz zu den Laborversuchen ist hier zum Teil großflächig blau gefärbte Flüssigkeit in die Bereiche mit dem Tonmehl eingedrungen. Andeutungsweise ist aber auch hier zu erkennen, dass die Flüssigkeit an Kornrändern und Kornrissen eindringen konnte. Allerdings ist offensichtlich, dass die Häufigkeit der Risse in den großen Körnern gegenüber den im Labor verdichteten Proben signifikant kleiner ist. Das heißt, dass die Rüttelverdichtung anscheinend Korn schonender ist als die schlagende Verdichtung und somit weniger Risse produziert.

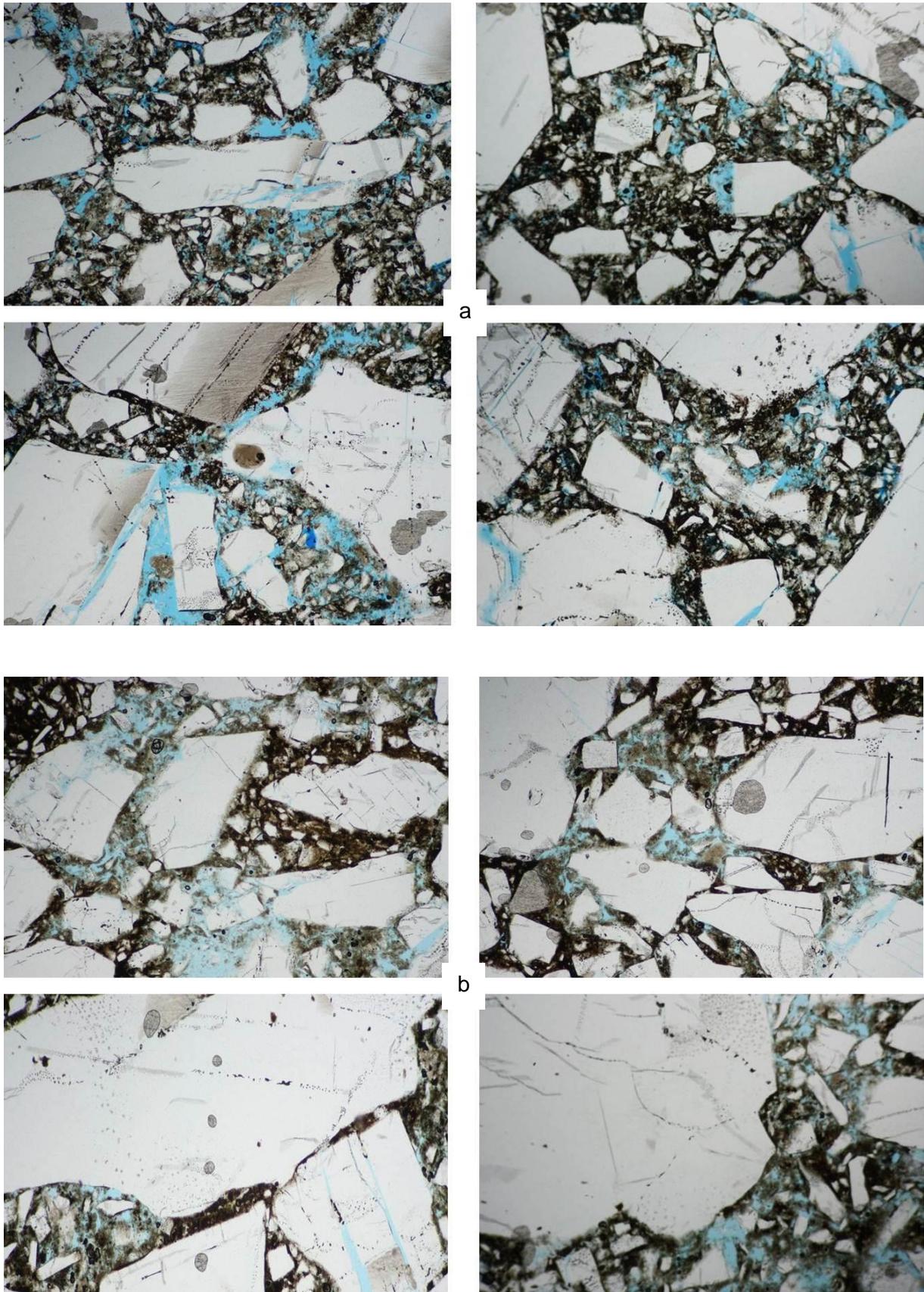


Abb. 4.2: Dünnschliffaufnahmen aus den Lagen 1 (a, unterste Lage) und 5 (b, oberste Lage) der in-situ Verdichtungsversuche in Sondershausen.

Eine Probe aus Lage 2 wurde dazu benutzt, den Einfluss von eindringendem Wasser in das Salzgrus-Ton-Gemisch zu visualisieren. Dazu wurde zunächst ein Dünnschliff von einer trockenen Probe hergestellt. Anschließend wurde ein weiterer Teil der Probe an einer Seitenfläche kurzzeitig mit Wasser in Berührung gebracht. Kurzzeitig deshalb, um ein Auflösen der Probe zu vermeiden. Durch die Berührung mit Wasser beginnt der Ton Wassermoleküle aufzunehmen und somit zu quellen. Dieser Quellprozess verringert den Porenraum so, dass für eindringendes Wasser weniger freier Porenraum zur Verfügung steht. Von dieser so mit Wasser behandelten Probe wurde ebenfalls ein Dünnschliff nach bewährtem Verfahren hergestellt. Aufnahmen beider Dünnschliffe sind in Abb. 4.3 zu sehen. Die linke Aufnahme entstammt der trockenen Probe während die rechte Aufnahme von der mit Wasser behandelten Probe gemacht wurde. Es lässt sich ein deutlicher Unterschied erkennen. Während bei der trockenen Probe weite Bereiche des mit Ton durchsetzten Gebietes mit blau gefärbter Flüssigkeit durchdrungen sind, sind bei der befeuchteten Probe weite Bereiche nicht von der blauen Flüssigkeit erreicht worden. Das bedeutet, dass der Quellprozess des Tones offensichtlich seine Wirkung entfaltet und den freien Porenraum reduziert und somit die Probe geringer permeabel macht.

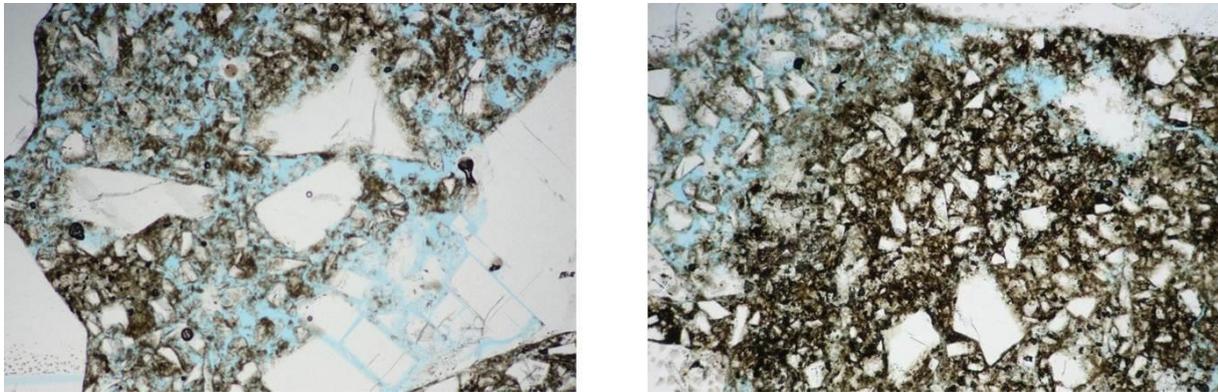


Abb. 4.3: Dünnschliffaufnahmen aus Lage 2 der in-situ Verdichtungsversuche; links: trockene Probe, rechts: angefeuchtete Probe.

Eine Auswertung hinsichtlich des Benetzungsgrades unter Zuhilfenahme einer Bildbearbeitung der Aufnahmen aus den Lagen 1, 2 und 5 ergab die in Abb. 4.4 dargestellten Ergebnisse. Der Unterschied in der Benetzung bei den Lagen 1 und 5 ist optisch nicht auffällig (obere Bilder). Auffällig allerdings ist der Unterschied zwischen der trockenen und der vorher befeuchteten Probe (untere Bilder). Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Probe mit dem gequollenen Ton eine deutlich geringere Benetzung aufweist. In Abbildung 4.5 sind die Benetzungen der in-situ verdichteten und der im Labor verdichteten Proben gegenübergestellt. Hier wird zum einen nochmal deutlich, dass bei der gequollenen Probe die Benetzung etwa halb so groß ist wie bei der trockenen Probe. Zum anderen scheint die schlagende Verdichtung hinsichtlich der erreichbaren Porosität deutlich effektiver zu sein.

