



Abschlussbericht

Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (GESAV) - Phase 1

FKZ: 02E11092



Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mischo, Pr.Eng.

Bearbeiter: Dr.-Ing. Sebastian Becker

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Freiberg, 23.10.2017



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E11092 gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis..... | V |
| Tabellenverzeichnis..... | IX |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Zusammenfassung/Summary | 4 |
| 2.1 Zusammenfassung..... | 4 |
| 2.2 Summary..... | 8 |
| 3 Versatz für untertägige Auffahrungen in HAW-Endlagern im Salinar | 16 |
| 3.1 Zielstellung von Verfüllmaßnahmen..... | 16 |
| 3.1.1 Stabilisierung des einschlusswirksamen Gebirgsverbandes | 16 |
| 3.1.2 Verzögerung von Lösungszutritten zu den Abfallbehältern unmittelbar nach Einlagerungsende.. | 17 |
| 3.1.3 Schutz des Grubengebäudes vor dem eingelagerten Abfall | 18 |
| 3.2 Stand der Technik beim Versetzen von untertägigen Auffahrungen in HAW-Endlagern im Salinar.... | 19 |
| 3.2.1 Versatzmaterialien für HAW-Endlager | 19 |
| 3.2.1.1 Naturtrockener Salzgrus | 19 |
| 3.2.1.2 Angefeuchteter Salzgrusversatz | 20 |
| 3.2.1.3 Salzbriketts | 21 |
| 3.2.1.4 Salzgrusversatz mit festen Zuschlagsstoffen | 21 |
| 3.2.1.5 Salinare Baustoffe..... | 24 |
| 3.2.1.6 Mineralische Gesteinskörnungen | 24 |
| 3.2.2 Verfüllmaßnahmen in einem Endlager | 25 |
| 3.2.2.1 Verfüllmaßnahmen von Schächten | 25 |
| 3.2.2.2 Verfüllmaßnahmen in Einlagerungsbereichen | 26 |
| 3.2.2.3 Verfüllmaßnahmen in untertägigen Infrastrukturbereichen..... | 27 |
| 3.3 Motivation und Beschreibung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Gefügestabilisierten Salzgrusversatz GESAV – Phase 1“..... | 28 |
| 3.4 Anforderungen an die generelle Eignung als Verfüllmaterial für HAW-Endlager im Salinar..... | 30 |
| 3.2.1 Langzeitbeständigkeit im salinaren Milieu | 30 |
| 3.2.2 Mineralneubildung von gefügestabilisierenden Mineralphasen | 31 |
| 3.2.3 Minimaler Flüssigkeitsgehalt des Versatzmaterials | 32 |
| 3.2.4 Setzungsstabilität der Versatzsäule..... | 32 |
| 3.2.5 Festigkeit und Festigkeitszunahme | 33 |
| 3.2.6 Kriecheigenschaften | 34 |
| 3.2.7 Porositäts- und Permeabilitätsbeziehung | 34 |
| 3.2.8 Lösungsstabilität..... | 35 |
| 3.2.9 Realisierung eines technisch einfachen Einbaus unter Tage..... | 35 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | AP1 – Anpassung möglicher Bindemittelsysteme hinsichtlich der Mischbarkeit und Benetzung von Salzgrus | 37 |
| 4.1 | Identifizierung der Ausgangskomponenten des Versatzmaterials | 37 |
| 4.2 | Entwicklung eines optimierten Salzgruskorngemisches für das Forschungsvorhaben | 38 |
| 4.2.1 | Verwendete Geräte und Methoden zur Salzgruscharakterisierung | 38 |
| 4.2.2 | Auswahl eines Referenzsalzgruses (REOPERM – Phase 1) | 45 |
| 4.2.3 | Entwicklung eines optimierten Salzgruskorngemisches hinsichtlich der Zielstellungen von GESAV | 47 |
| 4.2.3.1 | Auswahl möglicher Salzgruskörnungen für eine Gefügestabilisierung | 47 |
| 4.2.3.2 | Erstellung eines optimierten Kornbandes | 49 |
| 4.2.3.3 | Charakterisierung der optimierten Kornverteilungskurven | 50 |
| 4.2.3.4 | Produktbedingte Schwankungsbreite der Salzgruskorngemische | 53 |
| 4.2.3.5 | Vergleich optimierte Salzgruskorngemische für das FuE-Vorhaben GESAV mit den Referenzsalzgrusen | 56 |
| 4.3 | Mischbarkeit eines auf CaSO_4 - bzw. MgO -basierenden Bindemittelsystems mit dem optimierten Salzgrusversatz | 58 |
| 4.3.1 | Grundlagen der rheometrischen Materialuntersuchungen | 58 |
| 4.3.2 | Mögliche MgSO_4 -basierte Bindemittel | 62 |
| 4.3.2.1 | Grundlagen von MgO -basierenden Bindemittelsystemen | 62 |
| 4.3.2.2 | Auswahl der zu verwendenden MgO -Phase für eine Gefügestabilisierung | 63 |
| 4.3.2.3 | Benetzbarkeit des für GESAV optimierten Salzgruskorngemisches mit einem MgO -basierten Bindemittel | 65 |
| 4.3.3 | Mögliche CaSO_4 -basierte Bindemittel | 67 |
| 4.3.3.1 | Grundlage von CaSO_4 -basierten Baustoffen | 67 |
| 4.3.3.2 | Auswahl geeigneter Calciumsulfate für das FuE-Vorhaben GESAV | 67 |
| 4.3.4 | Fazit der Mischbarkeitsuntersuchungen und Auswahl eines Bindemittelsystems | 71 |
| 5 | AP2 – Möglichkeiten der Polyhalitbildung durch Anpassung der in AP1 untersuchten Rezepturansätze | 72 |
| 5.1 | Definition der notwendigen Ansätze $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$ und Ableitung von Basisrezepturen | 72 |
| 5.1.1 | Einstellung des für die Polyhalitbildung notwendigen Verhältnisses der Feststoffkomponenten $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$ | 72 |
| 5.1.2 | Charakterisierung des Einflusses der flüssigen Phasen für Lösungs- und Rekristallisationsprozesse | 73 |
| 5.1.2.1 | Untersuchtes Bindemittelsystem $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$:gesättigte NaCl -Lösung | 74 |
| 5.1.2.2 | Untersuchtes Bindemittelsystem $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}:\text{MgCl}_2$ -Lösung | 74 |
| 5.2 | Phasen- und Gefügeentwicklung der untersuchten Bindemittelphasen | 74 |
| 5.2.1 | Grundlagen der P-XRD-Analyse | 74 |
| 5.2.2 | Grundlagen der Rasterelektronenmikroskopie (REM) | 76 |
| 5.2.3 | Analyse der Phasen- und Gefügeentwicklung der Bindemittelsysteme | 77 |
| 5.2.3.1 | Die Ausgangskomponenten | 77 |
| 5.2.3.2 | Analyse des Bindemittelsystems $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}$:gesättigte NaCl -Lösung | 79 |
| 5.2.3.3 | Analyse des Bindemittelsystems $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}:\text{MgCl}_2$ -Lösung | 79 |
| 5.2.4 | Langzeitanalyse des Bindemittelsystems $\text{K}^+:\text{Mg}^{2+}:\text{Ca}^{2+}:\text{MgCl}_2$ -Lösung mit einem optimierten Steinsalzgruskorngemisch | 80 |
| 5.2.4.1 | Analyse eines 10 Tage alten Probenkörpers | 80 |
| 5.2.4.2 | Änderung des Phasenbestands nach 31 Tagen | 81 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.2.4.3 | Änderung des Phasenbestands nach 81 Tagen | 82 |
| 5.2.4.4 | Änderung des Phasenbestands nach 2 Jahren und 5 Monaten | 84 |
| 5.2.4.5 | Visuelle Analyse der Gefügestabilisierung des Salzgrusversatzes | 86 |
| 5.2.4.6 | Formulierung der zeitabhängigen Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozesse | 88 |
| 5.2.5 | Fazit der Phasen- und Gefügeuntersuchungen | 90 |
| 5.3 | <i>Gesamtrezeptur des Salzbinders</i> | 92 |
| 5.4 | <i>Probenkörperherstellung</i> | 93 |
| 6 | AP3 - Laborversuche zur Bestimmung von Festigkeit, Kriech- und Relaxationsverhalten, Permeabilität und Quellverhalten | 97 |
| 6.1 | <i>Festigkeitsuntersuchungen</i> | 97 |
| 6.1.1 | Grundlagen der Scherfestigkeitsuntersuchungen | 97 |
| 6.1.2 | Durchführung von Scherversuchen | 99 |
| 6.1.3 | Versuchsergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen | 100 |
| 6.1.3.1 | Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Einbaudichte | 100 |
| 6.1.3.2 | Scherfestigkeit in Abhängigkeit vom Salzbindergehalt | 102 |
| 6.1.3.3 | Einfluss des Probenalters auf die Scherfestigkeit | 104 |
| 6.1.3.4 | Einfluss der spezifischen Salzgrusoberfläche auf die Scherfestigkeit | 105 |
| 6.2 | <i>Porositäts-Permeabilitätsbeziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes</i> | 107 |
| 6.2.1 | Grundlagen der Gasporosität und –permeabilität | 107 |
| 6.2.1.1 | Gasporosität | 107 |
| 6.2.1.2 | Gaspermeabilität | 108 |
| 6.2.2 | Versuchsdurchführung | 110 |
| 6.2.3 | Ergebnisse der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung | 111 |
| 6.2.3.1 | Einbaudichte und Porenanteil | 111 |
| 6.2.3.2 | Dichte-Porositätsbeziehung | 113 |
| 6.2.3.2 | Porositäts-Permeabilitätsbeziehung | 115 |
| 6.3 | <i>Untersuchung des Kompaktions- und Kriechverhaltens</i> | 117 |
| 6.3.1 | Grundlagen des Kompaktions- und Kriechverhaltens | 117 |
| 6.3.2 | Isostatische Kompaktionsversuche | 118 |
| 6.3.2.1 | Versuchsaufbau | 118 |
| 6.3.2.2 | Versuchsdurchführung | 119 |
| 6.3.2.3 | Versuchsergebnisse | 120 |
| 6.3.3 | Triaxialer Langzeitkriechversuch | 125 |
| 6.3.3.1 | Versuchsaufbau | 125 |
| 6.3.3.2 | Versuchsdurchführung | 127 |
| 6.3.3.3 | Versuchsergebnisse | 127 |
| 6.4 | <i>Quellverhalten</i> | 129 |
| 6.5 | <i>Zusätzliches Arbeitspaket: Aussaigerversuch</i> | 130 |
| 6.5.1 | Versuchsaufbau | 130 |
| 6.5.2 | Versuchsdurchführung | 133 |
| 6.5.3 | Darstellung der Versuchsergebnisse | 134 |
| 6.5.6 | Fazit der Untersuchungen des Einbauverhaltens | 137 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7 | AP4 und AP5– Untersuchung des Materialverhaltens im Einbauzustand sowie Untersuchung der alternativen Versatztechnologie | 140 |
| 7.1 | <i>Bodenmechanische Beschreibung des Einbauverhaltens von gefügestabilisierten Salzgrusversatz .</i> | 140 |
| 7.1.1 | Definition des Einbauverhaltens | 140 |
| 7.1.2 | Schüttgutmechanische Eigenschaften | 141 |
| 7.1.4 | Verdichtbarkeit..... | 142 |
| 7.1.5 | Auspressbarkeit von Lösung..... | 143 |
| 7.2 | <i>Einrichtung und Justierung der genutzten Schleudertechnologie.....</i> | 145 |
| 7.2.1 | Grundlagen der Schleuderversatztechnologie | 145 |
| 7.2.2 | Die geplante Schleuderversatztechnologie für In situ-Versuche | 145 |
| 7.2.3 | Arbeitsweise und Einfluss der Versatzschleudermaschine auf Salzgruskornmische..... | 148 |
| 7.2.4 | Durchführung von In situ-Versuchen | 152 |
| 7.2.4.1 | Versuchsbeschreibung und -aufbau | 152 |
| 7.2.4.2 | Versuchsdurchführung | 152 |
| 7.2.4.3 | Versuchsergebnisse | 156 |
| 7.2.5 | Optimierungsansätze für weiterführende In situ-Versuche mit der Schleudertechnologie | 157 |
| 7.2.6 | Fazit hinsichtlich der Nutzung der Schleudertechnologie für eine anschließende In situ-Phase.. | 158 |
| 7.3 | <i>Einrichtung und Justierung der genutzten Blasversatztechnologie</i> | 159 |
| 7.3.1 | Grundlagen der Blasversatztechnologie | 159 |
| 7.3.2 | Adaption der Spritzbetontechnologie auf den Blasversatz | 160 |
| 7.3.3 | Versuchsaufbau | 161 |
| 7.3.4 | Durchführung des In situ-Blasversatzversuchs..... | 162 |
| 7.3.5 | Auswertung des Blasversatzversuches..... | 163 |
| 7.3.5 | Bewertung des Blasversatzes | 166 |
| 7.3.5 | Planung eines Drehkreuzversuchsstands zur Ermittlung der mechanische Materialbelastung beim Rohrtransport..... | 166 |
| 7.4 | <i>Adaption des Schleuderstrahlverfahrens.....</i> | 168 |
| 7.4.1 | Grundlagen der Schleuderstrahltechnologie | 168 |
| 7.4.2 | Zielstellungen der Adaption des Schleuderstrahlverfahrens auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz | 169 |
| 7.4.3 | Adaption der Schleuderstrahltechnologie auf die Einsatzbedingungen für GESAV | 170 |
| 7.5 | <i>Entwicklung einer neuartigen Blasversatztechnologie</i> | 174 |
| 7.6 | <i>Grundlagen eines Qualitätssicherungsprogramms</i> | 175 |
| 7.6.1 | Qualitätssicherung vor dem Einbau | 175 |
| 7.6.2 | Qualitätssicherung nach dem Einbau..... | 180 |
| 8 | Planung einer anschließenden In situ-Phase | 183 |
| 8.1 | <i>Zielstellungen einer In situ-Phase</i> | 183 |
| 8.2 | <i>Planung der In situ-Phase</i> | 183 |
| | Literaturverzeichnis..... | 186 |
| | Anhang..... | 1 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Versatzwiderstand von Salzgrus trocken und angefeuchtet (übernommen aus [Krö09]) | 20 |
| Abbildung 2: Permeabilitäts-Porositätsbeziehung von unterschiedlichen Salzgrus-Bentonitgemischen im Vergleich zu reinem Salzgrus (übernommen aus [Stü11]) | 22 |
| Abbildung 3: Versatzwiderstände von Steinsalz und unterschiedlichen Steinsalz-Bentonitgemischen im Vergleich zueinander (übernommen aus [Stü11]) | 22 |
| Abbildung 4: Ausmaß der zu versetzenden infrastrukturellen Auffahrungen in einem theoretischen Endlager [Bol14] | 28 |
| Abbildung 5: Darstellung der Gefügestabilisierung im Forschungsvorhaben GESAV (angelehnt an [Pat00]) | 29 |
| Abbildung 6: Siebmaschine am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau des Typs Retsch VE 1000 ... | 39 |
| Abbildung 7: Darstellung unterschiedlicher Ungleichförmigkeiten von Korngemischen | 40 |
| Abbildung 8: Darstellung des Schüttwinkels | 42 |
| Abbildung 9: Schematischer Aufbau des verwendeten Marshall-Verdichtungsgerätes nach [Deu12] | 44 |
| Abbildung 10: Darstellung des Referenzsalzgruses und der DEBORA-Sieblinie im Vergleich zur Fuller- Kurve mit $n = 0,5$ | 47 |
| Abbildung 11: Die Kornfraktionen Überkorn, Band 6, Band 8 und Feinsalz | 48 |
| Abbildung 12: Sieblinien der Kornfraktionen aus der untertägigen Brech- und Siebanlage in der Grube Sondershausen | 49 |
| Abbildung 13: Sieblinien der GESAV-Kornmischung ohne Feinsalz (FS) sowie der mit 20 Massen-% Feinsalz optimierten GESAV-Kornmischung | 51 |
| Abbildung 14: Verteilungsdichte der Korngemische 1 und 2 | 52 |
| Abbildung 15: Kornverteilungskurven des Korngemisches Band 6 über den Zeitraum 2013 – 2015 nach Transport | 53 |
| Abbildung 16: Kornverteilungskurven des Korngemisches Band 8 über den Zeitraum 2013 – 2015 nach Transport | 54 |
| Abbildung 17: Kornverteilungskurven des Korngemisches Überkorn über den Zeitraum 2013 - 2015 nach Transport | 55 |
| Abbildung 18: Kornverteilungskurven des Korngemisches Feinsalz über den Zeitraum 2013 - 2015 nach Transport | 55 |
| Abbildung 19: Prinzip der Kontaktwinkelmessung [Bun11] | 59 |
| Abbildung 20: Rheometer „HAAKE MARS II“ | 60 |
| Abbildung 21: Kontaktwinkelmessgerät (TU Bergakademie Freiberg, Institut für mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik) | 62 |
| Abbildung 22: Ergebnisse der rheometrischen Materialuntersuchungen der Sorelphase 5:1:8 und 3:1:8 | 64 |
| Abbildung 23: Salzgrusprobenkörper mit unterschiedlichen MgO-Bindemittelzugaben d3:1:8- Rezeptur (von links nach rechts: 30, 20, 15 und 10 [Masse-%]) | 66 |
| Abbildung 24: Im Forschungsvorhaben verwendete Calciumskomponente | 68 |
| Abbildung 25: Entwicklung der dynamischen Viskosität des α -Halbhydrats | 69 |
| Abbildung 26: Entwicklung der dynamischen Viskosität des beta-Halbhydrats | 70 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 27: Kaliumsulfat des Salzbinders..... | 72 |
| Abbildung 28: Magnesiumsulfat-Monohydrat des Salzbinders | 73 |
| Abbildung 29: Repräsentativer Ausschnitt des Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) „Salzbinder-Probe 1“ und „Steinsalzgrus Probe1“ | 78 |
| Abbildung 30: Repräsentativer Ausschnitt des Bindemittelsystems mit Natriumchloridlösung nach acht Tagen | 79 |
| Abbildung 31: Repräsentativer Ausschnitt des Bindemittelsystems basierend auf Magnesiumchloridlösung..... | 80 |
| Abbildung 32: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 10 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu den Ausgangskomponenten des Salzbinders..... | 81 |
| Abbildung 33: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 31 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 10 Tage alten Probe | 82 |
| Abbildung 34: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 81 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 31 Tage alten Probe | 83 |
| Abbildung 35: Stabilisierung von Kornkontaktflächen durch die Salzmineralneubildung | 84 |
| Abbildung 36: Salzmineralneubildung an den Oberflächen des Halitkorngefüges durch den Salzbinde r | 84 |
| Abbildung 37: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 2 Jahre und 5 Monate alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 81 Tage alten Probe | 85 |
| Abbildung 38: REM-Aufnahme eines Halitkorngefüges mit neu gebildeten Salzmineralisationen | 86 |
| Abbildung 39: REM-Aufnahme der großflächig verteilten neuen Salzmineralphase..... | 86 |
| Abbildung 40: REM-Aufnahme der Gefügestabilisierung von Kornkontaktflächen im Versatzmaterials | 87 |
| Abbildung 41: Rissbildung innerhalb der neu gebildeten Salzmineralphase aufgrund einer mechanische Belastung der Probe | 88 |
| Abbildung 42: Umwandlung der Zwischenphase (unten) in die langzeitbeständige Salzmineralphase (oben) - bearbeitet | 90 |
| Abbildung 43: Zwangsmischer am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg | 94 |
| Abbildung 44: Probenform zur Herstellung von Versatzproben am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg..... | 95 |
| Abbildung 45: Darstellung des Mohr-Coulomb´schen Bruchkriteriums für Scherfestigkeitsuntersuchungen..... | 98 |
| Abbildung 46: MTS-Scher-Test-System des Modells 816 [Pop15] | 99 |
| Abbildung 47: Überblick über die Scherfestigkeit der untersuchten gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben 538/25, 538/26 und 538/27 mit unterschiedlicher Einbaudichte nach [Pop15] | 101 |
| Abbildung 48: Abhängigkeit der Scherfestigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials in Abhängigkeit vom Salzbindegehalt (übernommen aus [Pop15]) | 103 |
| Abbildung 49: Vergleich der Scherfestigkeiten von Probenkörpern nach t = 6 Wochen und einem Jahr nach [Pop15] | 104 |
| Abbildung 50: Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die Scherfestigkeit von gefügestabilisiertem Salzgrusversatz nach [Pop15]..... | 106 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 51: Theoretisch ermittelte Dichte-Porositäts-Beziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes | 113 |
| Abbildung 52: Labortechnisch ermittelte Porositäts-Dichte-Beziehung der in Tabelle 17 dargestellten Probenkörper im Vergleich mit der theoretisch ermittelten Dichte-Porositäts-Beziehung von gefügestabilisierten Salzgrusversatz [Pop15] - bearbeitet | 114 |
| Abbildung 53: Darstellung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von gefügestabilisierten Salzgrusversatz mit und ohne Feinsalzzugabe (übernommen aus [Pop15])..... | 116 |
| Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung des isostatischen Kompaktionsversuchs mit Permeabilitätsmessung (links) und Porositätsmessung (rechts) - übernommen aus [Pop15] | 118 |
| Abbildung 55: Darstellung der Volumenverformung innerhalb der Druckrampe im isostatischen Kompaktionsversuch bis zum Erreichen von 20 MPa nach [Pop15] | 121 |
| Abbildung 56: Vergrößerung des Anfangsbereichs des isostatischen Kompaktionsversuchs nach [Pop15] | 122 |
| Abbildung 57: Porositätsabnahme des Probenmaterials während der isostatischen Kompaktion [Pop15] - bearbeitet | 123 |
| Abbildung 58: Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung während der Kompaktion von gefügestabilisierten Salzgrusversatz - übernommen aus [Pop15]..... | 124 |
| Abbildung 59: Versuchsaufbau zur Durchführung des triaxialen Langzeitkriechversuchs - übernommen aus [Pop15] | 126 |
| Abbildung 60: Kompaktions- und Kriechverhalten von gefügestabilisierten Salzgrusproben mit unterschiedlichen Salzbindergehalt - übernommen aus [Pop15]..... | 128 |
| Abbildung 61: Skizze des Versuchsaufbaus zur Überprüfung der hydraulischen Stabilität (nicht maßstabsgetreu) nach [Mis16] | 132 |
| Abbildung 62: Entnahmeschema (nicht maßstabsgetreu) der Versatzproben zur Ermittlung des Wassergehaltes (übernommen aus [Sch16]) | 134 |
| Abbildung 63: Schematische Darstellung der Versuchsergebnisse | 136 |
| Abbildung 64: Abhängigkeit der Sättigungszahl von der Einbaudichte des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes | 144 |
| Abbildung 65: Schneefräse in der Untertage-Verwertung Hattorf-Wintershall [Hom16]..... | 145 |
| Abbildung 66: Schneefräse Supra 3000 UT der Firma Schmidt Winterdienst- und Kommunaltechnik GmbH auf dem Bergwerk Sondershausen [Foto: Toni Schmidt] | 146 |
| Abbildung 67: Schematische Darstellung der untertägigen Versatzschleudermaschine nach [Fir07] - bearbeitet von [Sch16]..... | 147 |
| Abbildung 68: Schematischer Aufbau der Räumkomponente nach [Fir07] - bearbeitet von [Sch16] | 148 |
| Abbildung 69: Exemplarischer Arbeitsort der Schleuderversatzmaschine in der UTD Sondershausen [Foto: Toni Schmidt]..... | 150 |
| Abbildung 70: Ausbildung eines Firstspaltes nach der Erstverfüllung von Kammern mit angefeuchtetem Salzgrusversatz [Foto: Toni Schmidt]..... | 151 |
| Abbildung 71: Arbeit der Schleuderversatzmaschine unter Tage [Foto: Toni Schmidt] | 151 |
| Abbildung 72: Verwendeter Zwangsmischer für untertägige In-situ-Versuche in der Grube Sondershausen [Sch16] | 153 |
| Abbildung 73: Verwendete Plattenmessensoren aus [Sch16] | 154 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 74: Messsignalwandler (links) und Verteiler (rechts) während des In-situ-Versuchs [Sch16] | 154 |
| Abbildung 75: Untertägiger Versuchsort vor Versuchsbeginn [Sch16]..... | 155 |
| Abbildung 76: Verteilung der Probenkörper im Versatzkörper zur Aufnahme des Versatzmaterials durch die Versatzschleuder [Sch16]..... | 156 |
| Abbildung 77: Korngrößenverteilung vor dem Einbauversuch (Probe 1) sowie nach dem Versuch (Proben 2 - 5); Anordnung nach Abbildung 76 [Sch16]..... | 156 |
| Abbildung 78: Spritzbetonmaschine des Typs Aliva-237 [Sik15]..... | 160 |
| Abbildung 79: Versuchsaufbau des Probenkastens zur Messwertermittlung der Verdichtungsenergie durch die Spritzbetonmaschine | 162 |
| Abbildung 80: Ergebnisse der Plattendruckmessgeber im Blasversatzversuch..... | 164 |
| Abbildung 81: Nahaufnahme eines eingeblasenen Versatzlörpers mit GESAV-Material | 165 |
| Abbildung 82: Darstellung eines aufgebrochenen Probenkörpers erstellt durch die Spritzbetontechnologie | 165 |
| Abbildung 83: Konstruktionsbeispiel für den Drehkreuzversuchsstand | 167 |
| Abbildung 84: Aufbau einer Betonschleudermaschine – übernommen aus [Sch99] | 168 |
| Abbildung 85: Entwurfskonstruktion der Schleudereinheit einer Schleuderstrahlmaschine [Wei17] | 171 |
| Abbildung 86: Vorläufige Konstruktion der Schleuderstrahlmaschine für das Einbringen von gefügestabilisiertem Salzgrusversatz nach [Wei17]..... | 173 |
| Abbildung 87: Aerosolversuchsstand | 175 |
| Abbildung 88: Sieblinien der labortechnischen Untersuchung zur Eignung der Siebanalyse..... | 177 |
| Abbildung 89: Zusammenhang von Korngrößenverteilung des Salzgruses und Schüttdichte..... | 178 |
| Abbildung 90: Zusammenhang von Salzbindeanteil und Schüttdichte | 178 |
| Abbildung 91: Zusammenhang von Polyhalittrockengemischanteil und Schüttdichte | 179 |
| Abbildung 92: Zusammenhang von Lösungsanteil und Schüttdichte | 180 |
| Abbildung 93: Zusammenhang von Brinellhärte und Salzbindeanteil..... | 182 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Darstellung der Zusammensetzung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes..... | 38 |
| Tabelle 2: Charakterisierung eines Korngemisches anhand der Ungleichförmigkeitszahl und der Krümmungszahl nach [Deu161]..... | 41 |
| Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des Salzgruses aus der Steinsalzgrube in Sondershausen | 48 |
| Tabelle 4: Materialeigenschaften der optimierten Salzgrusgemische Korngemisch 1 und 2 sowie dem Referenzsalzgrus | 51 |
| Tabelle 5: Charakterisierung der optimierten Salzgruskorngemische für GESAV nach Kapitel 5.2 im Vergleich zum Referenzsalzgrus | 56 |
| Tabelle 6: Überblick über die Kennwerte der MgO-Bindemittelsysteme (28 °C)..... | 65 |
| Tabelle 7: Liste aller untersuchten Calciumsulfatphasen (HH = Halbhydratphase) | 68 |
| Tabelle 8: Verhältnis der Feststoffkomponenten im Salz binder zueinander zur Generierung des Polyhalits..... | 73 |
| Tabelle 9: Analytierte Probenkörper mit Angabe des Probenalters für die P-XRD-Analyse nach [Ins16] | 76 |
| Tabelle 10: Generalisierter zeitabhängiger Phasenbestand des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes | 91 |
| Tabelle 11: Gesamt Rezeptur des Salzbinders im Forschungsvorhaben GESAV..... | 92 |
| Tabelle 12: Rezepturansätze für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz | 93 |
| Tabelle 13: Auflistung der Probenkörper zur Untersuchung der Scherfestigkeit (übernommen aus [Pop15]) | 99 |
| Tabelle 14: Auflistung der gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben für die Porositäts- und Permeabilitätsuntersuchungen (nach [Pop15])..... | 110 |
| Tabelle 15: Ober- und Untergrenze des Porenanteils des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes in Abhängigkeit von der Einbaudichte | 112 |
| Tabelle 16: Zusammensetzung der verwendete Probenkörper im isostatischen Kompaktionsversuch (nach [Pop15])..... | 119 |
| Tabelle 17: Verwendete Probenkörper im triaxialen Langzeitkriechversuch (nach [Pop15]) | 127 |
| Tabelle 18: Wassergehalte der gefügestabilisierten Salzgrusversatzsäule nach einem Monat (übernommen aus [Sch16]) | 135 |
| Tabelle 19: Vergleich von gefügestabilisierten Salzgrusversatz im Einbauzustand (t = 0) im Vergleich zu herkömmlichen Salzgrusversatz (Referenzsalzgrus) | 141 |
| Tabelle 20: Untersuchungsergebnisse der Verdichtbarkeitsuntersuchung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im Einbauzustand im Vergleich zum Referenzsalzgrus..... | 142 |
| Tabelle 21: Untersuchte Schüttgut-Prüfverfahren am GESAV-Material | 176 |
| Tabelle 22: Untersuchte Baustoff-Prüfverfahren an ausgehärteten Proben aus GESAV-Material..... | 181 |