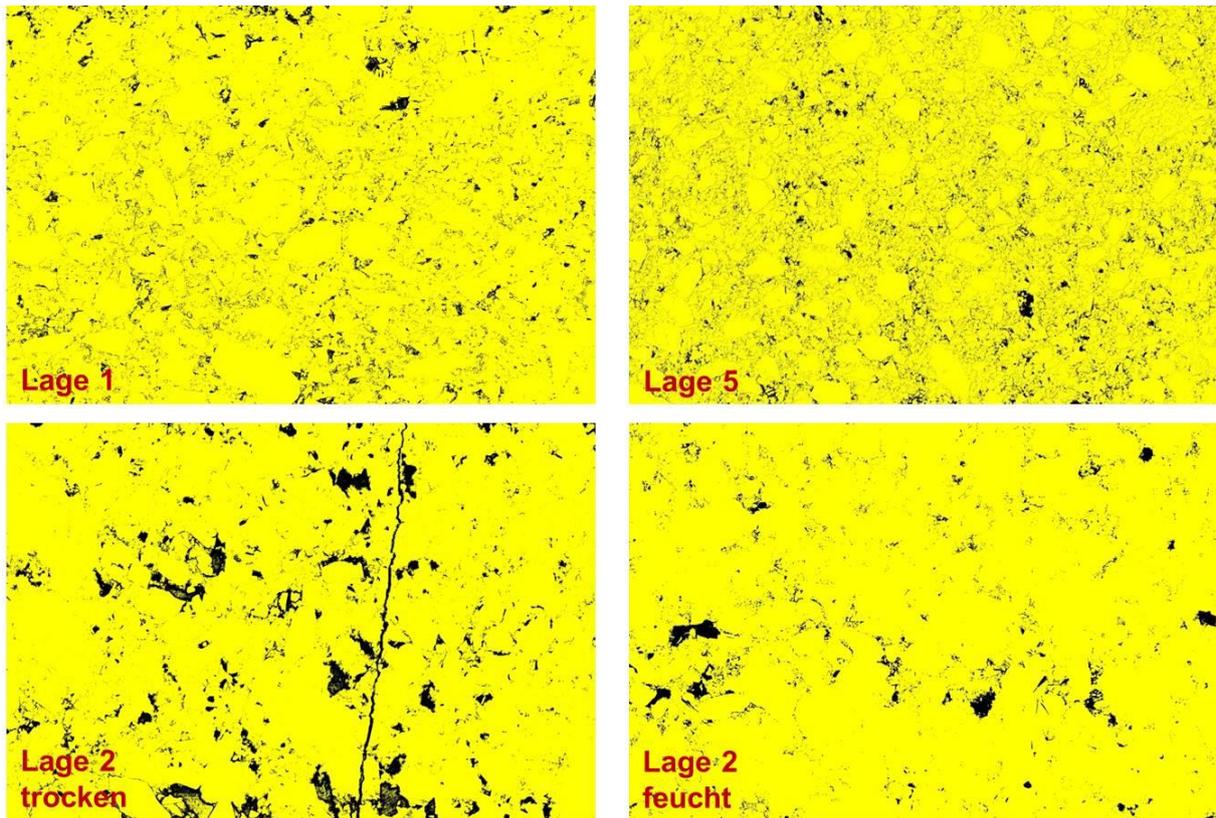


Abb. 4.4: Darstellung des Benetzungsgrades der Dünnschliffe aus den Lagen 1, 2 (trocken und angefeuchtet) und 5.

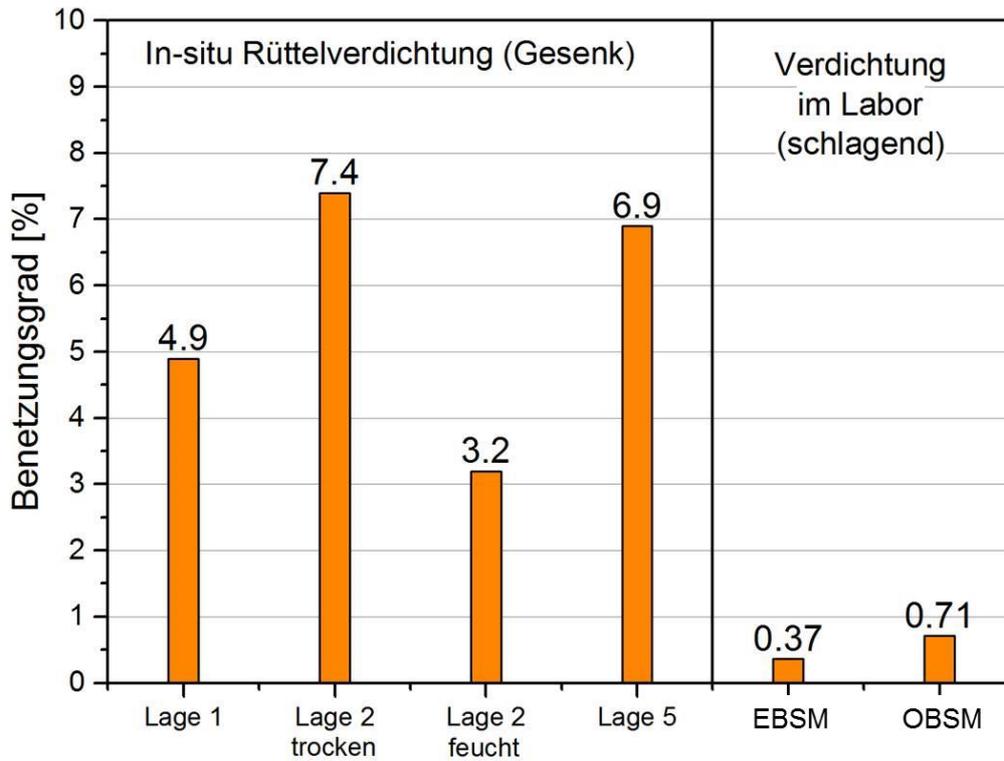


Abb. 4.5: Gegenüberstellung der Benetzungsgrade der Dünnschliffe aus den Labor- und in-situ Verdichtungsversuchen.

5 Schlagende Verdichtung in-situ

In-situ Versuche zur schlagenden Verdichtung fanden im Steinbruch Marxgrün statt (Glaubach et al. 2016b).

5.1 Gesenkversuch 1

Für den ersten Versuch wurde in dem Steinbruch ein kreisrundes Gesenk, quasi ein „Mini-Schacht“, ausgehoben. Mittels eines schweren Fallgewichtes wurden drei verschiedene Salzgrus-Ton-Gemische (EBSM, OBSM, mOBSM) lagenweise eingebracht und verdichtet (Abb. 5.1). Im Anschluss wurden aus einer Reihe von Bohrungen Kernproben gewonnen, um Untersuchungen zur erreichten Porosität anzustellen. Aus der Bohrung 36 wurde Material für mikrostrukturelle Untersuchungen bereitgestellt.



Abb. 5.1: Verdichtung des Testmaterials in einem kreisrunden Gesenk im Steinbruch Marxgrün sowie Proben-gewinnung für mikrostrukturelle Untersuchungen (Fotos: Uwe Glaubach, TUBAF)

Die Dünnschliffe wurden erneut gemäß dem anfangs beschriebenen Verfahren hergestellt. Ergebnisse für die drei genannten Mischungen sind in Abbildung 5.2 im Überblick dargestellt. Zur Analyse der prozentualen Menge der eingedrungenen Flüssigkeit (blaue Färbung) wurde auch bei diesen Dünnschliffen wieder eine Software zur grafischen Analyse angewendet. Alle Blautöne, die eingedrungene Flüssigkeit repräsentieren, werden schwarz dargestellt und alle anderen Farbtöne werden gelb dargestellt. Damit ist es möglich, den Anteil der Fläche, den die Flüssigkeit abdeckt, zu bestimmen. Diese Auswertung ist im unteren Teil der Abbildung 5.2 dargestellt. Für EBSM beträgt der Flächenanteil 9,4%, für die mOBSM 5,3% und für die Mischung OBSM 2,7%.

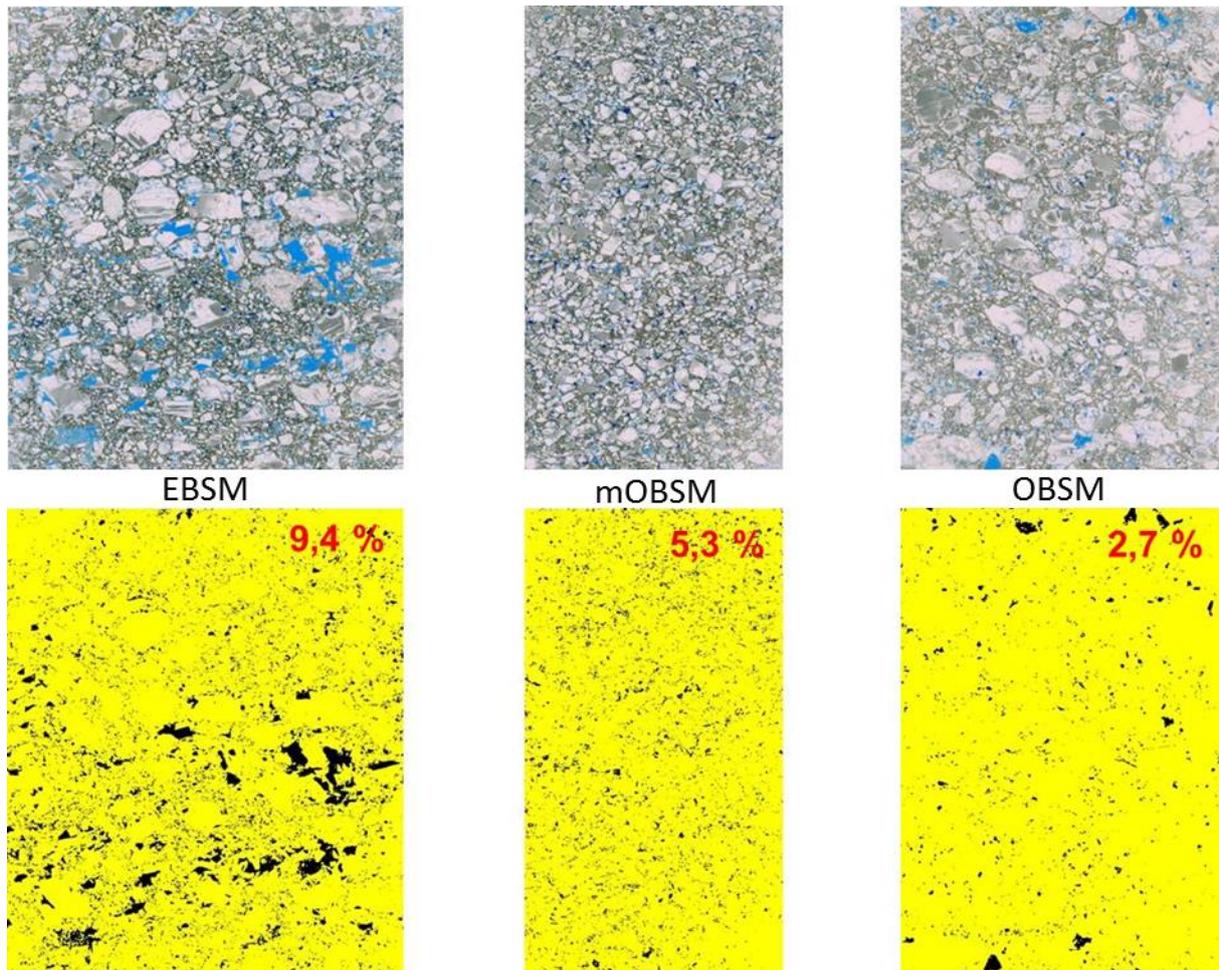


Abb. 5.2: Dünnschliffe aus den drei verschiedenen Lagen bzw. Materialmischungen. Die blaue Färbung (oben) und die schwarze Färbung (unten) stellen den Anteil der eingedrungenen Flüssigkeit dar.

Im Gegensatz zu den Laboruntersuchungen (Abb. 4.5) fällt auf, dass EBSM im Vergleich zur OBSM bei dem in-situ Versuch nicht diejenige ist, die dichter zu sein scheint. Dies ist allerdings nur ein scheinbarer Gegensatz, wenn man berücksichtigt, in welcher Reihenfolge die Verdichtung geschah. In dem in-situ Versuch wurde die Mischung OBSM als erste und damit unterste Lage eingebracht. Für die darüber liegende zweite Lage wurde mOBSM eingesetzt und für die oberste Lage EBSM.

Abbildung 5.3 zeigt die Lage der drei unterschiedlichen Materialmischungen in dem Gesenk. Demnach befindet sich in den oberen 60 cm die Mischung EBSM, im Bereich von 60 cm bis 1,0 m befindet sich mOBSM und im Tiefenbereich größer als 1 m liegt die Mischung OBSM. Der Isolinen-Plot in Abbildung 5.3 zeigt die Auswertung der Porosität für diesen Tiefenbereich. Danach ist klar zu erkennen, dass die oben liegende EBSM die geringste Verdichtung aufweist während bei der unten liegenden OBSM die größte Verdichtung zu erkennen ist. Dieses Bild wird durch die Ergebnisse der Dünnschliffanalysen bestätigt. Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse in der Zusammenschau mit den anderen oben beschriebenen Ergebnissen.

Teufe	Schicht	Rezeptur
< 58 cm	3	3.EBSM (Knorr-Mischung)
58 bis 99 cm	2	2.mOBSM (Glaubach-Mischung ohne Überkorn)
> 99 cm	1	1.OBSM (Glaubach-Mischung)

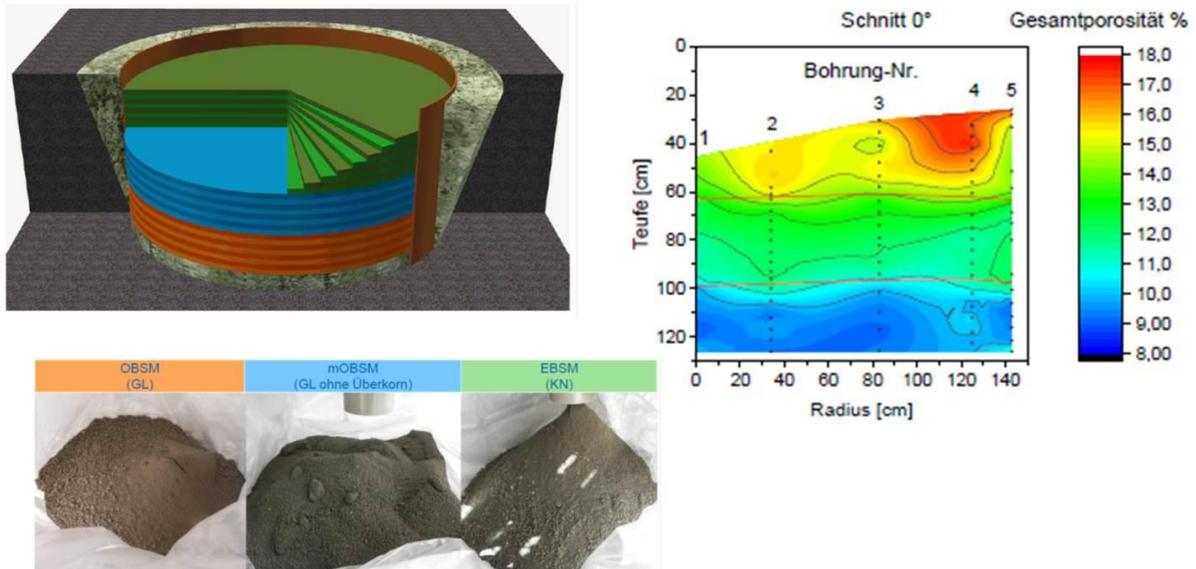


Abb. 5.3: Lage der drei Mischungen innerhalb des Gesenkes und indicative Porositätsauswertung (Glaubach et al. 2016b).

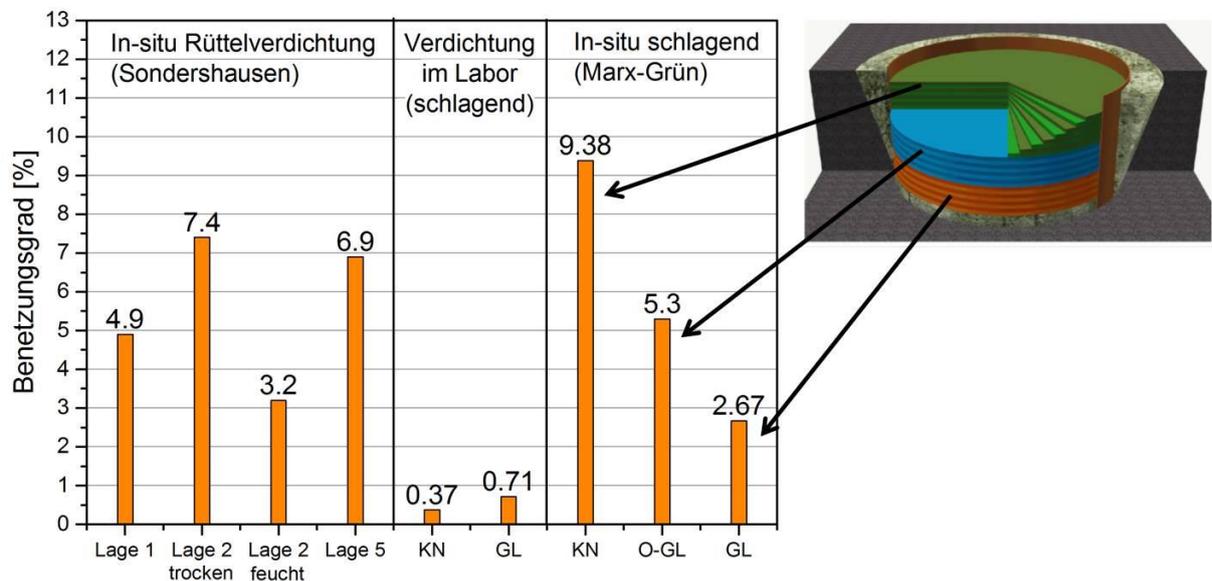


Abb. 5.4: Ergebnisübersicht zu den ermittelten flächenhaften Benetzungsgraden der Dünnschliffe.

Die Beobachtungen zu den flächenhaften Benetzungsgraden zeigen in erster Linie eine Lagenabhängigkeit. Die Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Mischung erscheint hierbei untergeordnet.

Schaut man sich die einzelnen Lagen bzw. Materialmischungen im Einzelnen an, so fällt folgendes auf:

Obere Lage (EBSM)

Bei der oberen Lage sind tendenziell ausgeprägte relativ homogen verteilte Flüssigkeitsansammlungen im Tonmehlbereich festzustellen. Vor allem die großen Körner weisen deutlich mit Flüssigkeit gefüllte Risse auf (Abb. 5.5).