Einleitung

Die Endlagerung von radioaktiven wärmeentwickelnden Abfällen in tiefen geologischen Steinsalzformationen ist ein Forschungsschwerpunkt in der Bundesrepublik Deutschland. Steinsalz wird aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit, dem Kriechverhalten und der Abwesenheit von Fluiden national als auch international für die Nutzung als Wirtsgestein für HAW-Endlagerung (HAW = engl.: high active waste) in tiefen geologischen Formationen untersucht. Die einzulagernden Abfälle sollen in untertägig aufgefahrenen Kammern, Strecken oder Bohrlöchern eingelagert werden. Hierfür müssen Hohlräume für den Zugang, die Aus- und Vorrichtung sowie die Einlagerung im Wirtsgestein aufgefahren werden. Um Spannungen aus dem umgebenden Gebirge aufzunehmen und somit die geologische Barriere zu stützen sowie die Bildung von Fluidwegsamkeiten zu vermeiden, wird das Versetzen dieser Hohlräume nach dem Ende der Einlagerung notwendig. Als Versatzmaterialien werden lagerstättentypische oder –eigene Materialien verwendet, um die Langzeitstabilität der Versatzkörper sicherzustellen. Salzgrus ist dabei aufgrund der Eigenschaften als arteigenes Material von besonderer Bedeutung. Das Einbringen von Versatz geschieht im Rahmen der Verfüllung eines Endlagers bzw. eines Grubenfeldes und ist Voraussetzung für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems.