Mittlere Lage (mOBSM)

Bei der mittleren Lage ist ebenfalls eine tendenziell homogene Flüssigkeitsverteilung im Tonmehlbereich zu erkennen, die aber in der Intensität deutlich geringer ist, als in der oberen Lage (Abb. 5.6).

Untere Lage (OBSM)

Bei der unteren Lage ist tendenziell keine homogene Flüssigkeitsverteilung zu erkennen. Hier sind tendenziell eher „Hot-Spot“ artige Flüssigkeitsansammlungen festzustellen. Darüber hinaus sind in geringem Umfang lokal „Piping-Effekte“ zu beobachten, die bevorzugt auch mit Rissen in den großen Körnern verbunden sind (Abb. 5.7). Diese Effekte scheinen bevorzugt bei gut verdichteten Proben aufzutreten wie ein Vergleich mit den Laborproben (Abb. 3.5 und Abb. 3.7) nahelegt.

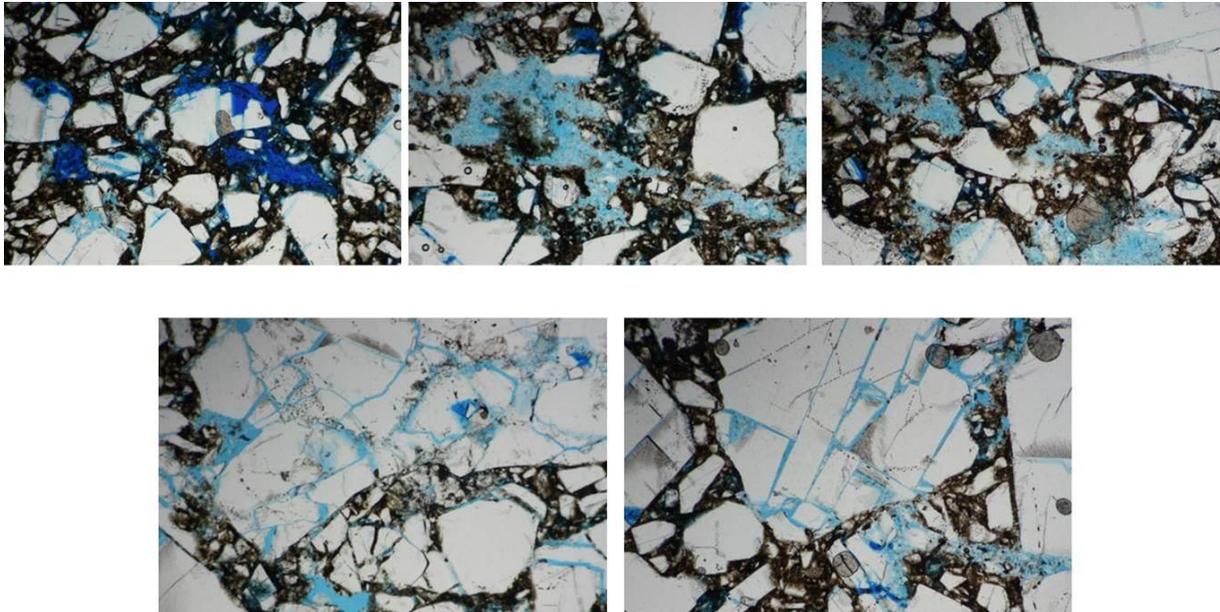


Abb. 5.5: Detailaufnahmen zur Flüssigkeitsaufnahme in der oberen Lage (EBSM).

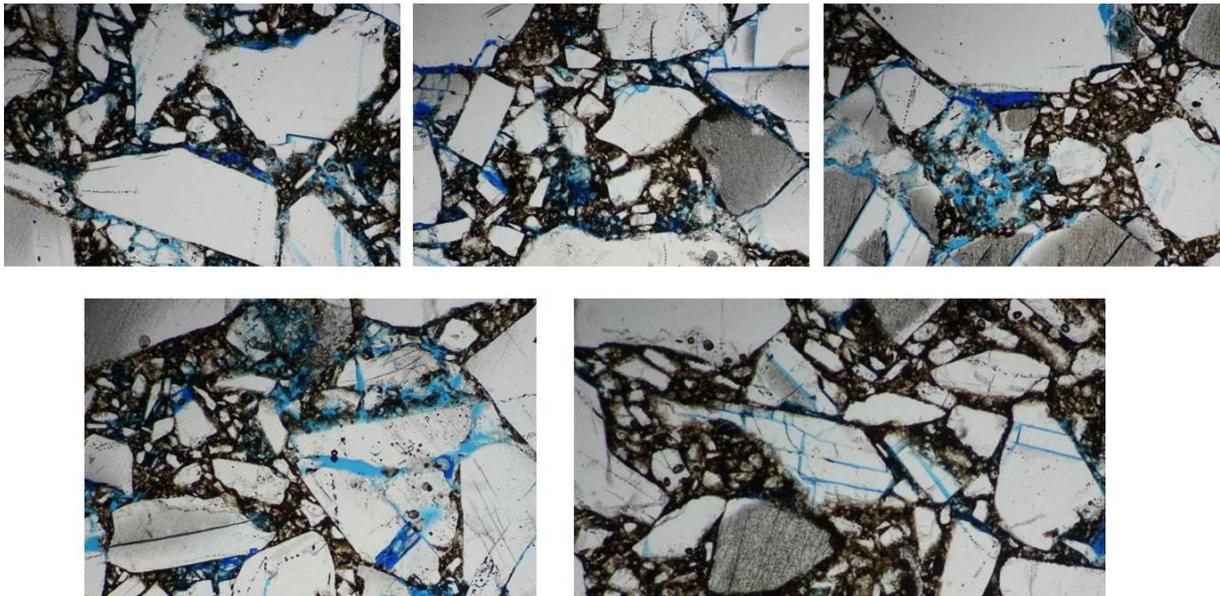


Abb. 5.6: Detailaufnahmen zur Flüssigkeitsaufnahme in der mittleren Lage (mOBSM).

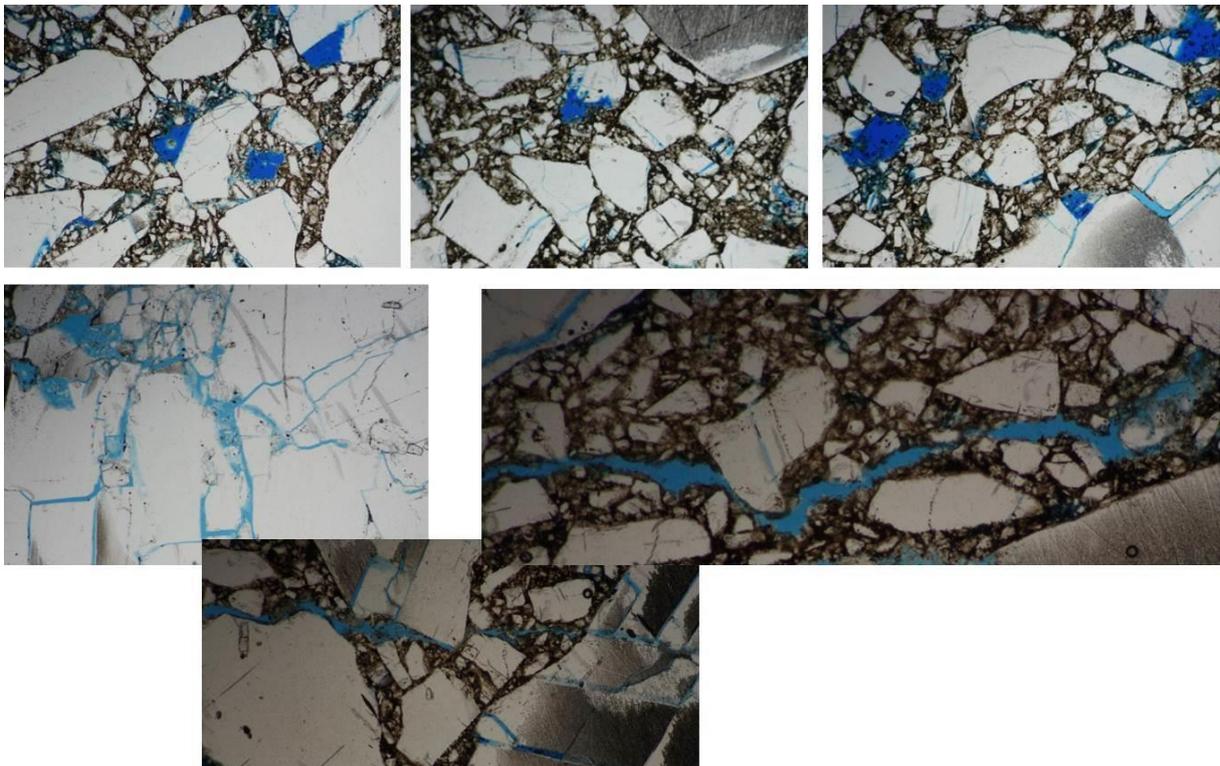


Abb. 5.7: Detailaufnahmen zur Flüssigkeitsaufnahme in der unteren Lage (OBSM).

5.2 Gesenkversuch 2

Ein zweiter Gesenkversuch wurde nur mit der EBSM-Mischung durchgeführt, um das Verdichtungsergebnis an nur einer Mischung zu bekommen. Abb. 5.8 zeigt eine Probe, die nach Abschluss des Versuches gewonnen wurde. Die Abbildung zeigt auch einen Dünnschliff über das Vertikalprofil sowie die mit rot markierten Ebenen, in denen zwei horizontal angeordnete Dünnschliff präpariert wurden.

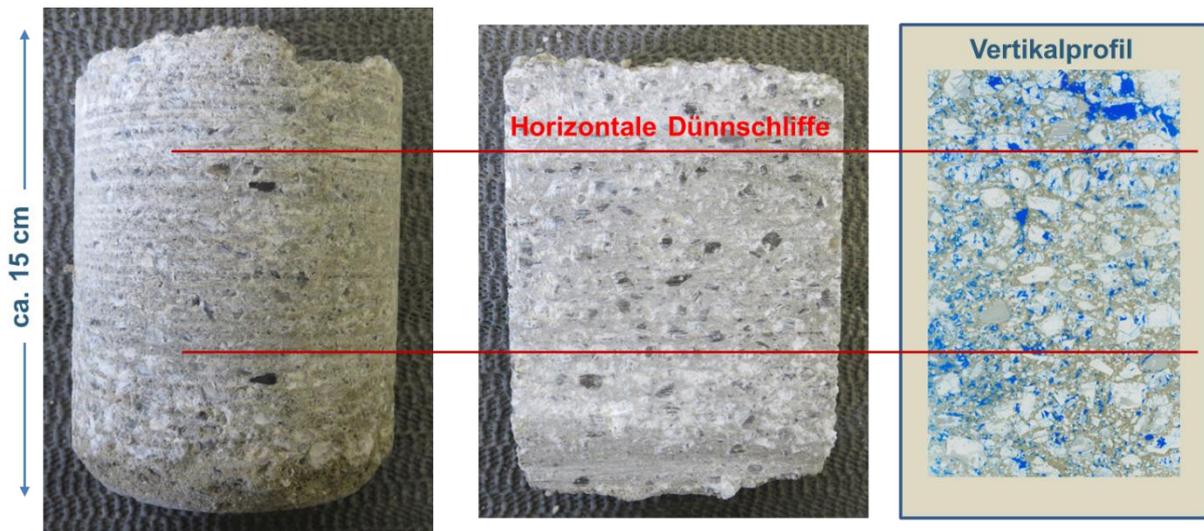


Abb. 5.8: Foto der aus dem Gesenkversuch entnommenen Probe zusammen mit einem über das Vertikalprofil präparierten Dünnschliff.

Die Einfärbung des Vertikalprofils in dem Dünnschliff lässt bereits mit dem bloßen Auge erkennen, dass die Benetzung mit Flüssigkeit heterogen ist und in jedem Fall im oberen Teil deutlich ausgeprägter ist. Dies wird besonders bei der Betrachtung der beiden horizontal präparierten Dünnschliffe deutlich. Diese sind in Abb. 5.9 zusammen mit der prozentualen Auswertung des Benetzungsgrades (rechte Seite) dargestellt. Der obere Horizontalschnitt zeigt eine Benetzung mit Flüssigkeit, die etwa dem 2,5 fachen des unteren Horizontalschnitts entspricht. Das heißt, die Kompaktheit bzw. die Dichte der Probe ist in der unteren Hälfte signifikant größer.

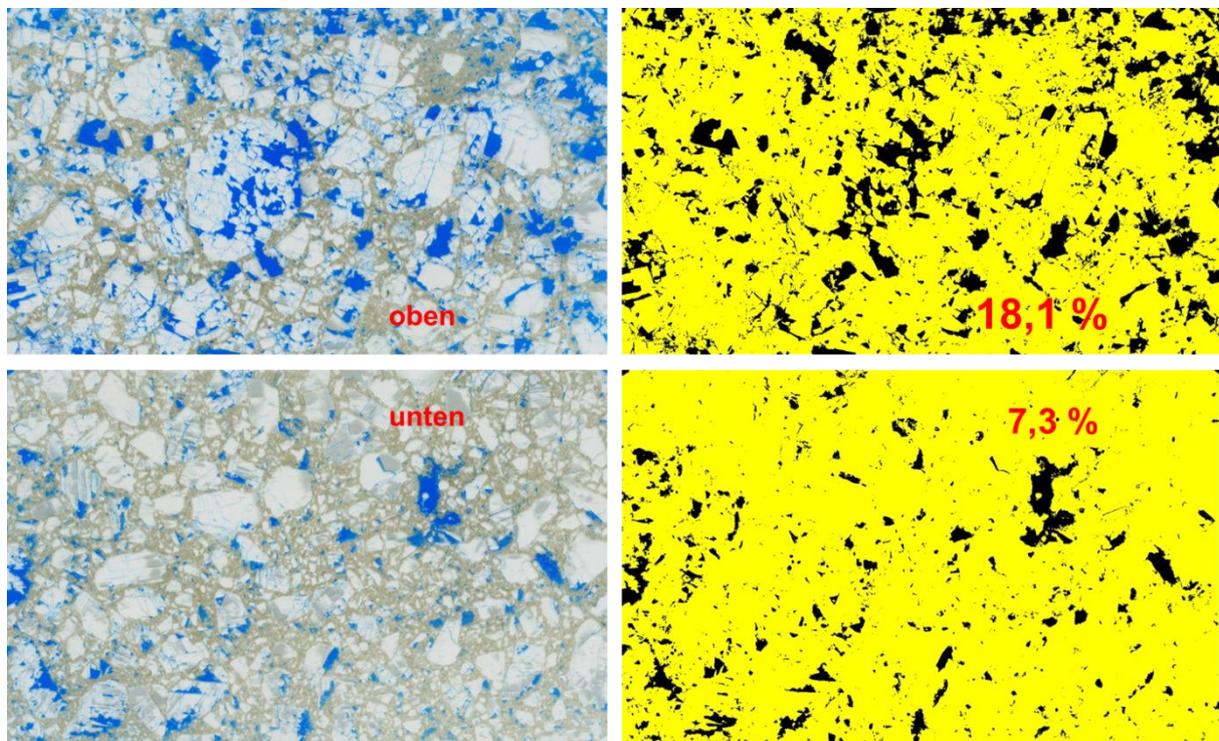


Abb. 5.9: Dünnschliffe aus den zwei unterschiedlichen Ebenen. Die blaue Färbung (links) und die schwarze Färbung (rechts) stellen den Anteil der eingedrungenen Flüssigkeit dar.

Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit denen früherer Versuche ist in Abb. 5.10 dargestellt. Hieraus wird deutlich, dass der Benetzungsgrad im unteren Bereich der Probe mit denen aus früheren Versuchen größenordnungsmäßig vergleichbar ist, im oberen Bereich aber eine signifikant ungünstigere Verdichtung aufweist.

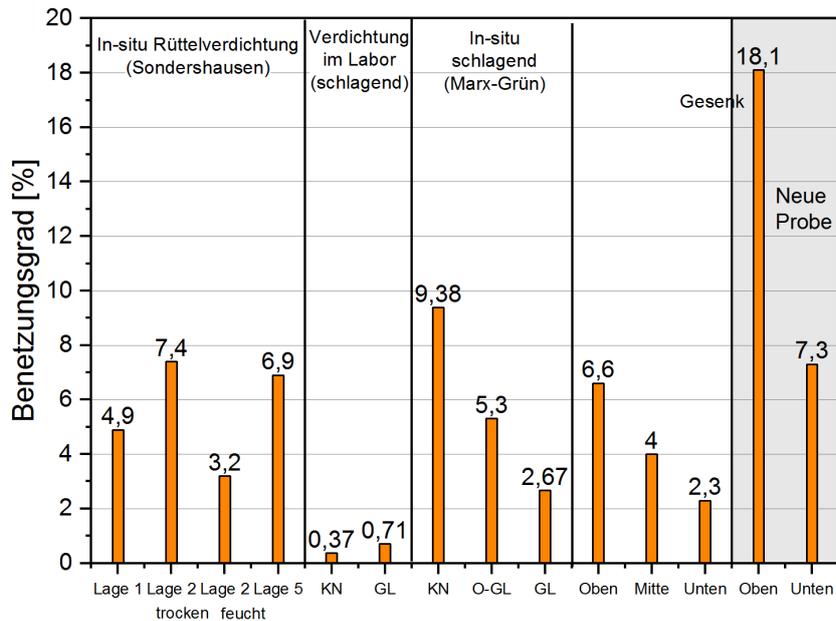


Abb. 5.10: Gegenüberstellung der Benetzungsgrade der Dünnschliffe im Vergleich mit früheren Versuchen.

Darüber hinaus lassen sich anhand der beiden Dünnschliffe noch folgende Beobachtungen machen: In Abb. 5.11 sind mikroskopische Aufnahmen aus dem Dünnschliff im oberen Bereich zu sehen, die zeigen, dass zum einen signifikante Kornzertrümmerungen festzustellen sind (linke Bildhälfte) und zum anderen eine ganze Reihe von Rissen mit Fluid gefüllt sind (rechte Bildhälfte). Vergleicht man dies mit den Untersuchungen an dem Dünnschliff aus dem unteren Bereich, so sind „tendenziell“ mehr fluidgefüllte Risse im oberen Bereich festzustellen.