Salzgrus ist ein granulares Korngemisch, das aus der bergmännischen Steinsalzgewinnung stammt. Das Material erfüllt aufgrund seiner Gewinnung aus natürlichen Steinsalzlagerstätten die Kriterien der Langzeitstabilität und kommt somit für eine Verwendung in HAW-Endlagern infrage. Salzgrusversatz wird in Strecken und Infrastrukturhohlräumen durch pneumatische (Blasverfahren) oder mechanische Verfahren (Schleuderverfahren, Laderversatz und Schrapperversatz) eingebracht. Ein Verfüllungsgrad von ca. 100 % ist bei trockenem oder angefeuchtetem Salzgrusversatz nicht möglich. Dies ist zum einen auf technische Probleme beim Einbringen des Versatzes zurückzuführen (Blasschatten), zum anderen ist dies durch Materialparameter nicht möglich (Setzungen des Korngefüges aufgrund des Eigengewichtes sowie flache Schüttwinkel und fehlende Kohäsion). Eine Stabilisierung des Gebirges durch den eingebrachten Versatz beginnt sobald der Versatzwiderstand durch die Kompaktion aufgrund des auflaufenden Gebirges ausreichend gestiegen ist. Dies kann aufgrund des geringen Verfüllungsgrades mehrere Monate bis Jahre in Anspruch nehmen.

Um die Stabilisierung der geologischen Barriere durch den eingebrachten Versatz zu beschleunigen, sind ein hoher Verfüllungsgrad, ein setzungsarmes Materialverhalten sowie eine ausreichende Anfangsfestigkeit des Versatzes erforderlich. Aus diesem Grund wird in diesem Forschungsvorhaben das Korngerüst des Versatzmaterials stabilisiert, sodass die notwendige Energie zur Erzeugung von Relativbewegungen der Salzgruskörner zueinander erhöht wird. Dieses wird im folgenden Forschungsvorhaben als Gefügestabilisierung des Salzgrusversatzes bezeichnet. Die Stabilisierung des Korngefüges wird durch Salzmineralneubildungen an den Kornkontaktflächen der Salzgruskörner erreicht. Als Hauptmineralneubildung wird der Polyhalit ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$) genutzt. Polyhalit ist ein Mehrfachsatz, das natürlicherweise in Steinsalzlagerstätten auftritt. Dieses Mineral wird aufgrund des langzeitstabilen Verhaltens forciert.

Das Gesamtziel des Forschungsvorhabens ist die Generierung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes für HAW-Endlager, der über die folgenden Eigenschaften verfügt:

- Erreichbarer Verfüllungsgrad von nahezu 100 % nach dem Einbau unter Tage
- Keine Setzungen des Versatzmaterials nach dem Einbau
- Bildung des Polyhalits als langzeitstabile Salzmineralneubildung
- Minimaler Gehalt des Bindemittels an der Gesamtmasse des Versatzes (< 10 Massen-%)
- Beibehalten der Schüttguteigenschaften beim Einbau unter Tage trotz Zugabe eines Bindemittels
- Einbau unter Tage ohne Widerlager, Schalungen und/oder Drainagen
- Geringere oder mindestens vergleichbare Permeabilität wie herkömmlicher Salzgrusversatz

Im Rahmen des BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) geförderten Vorhabens 02E11092 „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz“ (GESAV) – Vorhabensetappe 1 wurde ein Salzgrusmaterial entwickelt, das durch ein langzeitstabiles und optimiertes Korngefüge einen nahezu vollständigen Verfüllungsgrad erreicht und Spannungen aus dem umgebenden Gebirge unmittelbar nach dem Einbringen aufnehmen kann. Das Versatzmaterial wurde im Rahmen der Vorhabensetappe 1 in Laborversuchen entwickelt und die entsprechenden Anforderungen nachgewiesen. Die im Labor nachgewiesenen Versatzeigenschaften sollen in einem in situ Versuch mittels unterschiedlicher

Einbauverfahren überprüft werden. Dieser in situ Versuch wird im Rahmen der Vorhabensetappe 1 vorbereitet und in der Vorhabensetappe 2 durchgeführt.

Das Vorhaben 02E11092 „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz“ (GESAV) – Vorhabensetappe 1 gliedert sich in sechs Arbeitspakete, die wie folgt benannt wurden:

- AP1: Anpassung möglicher Bindemittelsysteme hinsichtlich der Mischbarkeit und Benetzung mit Salzgrus
- AP2: Möglichkeit der Polyhalitbildung durch Anpassung der in AP1 untersuchten Rezepturansätze
- AP3: Laborversuche zur Bestimmung von Festigkeit, Kriech- und Relaxationsverhalten, Permeabilität und Quellverhalten
- AP4: Untersuchung des Materialverhaltens im Einbauzustand
- AP5: Voruntersuchung der alternativen Einbautechnologie
- AP6: Abschluss Etappe I mit Planung der Etappe II und Berichterstellung

Die Gliederung des Abschlussberichtes des Vorhabens 02E11092 „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz“ (GESAV) – Phase 1 orientiert sich an der oben genannten Gliederung des Vorhabens in die entsprechenden Arbeitspakete.

Folgende Partner waren am Forschungsvorhaben beteiligt:

TU Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (Federführung und Laborversuche)

Institut für Anorganische Chemie (Rezepturenentwicklung und Laborversuche)

Unternehmen

Institut für Gebirgsmechanik GmbH (AN Laborversuche)

GSES mbH (AN Vorversuch und Materialbereitstellung Salzgrus)

TS-Bau GmbH, NL Jena (AN Vorversuch)

Knauf Gips KG (Materialbereitstellung CaSO₄-Halbhydrate)

2 Zusammenfassung/Summary

2.1 Zusammenfassung

Das Verfüllen bergmännisch aufgefahrener Infrastrukturhohlräume in einem HAW-Endlager im Salinar wird einen Großteil der Verfüllmaßnahmen ausmachen. Für diese Aufgabe wurde der gefügestabilisierte Salzgrusversatz entwickelt, der im Vergleich zu Salzgrus oder salinaren Baustoffen über optimierte Versatzeigenschaften verfügt. Dies wird durch eine neuartige Rezeptur und Wirkungsweise des Versatzmaterials erreicht.

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung und Prüfung der Eignung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes als Verfüllmaterial für HAW-Endlager im Salinar. Als Ergebnis kann ein neuartiges Versatzmaterial vorgestellt werden, dessen Eignung als Verfüllmaterial nachgewiesen werden konnte. Diese Eignung wurde durch die Prüfung mechanischer und hydraulischer Versatzeigenschaften im Labormaßstab erbracht.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 konnte bestätigt werden, dass eine Mischbarkeit von Salzgrus und geeigneten Bindemittelsystemen möglich ist. Hierbei wurden Untersuchungsschwerpunkte auf MgO- und CaSO₄-basierte Bindemittelsysteme gelegt. Mittels rheologischen Untersuchungen sowie Mischbarkeitsuntersuchungen wurde die Eignung beider Bindemittelsysteme zur Erstellung von Probenkörpern bestätigt.

Im Arbeitspaket 2 wurde der Schwerpunkt auf CaSO₄-basierte Bindemittel mit dem Ziel der Polyhalitbildung gelegt. Dies ist auf das langzeitbeständige Materialverhalten zurückzuführen. Es wurde erwartet, dass die Ausgangskomponenten des Salzbinders durch Lösungs- und Mineralneubildungsprozesse über metastabile Phasen im hexären System der ozeanischen Salze in Polyhalit umgewandelt werden. Der Polyhalit ist ein im hexären System der ozeanischen Salze langzeitbeständiges Salzmineral, das in natürlichen Steinsalzlagerstätten auftreten kann. Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde ein geeignetes Bindemittel, das als Salz binder definiert wird, entwickelt, das zu einer Gefügestabilisierung von Steinsalzgruskörnungen führen soll. Der entwickelte Salz binder besteht zu 75 Masse-% aus einer Polyhalittrockenmischung, die aus einer Magnesiumsulfat-, Kaliumsulfat- und Calciumsulfatkomponente besteht, sowie aus 25 Masse-% einer fünf molalen Magnesiumchloridlösung. Die Polyhalitbildung wurde durch P-XRD-Analysen nachgewiesen.

Das Arbeitspaket 3 befasst sich mit der Probenkörperherstellung und hydro-mechanischen Prüfung des Versatzmaterials. Es wurden zwei zentrale Rezepturansätze des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes entwickelt, die aus 85 Masse-% einer Salzgruskörnung sowie 15 Masse-% des Salzbinders bestehen. Die Rezepturansätze unterscheiden sich im Feinkorngehalt der Salzgruskörnung. Durch die Salzbindezugabe zum Salzgruskornmisch wird durch die in Arbeitspaket 2 bestätigte Salzmineralneubildung eine Gefügestabilisierung erreicht. Sowohl der Rezepturansatz ohne eine zusätzliche Feinkornerhöhung sowie der Rezepturansatz mit zusätzlichem Feinkorngehalt wurden labortechnisch untersucht.

Im Rahmen der labortechnischen Materialuntersuchungen wurden die entwickelten Rezepturansätze des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials hinsichtlich der Eignung als Verfüllmaterial für infrastrukturelle Auffahrungen in einem HAW-Endlager im Salinar untersucht. Zum Eignungsnachweis wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Zeitabhängige Phasen- und Gefügeentwicklung im Versatzmaterial
- Lösungsverteilung und –stabilität während und nach dem Einbau
- Porositäts- und Permeabilitäts-Beziehung im Einbauzustand und während der Kompaktion
- Festigkeitsentwicklung
- Kompaktions- und Kriechverhalten

Die Phasen- und Gefügeuntersuchungen mittels P-XRD zeigten, dass durch die Salzbindezugabe eine zeitabhängige Änderung des Phasenbestands im Versatz, wie unter AP2 im Salzbinde festgestellt, vorliegt. Mit der Änderung des Phasenbestands geht ebenfalls eine Änderung des Gefüges einher. Durch die Lösung der festen Salzbindekomponenten und Auskristallisation an den Steinsalzoberflächen, findet ein „Verwachsen“ der Halitkörner miteinander statt. Dies wurde durch REM-Aufnahmen nachgewiesen.

Damit im Versatzmaterial eine durch Lösungs- und Mineralneubildungsvorgänge bewirkte Gefügestabilisierung homogen abläuft, ist eine gleichmäßige Verteilung des Salzbinders im Versatzmaterial notwendig. Dieses wurde durch einen Aussaigerversuch untersucht. Der Aussaigerversuch analysiert den Einfluss der Erdanziehung auf die Versatzkomponenten während und nach dem Einbau. Es wurde gezeigt, dass eine inhomogene Verteilung der flüssigen Phase im Versatzmaterial nur bedingt über die Zeit stattfindet. Eine Veränderung des Lösungsgehaltes in unterschiedlichen Versatzhöhen nach einem Monat, der einen

negativen Einfluss auf die Gefügestabilisierung hat, konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Porositäts- und Permeabilitätsbeziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes entspricht im Einbauzustand dem von herkömmlichen Salzgrusversatzmaterialien. Die Permeabilitäten im Einbauzustand ($n > 30\%$) liegen im oberen Wertebereich von bekannten Salzgrusversatzmaterialien. Die Kompaktion des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials ($n < 20\%$) geht mit einer starken Verringerung der Permeabilität einher. Die Abnahme der Permeabilität ist signifikant höher als bei bekannten Salzgrusversatzmaterialien und der Wertebereich der Permeabilität liegt nach einer Kompaktion ($n < 10\%$) im unteren Bereich der bekannten Versatzmaterialien. Dies stellt eine vorteilhafte Dichteigenschaft des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials dar.