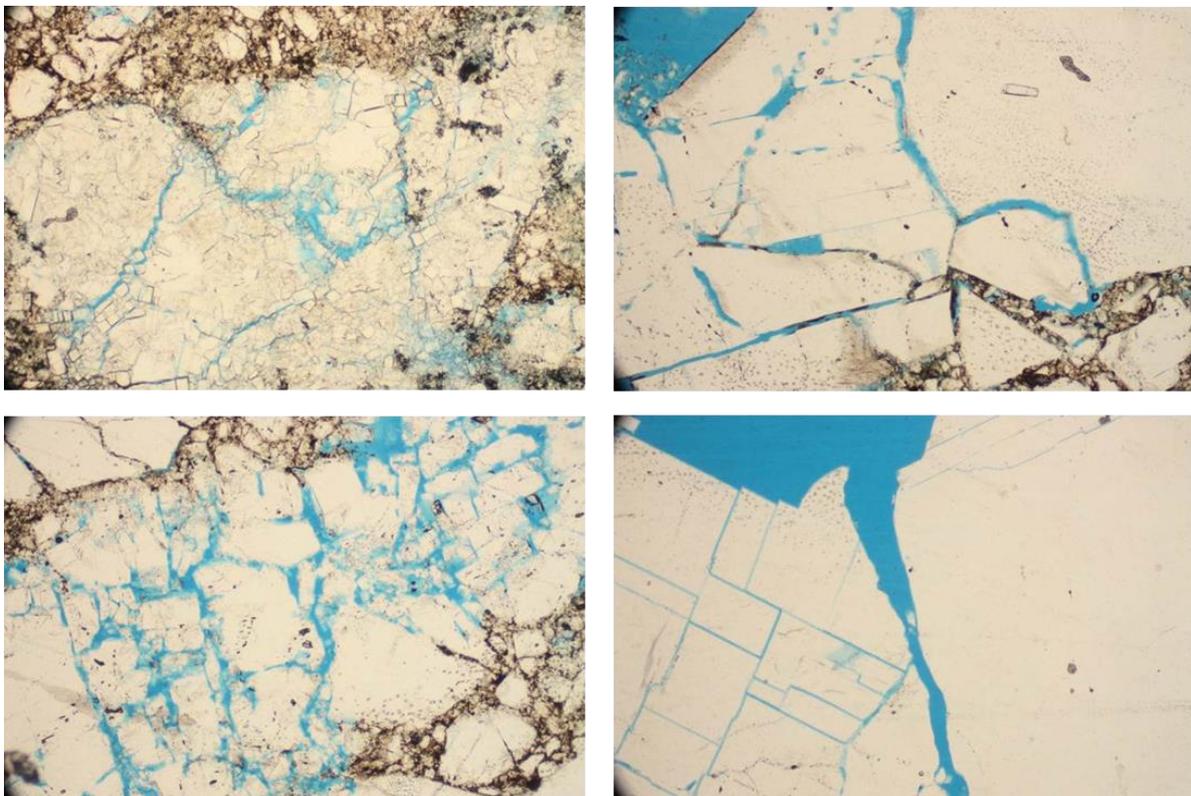


Abb. 5.11: Mikroskopische Aufnahmen aus dem Dünnschliff im oberen Bereich.

Darüber hinaus sind, wie in Abb. 5.12 zu sehen, teilweise großflächige Benetzungen (Bild links) festzustellen, wobei aber zu sehen ist, dass tonreiche Regionen (Bild rechts) die großflächige Benetzung verhindern.

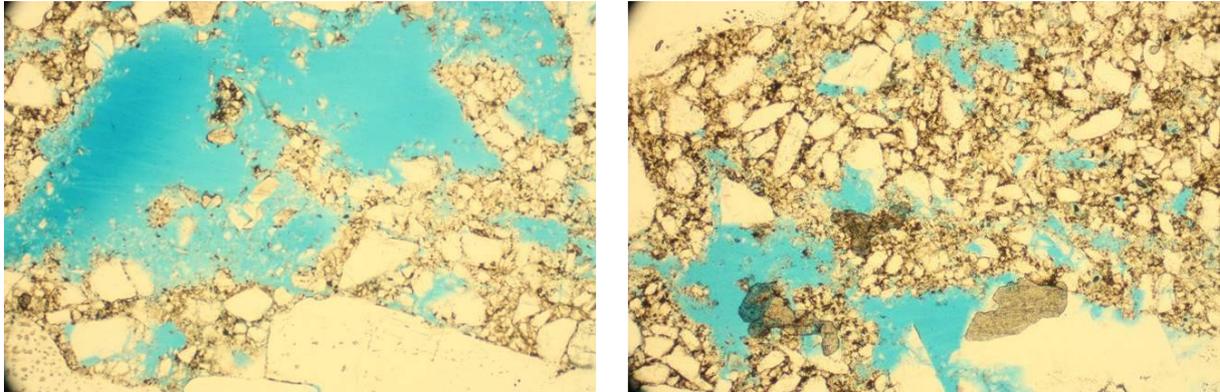


Abb. 5.12: Mikroskopische Aufnahmen aus dem Dünnschliff im oberen Bereich, die teilweise großflächige Benetzungen zeigen.

Die Dünnschliffe im unteren Bereich zeigen ein etwas anderes Bild. Hier lässt sich, wie in Abb. 5.13 zu sehen, feststellen, dass im Vergleich zum oberen Bereich eine Benetzung vermehrt an Kornrändern (linkes Bild) stattgefunden hat. Dies scheint ein typischer Effekt zu sein, je dichter das Material gepackt ist, desto mehr ist das Fluid an Kornränder gebunden. Außerdem ist zu erkennen, dass Risse, die mit ausreichend Tonmaterial gefüllt sind, wenn überhaupt, nur eine geringe Benetzung aufweisen (rechtes Bild).

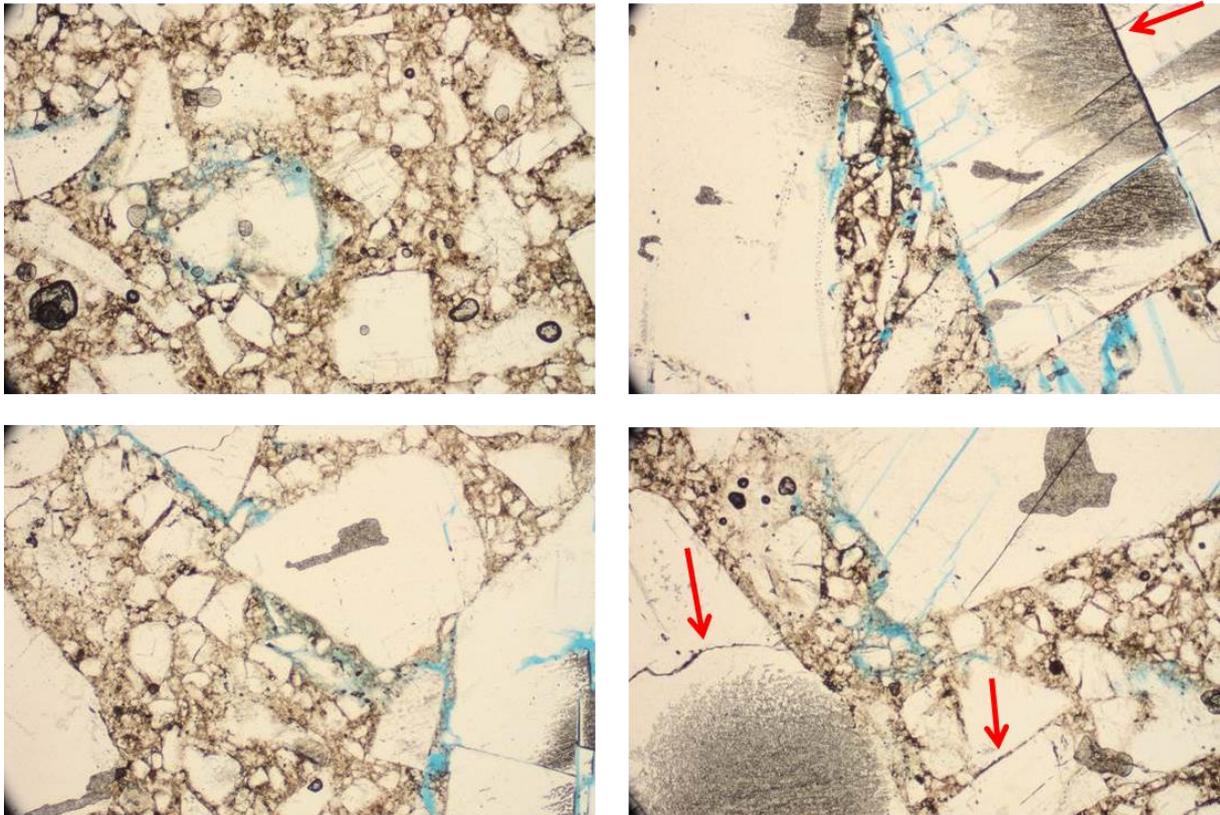


Abb. 5.13: Mikroskopische Aufnahmen aus dem Dünnschliff im unteren Bereich.

6 Bitumen-Versuch

Im Bergwerk Sondershausen wurden zwei in-situ Versuche mit dem Dichtmaterial Bitumen durchgeführt. Eine Versuchskonfiguration ist in Abbildung 6.1 (links) gezeigt. Die wesentliche Abdichtfunktion wird dabei dem weichen Destillationsbitumen zugerechnet, das von hartem Sperrbitumen eingefasst wird (Glaubach et al. 2016b). Das weiche Destillationsbitumen wurde gewählt, um zu erreichen, dass es in der Lage ist, in feine Risse im aufgelockerten Steinsalz einzudringen und damit auch die Auflockerungszone abzudichten. Beim Rückbau des Versuches durch Überbohren wurde augenscheinlich festgestellt, dass ein Eindringen stattgefunden hat (Abb. 6.1, rechts).

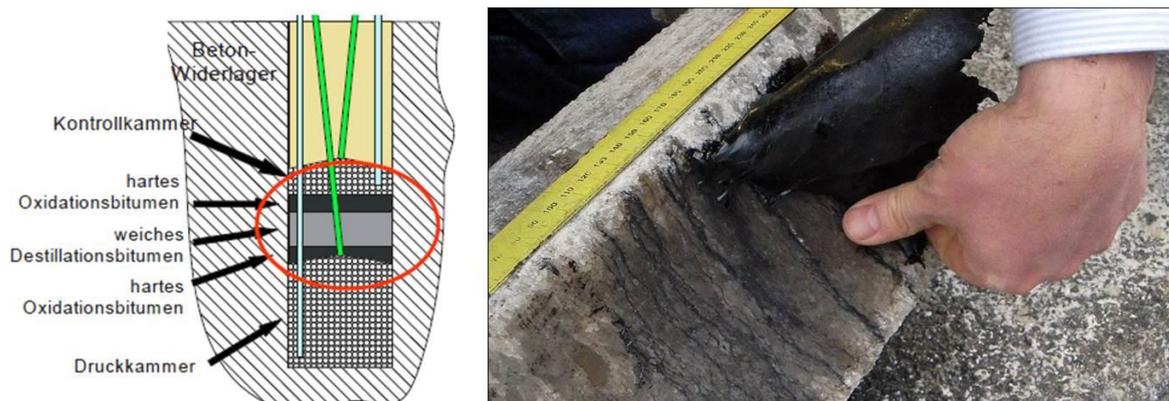


Abb. 6.1: Versuchskonfiguration (links) und rückgebaute Probe mit Blick auf die Bohrlochkontur (rechts).

Um zu untersuchen, wie weit das Destillationsbitumen in den aufgelockerten Steinsalzbereich eingedrungen ist, wurden Dünnschliffe aus dem Bereich des Kontaktes hergestellt. In Abbildung 6.2 sind zwei Aufnahmen der Dünnschliffe mit dem Durchlicht-Scanner dargestellt. Die Kontur der Bohrung, also der Kontakt mit dem Bitumen, ist jeweils an der linken Seite der Aufnahmen. Die feinen dunkelbraunen Fäden stellen das eingedrungene Bitumen dar. Bei den weiter hinten in Salz zu beobachtenden schwarzen Stellen handelt es sich um Fehlstellen, also kleine luftgefüllte Hohlräume im Salz, die in der Aufnahme schwarz erscheinen. Es lässt sich erkennen, dass ein Eindringen des Bitumens bis maximal 0,5 cm in feine Risse des Steinsalzes erfolgt ist.

Abbildung 6.3 zeigt vergrößerte Mikroskopaufnahmen aus dem konturnahen Bereich. Die Ausrichtung der feinen Risse und damit auch das Eindringen des Bitumens ist in der Regel radial gerichtet (Abb. 6.3, links), was aufgrund der Entspannung in axialer Richtung auch zu erwarten ist. Axiale Risse treten nur sehr lokal auf (Abb. 6.3, rechts). Es lässt sich erkennen, dass das Bitumen die feinen Risse sehr gut ausfüllt.

Bei einer weiteren Erhöhung der Auflösung lässt sich feststellen, dass auch durch sehr feine Risse ein ausreichender Durchfluss erfolgt ist, so dass auch sich anschließende größere Hohlräume mit Bitumen gefüllt wurden (Abb. 6.4 oben links).

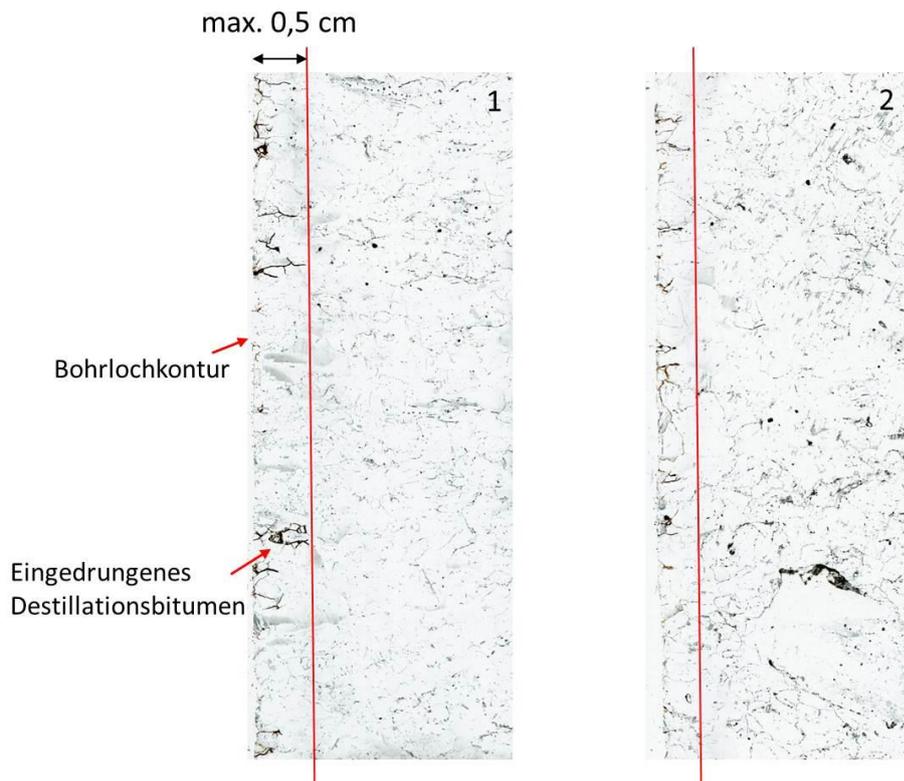


Abb. 6.2: Dünnschliffaufnahmen mit Durchlichtscanner

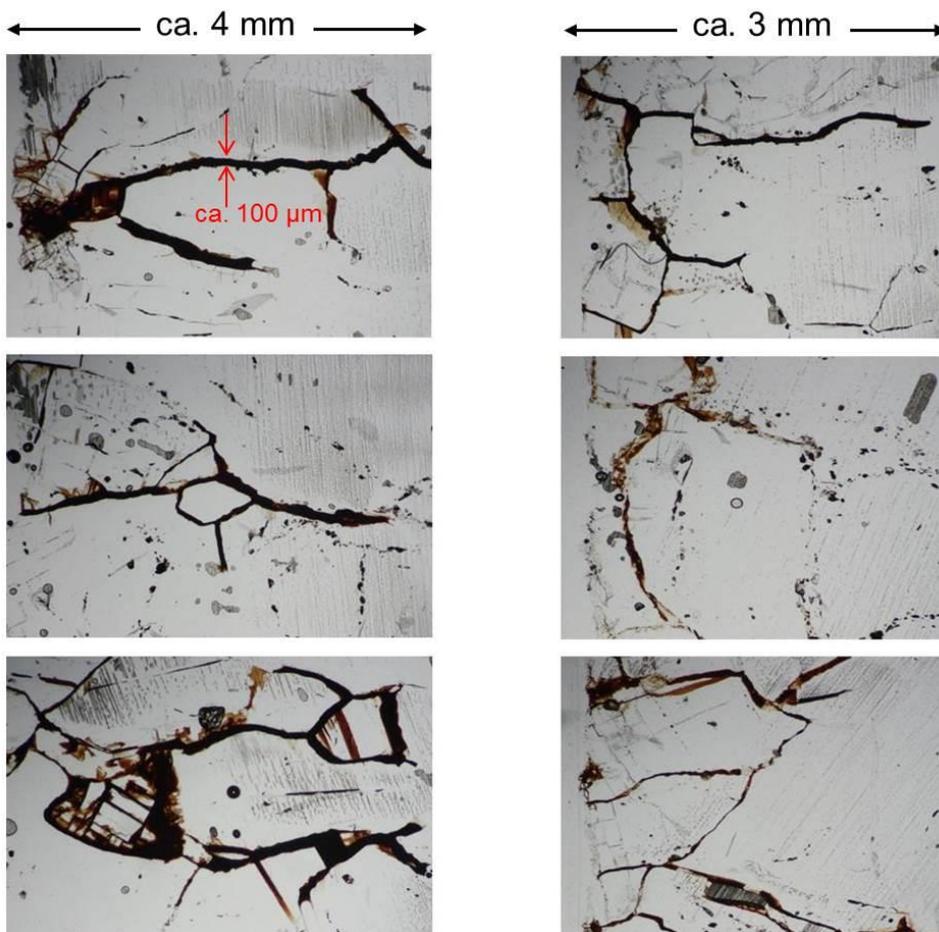


Abb. 6.3: Mikroskopaufnahmen aus dem konturnahen Bereich.