Eine Festigkeitszunahme des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials durch die Phasenneubildung und Gefügeentwicklung konnte mittels der Scherfestigkeitsuntersuchungen im Sinne einer Kohäsion nachgewiesen werden. Dabei wurde gezeigt, dass die Festigkeitsentwicklung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes von drei Faktoren beeinflusst wird:

- Einbaudichte
- spezifische Oberfläche des Salzgruskorngemisches
- Versatzalter

Eine hohe Einbaudichte sowie die Erhöhung der spezifischen Oberfläche des Salzgruskorngemisches erhöht die Festigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes durch die Zunahme von gefügestabilisierten Kornkontaktstellen. Durch die zeitabhängigen Lösungs- und Mineralneubildungsprozesse nimmt die Festigkeit ebenfalls mit dem Versatzalter zu. Die ermittelten Kohäsionen des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes nach drei Wochen liegen deutlich höher als bindige plastische Tone. Nach drei Wochen wurde bei dem Versatzmaterial mit einem Korngemisch ohne erhöhte Feinkorngehalte ($\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$) eine Festigkeit von 0,2 MPa erreicht. Durch die Erhöhung der spezifischen Kornoberfläche konnte im selben Zeitraum und Einbaudichte eine Festigkeit von 0,4 MPa ermittelt werden. Nach einem Jahr stieg die Festigkeit des Korngemisches mit geringer spezifischer Oberfläche des Korngemisches von 0,2 MPa auf 0,6 MPa. Eine Eigenstabilität des Versatzmaterials (Setzungsstabilität) sowie eine frühzeitige Gebirgsstabilisierung sind zu erwarten.

Das Ergebnis der Kompaktions- und Kriechversuche zeigte, dass durch die Gefügestabilisierung des Salzgrusversatzes ein optimiertes Kompaktions- und Kriechverhalten vorliegt. Die Porositätsabnahme durch eine äußere Belastung ist mit herkömmlichen Salzgrusversatzmaterialien vergleichbar. Spannungsinduzierte Rissbildungen im Gebirge durch den Widerstand des Versatzkörpers gegen die Gebirgsdeformation können ausgeschlossen werden.

Durch das Aufkriechen des umgebenden salinaren Gebirges auf den Versatzkörper wird eine Kriechbewegung des Salzgruses im Versatz verursacht. Aus diesem Grund wurden Kriechversuche über lange Zeiträume durchgeführt. Diese Versuche zeigten, dass der Salzgrusversatz ein für die Gebirgsstabilisierung vorteilhaftes Materialverhalten aufweist. Durch die Verzögerung der Versatzkompaktion bis zum Erreichen einer bestimmten Belastung, können Spannungen aus dem Gebirge aufgenommen werden. Nach ausreichend hohen Belastungen, kompaktiert das Versatzmaterial wie gewöhnlicher Salzgrusversatz.

Während der Versuchsdurchführungen wurde erkannt, dass bei der Herstellung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes die Ausrichtung des Salzgruskorngefüges einen hohen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat. Durch die richtungsabhängige Verdichtung des Korngefüges wird eine anisotrope Gefügeentwicklung verursacht. Dies ist vor allem bei in situ Versuchen zu beachten.

Das Arbeitspaket 4 umfasst die Untersuchung des Materialverhaltens im Einbauzustand. Die schüttgutmechanischen Eigenschaften eines Versatzmaterials sind für die Qualität der untertägigen Versatzbauwerke sowie für den technischen Einbauaufwand von hoher Bedeutung. Aus diesem Grund wurden grundlegende Materialeigenschaften des Versatzes im Einbauzustand bestimmt. Dies sind die lockerste und dichteste Lagerung, Schüttwinkel, Kornverteilung sowie die Verdichtbarkeit. Es zeigte sich, dass die Materialeigenschaften einen technisch einfachen Einbau unter Tage begünstigen.

Um die in Arbeitspaket 3 identifizierten Eigenschaften des Versatzmaterials in situ zu erreichen, sind geeignete Einbautechnologien auszuwählen. Aus diesem Grund wurden Voruntersuchungen im Arbeitspaket 5 durchgeführt um optimierte Einbautechnologien zu identifizieren, die optimale Versatzeigenschaften in situ ermöglichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der gefügestabilisierte Salzgrusversatz für Verfüllmaßnahmen von infrastrukturellen Auffahrungen in HAW-Endlagern im Salinar geeignet ist. Besonders die mögliche Vollverfüllung, frühe

Gebirgsstabilisierung, frühe Dichtwirkung und der technisch einfache Einbau unter Tage bieten gegenüber herkömmlichen Salzgrusversatzmaterialien einen Vorteil.

2.2 Summary

Introduction

The use of underground geological formations for the isolation of high level waste (HLW) from the biosphere is one of the preferred methods in Germany as well as internationally. Examples for this purpose are the Waste Isolation Pilot Plant in Carlsbad (New Mexico / USA) and the mines Morsleben and Asse (Germany). For this purpose rock salt formations have to be considered as an adequate host rock due to the high heat conductivity, ductility, and low permeability.

Shafts, drifts, caverns and boreholes have to be mined into the host rock during the process of waste disposal. These excavations are required for the entry, the transport and the waste disposal itself. Mining activities within the saliniferous rock formation change the lithostatic pressure and cause convergences that lead to a deformation of the surrounding rock. The result of high rock deformation can be fissures around the drifts and caverns that can work as a flow path for fluids. The total rock deformation depends on the mined volume.

Backfill will be used to refill the excavations to reduce the total deformation of the surrounding rock formations. The backfill material stabilizes the surrounding rock formation and reduces permeability of the former excavations. The backfill will remain within the host rock and will act as an additional geotechnical barrier to guarantee the isolation of the waste material. Therefore the backfill material has to be long-term stable. As proven in several research projects crushed rock salt is an adequate backfill material for HLW-repositories in saliniferous rock formations due to its origins.

Crushed rock salt is a bulk material that is produced by mining saliniferous formations. In repositories, this material is mainly used as a dry backfill which is placed in the excavations by the use of mechanical (loading machine, slinger machine or scraper) or pneumatic energy (pneumatic stowing). In Germany it is intended to use dry crushed rock salt < 64 mm for backfill in a possible future repository in saliniferous formations. After being put into place the porosity of the backfill is up to 35 %, due to its size and shape of the material.

Motivation for the research project

Due to the ductility of rock salt the surrounding rock formations deform into the mined drifts and caverns over time. For this reason excavations that have been mined into the host rock have to be refilled as soon as possible after the waste was emplaced in order to minimize the deformation and stabilize the geological barrier. A stabilization of the surrounding rock by the backfill starts immediately after the pillars are stabilized. Over time the backfill carries the surrounding rock. In case of a gap between backfill and the surrounding rock, support requires more time. Such gaps are for example roof clefts that are mainly caused by self-compaction of the backfill material or due to reasons during the backfilling process. Due to settlements as well as the behavior as a bulk material, a 100 % refill of openings cannot be achieved by crushed rock salt on its own. The processes which cause a self-compaction are fracturing, grain deformation and grain re-orientation caused by the tendency of the grain structure to fill the pores due to the force of gravity.

In contrast to the crushed rock salt based backfill material, saliniferous composite backfill materials can be used to achieve a backfill up to 100 % as well as an instant hydraulic sealing of drifts and caverns. These materials consist out of a grain mixture that is imbedded in a matrix formed by a binding agent that fills out every pore within the grain mixture. The disadvantage of these materials is the high content of a binding agent that is needed to form the supporting matrix. Due to the high amount of binding agent the material needs abutments and casings during the emplacement process. These technical arrangements limit the amount of backfill material that can be put underground in a certain time period. Moreover a high amount of water is associated with these backfill materials. Water can act as a medium for the transport of radionuclides. This is why it should be limited in a repository in saliniferous rock formation.

Obviously there is an application gap between a standard crushed rock salt backfill and the saliniferous composite backfill materials. This gap shall be closed with a newly developed backfill material, the 'Microstructural stabilized crushed rock salt backfill material'.

Development of a microstructure stabilized crushed rock salt backfill material

The microstructure stabilized crushed rock salt backfill material is developed for the backfilling of infrastructural openings in a HAW-repository in saliniferous rock

formations. Infrastructural openings like galleries, drifts and chambers will make up the majority of the mined volume in a HLW-repository.

The main purposes that will be achieved with the new backfill material are a fast stabilization of the geological barrier, a fast reduction of the permeability as well as a technological method that allows an emplacement without abutments or casings. The most important properties of the microstructure stabilized crushed rock salt backfill material are:

- Adequate strength to support the surrounding rock
- 100 % refill success of openings
- No settlement after putting the backfill into place due to self-compaction
- Low permeability (10^{-12} m²) immediately after the material was put into place
- Low content of liquids solvent in the backfill material (< 5 mass-% in total)

The stabilization takes place within the microstructure of the crushed rock salt. The main effect is caused by increasing the necessary force to set the gains within the grain structure into movement. This is achieved by the formation of long-term stable salt mineralization between the rock salt grains.

A thermodynamic stable salt mineralization within saliniferous rock formation is the mineral polyhalite ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$). The newly formed mineralization connect the rock salt grains with each other. The necessary chemical components for the formation of this new salt mineralization are taken from the newly developed binding agent, which consists out of a solid and a liquid phase.

The solid phase of the binding agent consists out of three different minerals that also naturally occur in rock salt deposits:

- Arcanite, potassium sulfate (K_2SO_4)
- Kieserite, magnesium sulfate ($MgSO_4 \cdot H_2O$)
- Calcium sulfate hemihydrate ($CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$)

The liquid phase of the binding agent is formed by a five molal magnesium chloride solution. This solution dissolves the necessary chemical components for the polyhalite formation. Moreover, this solution almost does not dissolve any halite.

The proportion of the binding agent's solid components to each other was adjusted by the stoichiometric relation in the mineral polyhalite. The amount of the liquid compound was done by rheometric experiments as well as shear strength analysis.

The formation of polyhalite depends on the formation of the interphase syngenite ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$) and kainite ($KMg(CISO_4) \cdot 2,75H_2O$). The strength of the stabilization increases with time. This is based on the increasing amount of stabilized contact points within the crushed rock salt as well as the increasing polyhalit content. For this stabilization method a patent has been granted.

Examination of the backfill properties on a laboratory scale

The previously described microstructure stabilized crushed rock salt backfill material has been tested on the laboratory scale in order to determine the general usability of the microstructure stabilized crushed rock salt backfill material as a backfill material for HAW-repositories. The following material properties have been determined:

Formation of new salt mineralization: The grain structure of the crushed rock salt as the main matrix of the backfill is stabilized due to the newly formed salt mineralization. In order to guarantee a long-term stable material behavior it is necessary to achieve thermodynamic stable salt mineralization. To achieve this, the formation of polyhalite is a prerequisite. Other kind of mineralization could be thermodynamically unstable and have to be avoided. The specific mineral composition has been analyzed by X-ray diffraction. Therefor samples have been analyzed after defined time periods in order to determine the mineralization effects over time. The examinations of new formed mineralization were carried out at the Institute for Inorganic Chemistry of the TU Bergakademie Freiberg.

Porosity-permeability-relation: To assess the development of the sealing effect it is important to determine the relation between the porosity and the permeability during the compaction of the backfill material. In general the compaction of backfill material goes along with a reduction of the permeability. The reduction of the permeability depends on the change of porosity. This function is a material specific property that can be determined. Hence the backfill material carries out the function of the geological barrier by sealing the waste material from the contact with fluids, it is aimed to achieve a high reduction of the permeability by the compaction of the backfill material. The porosity has been measured by a porosimeter using compressed air and the permeability is measured by the perfusion with gaseous nitrogen. The determination of the porosity-permeability relation was carried out at the "Institute of Geomechanics GmbH Leipzig".

Shear strength: In order to define the strength of the backfill material the assessment of the shear strength was used instead of the uniaxial compressive strength. This is

based on the fact that the influence of the binding agent is tested in the shear strength rather than the uniaxial compressive strength of the crushed rock salt grain structure. The cohesiveness is a tool in order to describe the shear strength of the backfill material. The shear strength is measured by a box shear apparatus under vary axial stress. In this project the shear strength has been tested at the “Institute of Geomechanics GmbH Leipzig”.

Hydraulic stability: The microstructure stabilized crushed rock salt backfill material contains a defined amount of a solution which is necessary for the recrystallization effects. After the backfill material was put into place the solution is required not to move due to the force of gravity. A movement of the solution could form anisotropic material properties since it is necessary for the recrystallization process. To analyze the hydraulic stability, in this case the backfill material was placed into a four meter vertical pipe with a diameter of 300 mm. It was possible to create a close to reality environment by sealing the backfill material from surrounding influences. At the bottom a plug valve with was installed so that movable fluids are able to flow into a closed container. The weight of the container was constantly measured. After one month sample materials were taken out of the backfill in different heights to analyze the water content. The measurement of the hydraulic stability was done at the Institute of Mining and Special Civil Engineering of the TU Bergakademie Freiberg.

The backfill mineral´s composition was analyzed over time with the X-ray diffraction and a change of mineralization was detected. After 10 days a syngenite and kainite formation could be seen, while a polyhalite formation was not detected. It can be seen that the intensity of the chemical precursors is reduced over time while new mineral phases are formed. Syngenite and kainite are formed ahead of polyhalite. After 31 days the polyhalite formation was proven. The time difference between the syngenite - kainite formation and the polyhalite formation can be seen in the differences of the specific intensities of the minerals.

X-ray diffraction after 2 years and 5 month show that within the further re-crystallization process, the components of the binding agent and most of the first developed syngenite and kainite recrystallized to the polyhalite. The mineral components of the backfill consist out of the minerals from the crushed rock salt (halite and anhydrite) as well as the new mineralization that is mainly formed by polyhalite while low amounts of syngenite and kainite are remaining. Other mineralizations formed by the binding agent were not detected.

In general the mineralization of syngenite and kainite can be described as the first mineralization phase of the microstructure stabilized crushed rock salt backfill material. This first mineralization phase causes the first increase of strength that leads to a self-supporting material property, this avoiding any self-compaction. The formation of polyhalite with the simultaneously reduction of syngenite and kainite follows as the second mineralization phase. During the second stage a further increase of the material strength can be noticed. Due to the early build-up and further increase of strength, the support of the surrounding rock formation is possible.

A scanning electron microscopy of the final mineralization phase that is formed between the halite grain structures proves the expected grain stabilization. The polyhalite has formed on the surface areas of the halite and stabilizes the contact points of halite grains.

The hydraulic properties of crushed rock salt backfill material are mainly influenced by the grain structure. For the laboratory investigations a designed and optimized grain structure was selected for the tests that consist out of material taken from a German underground rock salt mine. The aim of this optimized crushed rock salt grain structure was to create a defined material with constant and optimized properties, and that is available as a mass product.

The decision to develop a defined and optimized grain structure was done due to following reasons:

- comparability of the test results by the use of the same grain size distribution
- availability of the grain sized distribution
- optimization of the mechanically and hydraulically properties

The porosity-permeability-relation of the newly developed backfill material has been assessed and tested directly after the backfill material was created and at a later stage. Moreover different grain structures were used to prove that the porosity-permeability-relation depends on the type and grain distribution of the used crushed rock salt. The newly developed backfill material has a comparable porosity-permeability relation like standard crushed rock salt backfill immediately after the material was put into place. The porosity is about 30 %. The results show that the newly developed backfill material has an optimized sealing behavior. The improved sealing behavior with advancing compaction is higher compared to standard crushed rock salt backfill materials. The permeability of the newly developed backfill material depends on the grain distribution but the increased reduction of the permeability with

a compaction of the backfill material show both materials. One explanation for this behavior could be the formation of new mineralization on the halite surfaces that connect the halite grains with each other. This formation of new minerals can close possible fluid entries to pores and improve the sealing behavior of the backfill material.

The analysis of the shear strength show that there are three main factors determining the shear strength:

- Density of the backfill material
- Specific surface of the used rock salt grain structure
- Age of the backfill material

The new salt mineralization stabilizes the grain structure by connecting the halite grains at the contact points. With increasing density of the backfill material the porosity reduces and the amount of contact points between halite grains increases. An increasing amount of stabilized contact points increases the shear strength of the backfill material as well.

The one year old sample material was created without additional fine grain sizes. The shear strength does increase with an additional amount of fine grain sizes by increasing the specific grain surface. After six weeks the sample material with additional fine grain sizes has doubled the shear strength compared to backfill material without additional fine grain sizes. This can be explained by the increasing amount of contact points within the grain structure. It is expected that the backfill material with additional fine grain sizes develops at least the shear strength of the material without fine grain sizes after one year. A higher value of the shear strength for this material is possible.

After a time period less than 6 weeks the backfill material already bears its own weight without self-compaction. With increasing age of the backfill material the strength increases. For the support of the surrounding host rock a higher specific surface of the grain structure should be realized although it has been shown that each grain size distribution can be stabilized.

Outlook

The presented microstructure stabilized crushed rock salt backfill material has been tested and characterized on a laboratory scale. Therefor it is planned to analyze the newly developed backfill material in a following in-situ phase. Within the in-situ phase

the influence of different backfill technologies will be analyzed as well as an optimized backfill technology for the microstructure stabilized crushed rock salt backfill will be developed. The goal is to find an optimized backfill technology for the microstructure stabilized crushed rock salt backfill material which achieves the backfill properties that were determined on a laboratory scale.

It is planned that the in-situ phase will be done in the rock salt mine in Sondershausen (Germany). Four backfill experiments will be carried out with different technologies and the created backfill material will be tested in-situ. Moreover samples will be taken and analyzed in laboratories. The results will be compared with the results of the laboratory phase.

Conclusion

The isolation of highly active waste in underground saliniferous rock formation is a preferred method internationally. This is based on the suitable properties of the saliniferous host rock for the installation of HAW-repositories. After the waste material is put into place the mined excavations in the underground rock formation have to be sealed again to stabilize the surrounding rock formation.

With the microstructure stabilized crushed rock salt backfill material it is possible to backfill mined infrastructural excavations in HAW-repositories in saliniferous rock formation to 100 % without the formation of roof clefs. Moreover the newly developed backfill material proves to be long-term stable in saliniferous rock formations due to the formation of thermodynamic stable mineralization like polyhalite.

This formation of long-term stable salt mineralization also causes an increase of the strength. The first mineralization phase (syngenite and kainite) increase the strength of the backfill material. Settlements and the formation of roof clefs can be avoided. The second mineralization phase (polyhalite) increases the strength further. The backfill material enables an early stabilization of the surrounding rock. This was proven by examination of the shear strength development over time.

The microstructure stabilized crushed rock salt backfill material shows a typical porosity and permeability as classic crushed rock salt backfill directly after it is put into place. Due to the compaction of the backfill material, the sealing effect is reached earlier than with other granular backfill material. This allows an early sealing capability against potential fluid inflows.

The formation of new mineralization within the backfill material is a process that takes place over time. To guarantee an even stabilization of the backfill material it is important that the solvent within the backfill material does not flow by the force of gravity until the first mineralization phase is formed. It has been shown that the solvent within the backfill material does not flow by the force of gravity and the first mineralization phase forms equally within the backfill material.

3 Versatz für untertägige Auffahrungen in HAW-Endlagern im Salinar

3.1 Zielstellung von Verfüllmaßnahmen

3.1.1 Stabilisierung des einschlusswirksamen Gebirgsverbandes

Die Endlagerung von HAW-Abfällen in tiefen geologischen Gesteinsformationen verfolgt das Ziel, die eingelagerten Abfälle vom Kontakt mit der Biosphäre abzuschirmen. Dieses Ziel wird erreicht, wenn potentielle Transportmedien wie z. B. Fluide vom Kontakt mit den eingelagerten Abfällen gehindert werden. Aus diesem Grund sind die Stabilität sowie die hydraulische Dichtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsverbandes (ewG) von hoher Bedeutung.

Der ewG umfasst das Wirtsgestein sowie die umliegenden Gesteinsschichten, die zu einer hydraulischen Dichtigkeit bzw. mechanischen Stabilität der geologischen Barriere hinzutragen. Hierzu können wasserundurchlässige Gesteinsschichten wie z. B. Steinsalz oder Tongesteine sowie stabilisierende Kristallingesteine gehören. Eine Zerstörung der umgebenden einschlusswirksamen Gesteinsformationen könnte zu einer negativen Beeinflussung der endlagerrelevanten Materialeigenschaften führen. Aus diesem Grund ist der Schutz des gesamten einschlusswirksamen Gebirgsverbandes von Bedeutung.