Es lässt sich aber auch feststellen, dass das Bitumen nicht bis in die letzten Hohlräume eindringen konnte. Kleine luftgefüllte Bereiche am Ende der Risse wurden nicht erreicht (Abb. 6.4 unten). Dies kann daran liegen, dass der Druck nicht mehr ausgereicht hat, das Bitumen weiter hinein zu drücken. Eine Abschätzung zur Rissbreite ergab, dass das Bitumen in Risse bis zu einer Weite von etwa $20\ \mu\text{m}$ eindringen konnte.

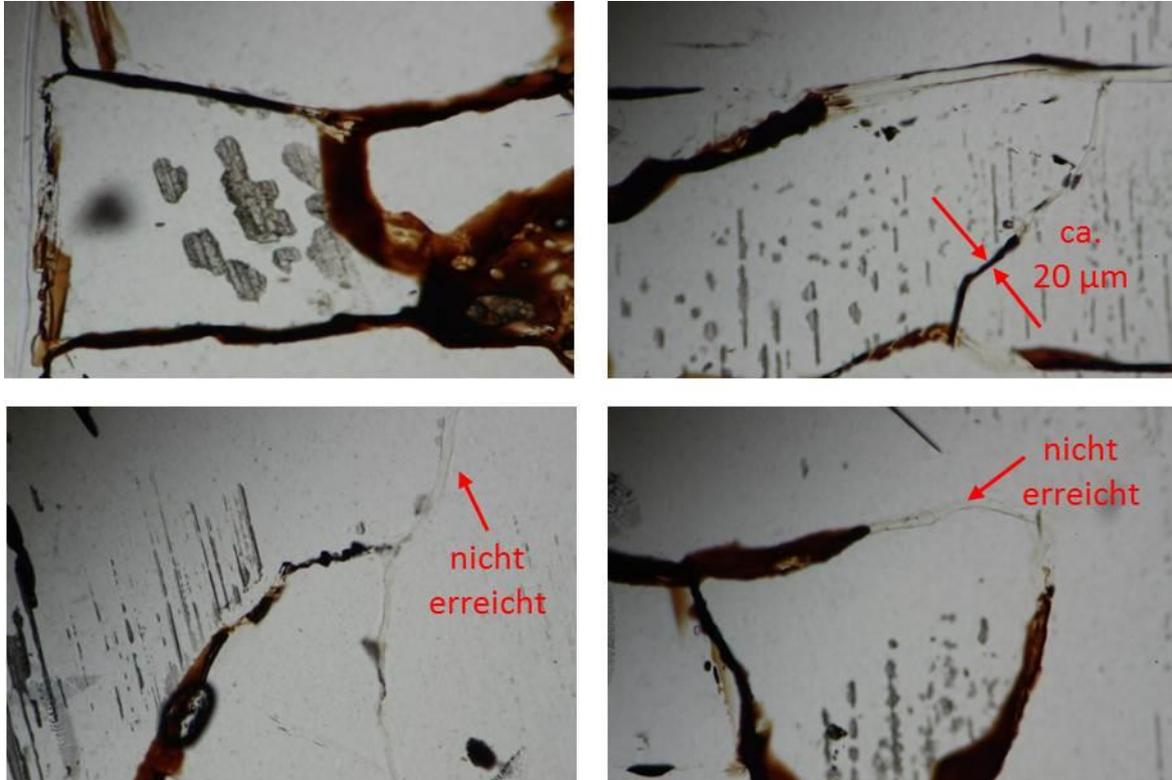


Abb. 6.4: Lokal vergrößerte Mikroskopaufnahmen aus dem konturnahen Bereich.

7 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus den Labor- und in-situ Versuchen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Laborverdichtungsversuch (schlagend)

- Der Benetzungsgrad der EBSM-Probe ist um ca. 50% geringer als der der OBSM-Probe. Die EBSM-Probe erscheint insgesamt etwas dichter zu sein
- Bei beiden Proben weisen vor allem die größeren Körner Risse auf, in die Flüssigkeit eingedrungen ist. Dies macht, insbesondere bei der EBSM-Probe, den größten Teil des Benetzungsgrades aus. Im Ton-Mehl Bereich ist der Benetzungsgrad meist gering.
- Risse in Körnern können durch das Ton-Mehl auch verstopft werden. Dies ist bei der EBSM-Probe etwas ausgeprägter (höherer Tonanteil).
- „Piping-Effekte“ sind bei beiden Proben zu beobachten, jedoch bei der OBSM-Probe deutlich häufiger.

In-situ Verdichtungsversuch (Rüttelplatten)

- Der Benetzungsgrad ist um ein Vielfaches größer als bei den schlagend verdichteten Laborproben.
- Die größeren Körner weisen deutlich weniger Risse auf als bei den Laborproben. Hier wird der Benetzungsgrad eindeutig durch die in den Ton-Mehl Bereich eingedrungene Flüssigkeit bestimmt.
- „Piping-Effekte“ sind nur in Ausnahmefällen zu beobachten.
- Eine leichte Befeuchtung führt zu einer Lösungsaufnahme und damit Ausdehnung des Tonanteils. Der dadurch verringerte Porenraum spiegelt sich im deutlich geringeren Benetzungsgrad wieder.

In-situ Verdichtungsversuch 1 (schlagend)

- Der Benetzungsgrad der Dünnschliffe aus den drei Lagen (drei Mischungen) weist eine signifikante Lagenabhängigkeit auf. Je tiefer die Lage und damit je dichter das Material ist, desto geringer ist der Benetzungsgrad (weniger abhängig von der Art der Mischung).
- Bei der obersten Lage (Knorr-Mischung) sind tendenziell ausgeprägte relativ homogen verteilte Flüssigkeitsansammlungen im Tonmehlbereich festzustellen. Vor allem die großen Körner weisen deutlich mit Flüssigkeit gefüllte Risse auf.
- Bei der mittleren Lage (Optimierte Glaubach-Mischung) ist ebenfalls eine tendenziell homogene Flüssigkeitsverteilung zu erkennen, die aber in der Intensität deutlich geringer ist, als in der oberen Lage (Knorr-Mischung).
- Bei der unteren Lage (Glaubach-Mischung) ist tendenziell keine homogene Flüssigkeitsverteilung zu erkennen. Hier sind tendenziell eher „Hot-Spot“ artige Flüssigkeitsansammlungen festzustellen. Darüber hinaus sind in geringem Umfang lokal „Piping-Effekte“ zu beobachten, die bevorzugt auch mit Rissen in den großen Körnern verbunden sind. Diese Effekte scheinen bevorzugt bei gut verdichteten Proben aufzutreten.

In-situ Verdichtungsversuch 2 (schlagend)

- Der Benetzungsgrad der Dünnschliffe aus dem oberen und unteren Bereich der Probe unterscheiden sich deutlich. Im oberen Bereich ist die Probe etwa 2,5 mal mehr mit Flüssigkeit durchsetzt als im unteren Bereich.
- Im oberen Bereich sind signifikant mehr Kornzertrümmerungen festzustellen, als im unteren Bereich und es sind oben tendenziell mehr Risse mit Fluid gefüllt als unten.
- Im unteren Bereich ist vermehrt eine Benetzung an Kornrändern festzustellen. Dies scheint ein typischer Effekt zu sein, je dichter das Material gepackt ist, desto mehr ist das Fluid an Kornränder gebunden. Risse, die mit ausreichend Tonmaterial gefüllt sind, sind meist unbenetzt.

Bitumen-Proben

- Das Destillationsbitumen ist bis max. 5 mm in den etwas aufgelockerten Saumbereich des Steinsalzes eingedrungen. Viel größer scheint die ALZ auch nicht zu sein.
- Feine Risse bis in einen Bereich von etwa 20 µm werden vom Bitumen erreicht.
- Kleine Resthohlräume am inneren Rand der ALZ verbleiben lokal. Vermutlich ist das Bitumen dort bereits zu kalt bzw. zu dickflüssig für eine vollständige Ausfüllung.

8 Literaturverzeichnis

- Glaubach, U., Hofmann, M., Königer, F., Emmerich, K., Schuhmann, R., Viertel, T. & Wilsnack, T. (2016a). Teilbericht zum Arbeitspaket 3: Laborversuche zu den Arbeitsschritten 2.1 bis 2.6 Im Rahmen des Vorhabens „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.
- Glaubach, U., Hofmann, M., Gruner, M., Königer, F., Emmerich, K., Schuhmann, R., Grafe, F. & Wilsnack, T. (2016b). Teilbericht zum Arbeitspaket 4: Halbtechnische Versuche zu den Arbeitsschritten 2.1 bis 2.6 Im Rahmen des Vorhabens „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.
- Jobmann, M., Müller, C. & Schirmer, S. (2015). Remaining porosity and permeability of compacted crushed rock salt backfill in a HLW repository, Final Report, DBE TECHNOLOGY contribution, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.

BGE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
31224 Peine – Germany
T + 49 5171 43-1520
F + 49 5171 43-1506
info@bge-technology.de
www.bge-technology.de