Durch die bergmännische Auffahrung von Hohlräumen in untertägigen Steinsalzformationen wird eine Änderung des lithostatisch isotropen Spannungszustandes im Steinsalz erzeugt. Diese Änderung des Spannungszustandes führt im Steinsalz zu Kriechbewegungen in die Hohlraumquerschnitte hinein. Durch die entstehenden Deformationen des Wirtsgesteinskörpers können Bewegungen angrenzender Gesteinsschichten induziert werden. Diese Deformationen können bei der Überschreitung von Gesteinsfestigkeiten zu einer Rissbildung führen. Diese Risse im Gestein können als Fluidwegsamkeiten dienen.

Um eine unzulässig hohe Bewegung des ewG zu unterbinden, müssen die im Steinsalz verursachten Kriechbewegungen minimiert werden. Aus diesem Grund werden Versatzmaterialien in die abzuwerfenden Grubenbaue gefüllt. Dies verringert den möglichen Deformationsweg sowie die Deformationsrate des Steinsalzes. Bewegungen von umliegenden Gesteinsschichten werden unterbunden und eine potentielle Rissbildungen vermieden. Der Erfolg der Verfüllmaßnahmen hängt vom Verfüllungsgrad, der Einbaudichte, der Porosität sowie dem Kompaktions- und Kriechverhalten des Versatzmaterials ab. Durch einen hohen Verfüllungsgrad sowie einer hohen Einbaudichte werden geringe Deformationen des umgebenden salinaren Gebirges zugelassen. Die Porosität und das Kompaktions- und Kriechverhalten beeinflussen die über lange Zeiträume stattfindende Gesamtdeformation des Versatzmaterials.

3.1.2 Verzögerung von Lösungszutritten zu den Abfallbehältern unmittelbar nach Einlagerungsende

Die im untertägigen Salinar aufgefahrenen Hohlräume stellen potentielle Fluidwegsamkeiten dar. Bei Zutritt einer Störlösung in ein Endlager, muss der Lösungszutritt zu den Abfällen auf ein höchst mögliches Maß hinausgezögert werden. Freie Hohlraumquerschnitte bieten dem Fluid dabei höhere Fließgeschwindigkeiten als versetzte Hohlraumquerschnitte.

Nach dem Ende der Einlagerung von Abfallbehältern werden die Einlagerungsbereiche sowie die entsprechenden Infrastrukturbereiche mit Versatzmaterialien verfüllt. Die durch den eingebrachten Versatz erzeugte Verringerung des Hohlraumvolumens stellt einen unmittelbaren Schutz der Abfallbehälter vor Störlösungen dar. Dabei wirkt der eingebrachte Versatz aufgrund der hohen Porosität und Permeabilität unmittelbar nach dem Einbringen nicht abdichtend jedoch hinauszögernd.

Die durch die äußere Belastung stattfindende Kompaktion des Salzgrusversatzes führt zu einer Absenkung der Porosität und Permeabilität im Versatzmaterial. Diese Kompaktion findet bis zum Gleichgewicht zwischen äußerer Belastung und Versatzwiderstand statt. Zu diesen Zeitpunkt ist davon auszugehen, dass der Salzgrusversatz durch die Kompaktions- und Kriechvorgänge die Permeabilität des umgebenden salinaren Gebirges von $< 10^{-21} \text{ m}^2$ angenommen hat und eine Dichtwirkung aufweist. Bis zum Erreichen der hydraulischen Dichtheit des Versatzmaterials gewährleisten die Verschlussbauwerke eine hydraulische Dichtheit.

3.1.3 Schutz des Grubengebäudes vor dem eingelagerten Abfall

Die in ein potientes Endlager eingebrachten Abfallmengen werden in abgegrenzten Kammern, Strecken oder Bohrlöchern eingelagert. Nach dem Ende der Einlagerung von Abfällen in die entsprechenden Einlagerungsbereiche, werden diese vollständig verfüllt. Neben den bereits genannten Aspekten der mechanischen und hydraulischen Stabilisierung, geschieht dies auch, um eine wettertechnische Isolation der Abfälle von der übrigen Grube zu erreichen. Dieses wird vor allem hinsichtlich der Arbeitssicherheit der in der Grube arbeitenden Personen notwendig.

Da unmittelbar nach dem Einbringen noch von einer hohen Porosität in den eingebrachten Versatzmaterialien und somit von Lufteinschlüssen auszugehen ist, muss eine ausreichende Verfüllmenge eingebracht werden. Eine Zirkulation der in dem Versatz eingeschlossenen Gasphase mit Kontakt zu den Abfällen sowie ein anschließender Austausch mit den Grubenwettern muss unterbunden werden.

3.2 Stand der Technik beim Versetzen von untertägigen Auffahrungen in HAW-Endlagern im Salinar

3.2.1 Versatzmaterialien für HAW-Endlager

3.2.1.1 Naturtrockener Salzgrus

Um die Langzeitbeständigkeit der eingebrachten Versatzmaterialien und die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu gewährleisten, ist die Verwendung von arteigenen bzw. lagerstättentypischen Materialien zu empfehlen [Bun10]. Durch diese Forderung wird eine Reaktion der Versatzmaterialien mit dem umgebenden Gebirge bzw. der Verlust der Barrierfunktion der geologischen Barriere unterbunden.

Salzgrus ist ein aus der bergmännischen Steinsalzgewinnung stammendes Baumaterial, das mit einem Kornspektrum von $> 0,1 \text{ mm} - < 63 \text{ mm}$ eingebracht wird. Nach der untertägigen Gewinnung durch Bohren und Sprengen bzw. maschinell, wird das Material in Brech- und Siebanlagen konditioniert. Verwendet wird Salzgrus als Streu- oder Futtermittelsalz bzw. in verschiedenen Produkten in der chemischen Industrie. Darüber hinaus wird Salzgrus in Salzbergwerken national und international als Versatzmaterial eingebracht. Aufgrund der natürlichen Herkunft aus Steinsalzlagerstätten, wird Salzgrus als arteigenes Material definiert. Steinsalzgrus steht in ausreichenden Mengen zur Verfügung und ist im Vergleich zu anderen in Frage kommenden Versatzmaterialien günstig.

Naturtrockener Salzgrusversatz mit einem Feuchtegehalt von ca. 0,1 Massen-% [Mül99] wird durch mechanische (Schrapper-, Schleuder- und Laderversatz) oder pneumatische (Blasversatz) Versatztechnologien unter Tage eingebaut. Nach dem Einbau unter Tage weist der Versatzkörper eine Porosität von bis zu 35 % [Krö09] auf. Darüber hinaus ist aufgrund von Setzungen, die aus Kornumorientierungen, Korndeformationen und Kornbrüchen resultieren, ein 100 %iger Verfüllungsgrad mit Salzgrusversatz nicht zu erreichen.

Die mit den Versatztechnologien erreichbaren Einbaudichten und Anfangsporositäten sind unmittelbar von dem Kornspektrum des Salzgruskorngemisches abhängig. Um bereits nach dem Einbau eine geringe hydraulische Leitfähigkeit zu erreichen, wird ein weitgestuftes Kornband bevorzugt, das über eine hohe Verdichtbarkeit verfügt.

Salzgrusversatz weist im Vergleich zu gewachsenem Steinsalz eine hohe Permeabilität, eine geringere Wärmeleitfähigkeit, eine geringere Dichte sowie eine geringere Festigkeit auf. Dies ist auf den erhöhten Porenraum im Salzgrus

zurückzuführen. Bei einer äußeren Belastung beginnt Salzgrus zu kompaktieren. Bei der Kompaktion verdichtet sich der Salzgrus durch Kornumorientierung, Deformation und Bruch der Salzgruskörnungen. Es findet eine Reduzierung des Porenraumes statt. Durch die Kompaktion nehmen die Permeabilität ab und die Versatzdichte sowie der Versatzwiderstand zu. Die Materialeigenschaften von Salzgrusversatz nähern sich durch eine ausreichende äußere Belastung dem von gewachsenem Steinsalz an.

3.2.1.2 Angefeuchteter Salzgrusversatz

Angefeuchteter Salzgrusversatz besteht aus Steinsalzgrus sowie einer hinzugegebenen Salzlösung von 0,6 Massen-% bis 1,6 Massen-%. Als Salzlösung ist eine gesättigte $MgCl_2$ -Lösung vorgesehen. Aufgrund der $MgCl_2$ -Sättigung der Lösung sind keine Lösungserscheinungen an den Halitkörnern möglich, da die Löslichkeit von Natriumchlorid in einer gesättigten Magnesiumchloridlösung sehr gering ist. Im Falle eines Kontaktes des Salzgrusversatzes mit zementgebundenem Salzbeton muss die $MgCl_2$ -Lösung durch eine gesättigte $NaCl$ -Lösung substituiert werden, um eine Reaktion der Salzlösung mit dem Salzbeton zu unterbinden. Diese Reaktion führt zu einer Schädigung und in der Konsequenz zum Verlust der Dichtheit des Salzbetons [Wie12] [Mül12] [Pri06]

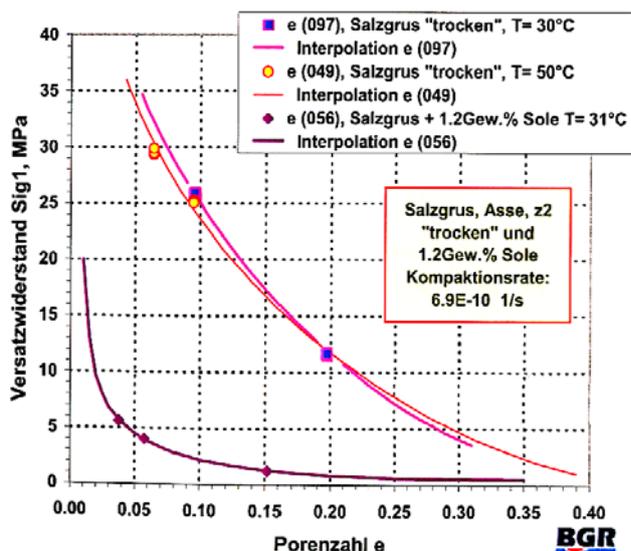


Abbildung 1: Versatzwiderstand von Salzgrus trocken und angefeuchtet (übernommen aus [Krö09])

Die Zugabe einer Lösung zur Steinsalzkörnung dient der Verbesserung der Verdichtbarkeit des Korngemisches. Durch die Anwesenheit einer Lösung wird der Versatzwiderstand deutlich herabgesetzt. Durch die Verringerung des Versatzwiderstandes wird die Endporosität von $< 10^{-21} m^2$ schneller als im Vergleich zu naturtrockenem Salzgrusversatz erreicht [Krö09]. Das Ziel ist das Erreichen einer zeitlich früheren

hydraulischen Dichtheit des Versatzmaterials. In [Krö09] wurde durch die Zugabe einer Lösung zu einem trockenen Salzgrusgemisch der schlagartige Abfall des

Versatzwiderstandes ermittelt und die Beschleunigung der Kompaktion durch die Lösungszugabe zu Salzgrusversatz bestätigt. Die Lösungszugabe setzt den Versatzwiderstand des Korngemisches von Beginn an herab [Krö09]

Aufgrund des herabgesetzten Versatzwiderstands, ist bei angefeuchtetem Salzgrusversatz von einer späten Gebirgsstabilisation auszugehen. Das Versatzmaterial kompaktiert unmittelbar nach dem Einbringen unter Tage aufgrund des Eigengewichtes sowie im weiteren Verlauf durch die äußere Belastung. Der Aufbau des Versatzwiderstands zur Stabilisation des Gebirgskörpers findet erst beim Erreichen von geringen Porositäten und somit nach einer hohen Deformation des Versatzkörpers statt. [Krö09]

3.2.1.3 Salzbriketts

Im Rahmen der Untersuchungen zum Versatz und Verschluss von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz wurden Salzbriketts als Verfüllmaterial betrachtet. Salzbriketts werden durch das Zusammenpressen von Salzgrus bei Drücken von ca. 137,5 MPa hergestellt und ähneln in ihren mechanischen Materialeigenschaften dem salinaren Gebirge. Zur Optimierung des Kompaktionsverhaltens wird dem verwendeten Salzgrus eine Salzlösung hinzugegeben. [Fah95] [Glä91]

Bei dem Verfüllen von Strecken und Kammern mit Salzbriketts werden diese strukturiert eingebaut. Dieser strukturierte Einbau verringert die Versatzleistung. Ein Einbau des Versatzmaterials mittels herkömmlicher Versatztechnologien ist nicht möglich, da sich ein schüttgutartiges Materialverhalten einstellt.

3.2.1.4 Salzgrusversatz mit festen Zuschlagsstoffen

Zur Verringerung der Einbau- und Endpermeabilität des Versatzmaterials sowie zur Verbesserung des Sorptionsverhaltens für Radionuklide, kann dem Salzgrusversatzmaterial Ton hinzugegeben werden. Der zugegebene Tonanteil ergänzt die Feinkornfraktion des Salzgrusgemisches, sodass eine Ausfüllung des Porenraumes erfolgen kann. Aufgrund der sehr geringen Permeabilität von Tonen sowie der Verkleinerung des hydraulischen Porenraums wird eine frühe Dichtwirkung des Versatzmaterials generiert. In Abbildung 6 (S. 16) [Stü11] ist beispielsweise die

Abnahme der Permeabilität durch die Zugabe von Bentonit zu einem Salzgruskornmischung dargestellt.

Durch die Zugabe von Tonen wird die Verdichtbarkeit des Versatzmaterials aufgrund des plastischen Materialverhaltens von Ton verbessert. Die Tonminerale werden durch die Verdichtungsenergie in die Zwischenräume des Salzgruskorngerüsts gepresst. Abbildung 7 [Stü11] zeigt, dass durch die Zugabe von Bentonit zu Salzgrus eine Abnahme des Versatzwiderstands erfolgt.

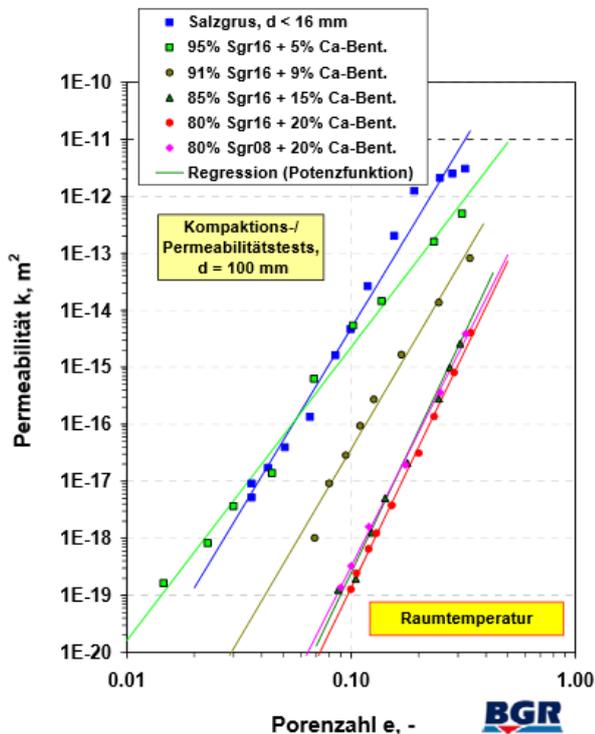


Abbildung 2: Permeabilitäts-Porositätsbeziehung von unterschiedlichen Salzgrus-Bentonitmischungen im Vergleich zu reinem Salzgrus (übernommen aus [Stü11])

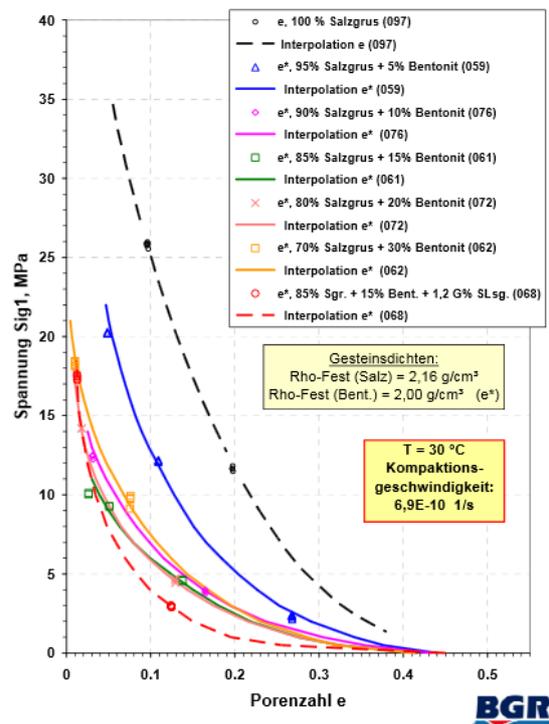


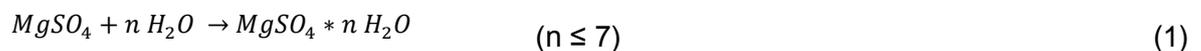
Abbildung 3: Versatzwiderstände von Steinsalz und unterschiedlichen Steinsalz-Bentonitmischungen im Vergleich zueinander (übernommen aus [Stü11])

Im Einbaustand verhält sich das Versatzmaterial weiterhin wie ein trockener Salzgrusversatz. Dementsprechend können dieselben Einbauverfahren für die Salzgrus-Tongemische genutzt werden, die bei einem trockenen Salzgrusversatz angewendet werden. Die einbautechnischen Nachteile eines trockenen Salzgrusversatzes betreffend den Verfüllungsgrad gelten auch für Salzgrus-Tongemische. Findet nach dem Einbau unter Tage keine künstliche Verdichtung des Versatzmaterials statt, ist die Einbaudichte und Anfangsporosität des Versatzmaterials mit dem von trockenem Salzgrusversatz vergleichbar.

Um die Dichtwirkung eines Salzgrus-Versatzmaterials zu erhöhen, wurde von der „Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit“ (GRS) der selbstverheilende

Salzversatz (SVV) entwickelt. Dieses Versatzmaterial basiert auf einer Salzgruskörnung sowie trockenen Magnesiumsulfatkomponenten. Beim Eintritt eines Störfalls, dem Zutritt von salinaren Lösungen oder Frischwasser, reagiert das Magnesiumsulfat mit dem Fluid und dichtet den versetzten Querschnitt unter einer Volumenzunahme ab. Das Verfahren wurde beim europäischen Patentamt (Nr. 00120249.8) angemeldet. [Her05]

Die Reaktion basiert auf einer Hydratation des Magnesiumsulfats. Dabei findet eine Hydratation des Magnesiumsulfats zu unterschiedlichen $MgSO_4$ -Hydraten statt. Langfristig ist die Bildung von $MgSO_4$ -Monohydrat (Kieserit) unter Verbrauch des hinzutretenden Wassers in der salinaren Lösung das Ziel. Die entsprechende Reaktionsgleichung lautet [Her11]:



Anwendungsfelder für dieses Versatzmaterial sind die Verfüllung von Kammern, Strecken, Bohrlöchern, Rolllöchern und Blindschächten sowie die Isolierung und Abdämmung von Abfällen und die Verwendung in Verschlussbauwerken. Das Versatzmaterial verhält sich bis zum Moment eines Flüssigkeitszutritts wie ein herkömmlicher trockener Salzgrusversatz mit den entsprechenden Materialeigenschaften eines Schüttguts und kann dementsprechend mittels herkömmlicher Versatztechnologien, zum Beispiel durch pneumatische Verfahren, eingebracht werden. Um im Zuge einer Volumenvergrößerung durch die angestrebte Mineralphasenneubildung eine Dichtwirkung umzusetzen, muss das Versatzmaterial mittels Wiederlagern eingebaut werden. Durch die Wiederlager wird der Aufbau eines Versatzdrucks ermöglicht, da eine Ausdehnung des Versatzvolumens beschränkt wird. [Her05] [Her07] [Her11]

Nach [Her11] wurde der aktuelle Stand bzgl. des SVV festgehalten. Der ausgehärtete SVV verfügt über eine Endporosität von $< 2\%$ mit einer Endpermeabilität innerhalb des SVV von $10^{-19} - 10^{-20} \text{ m}^2$. Während des Aushärtens werden Kristallisationsdrücke von wenigen bis zu 100 bar erreicht. Die Aushärtung des Materials geht mit der Bildung einer Vielzahl von Mineralphasen einher. Die Festigkeit des entstehenden Versatzkörpers reicht von der Dilatanzgrenze bis zur Spitzenfestigkeit von Steinsalz. [Her07] [Her11]

3.2.1.5 Salinare Baustoffe

Ein dem Pumpversatz ähnliches Material wurde von der DBE Technology unter dem Namen AISKRISTALL entwickelt. Dieses Material basiert wie der oben beschriebene SVV auf der Bildung von $MgSO_4$ -Hydraten. Bei diesem Versatzmaterial wird die für die Hydratation benötigte Flüssigkeit bereits beim Einbau mit eingebracht. Die Festigkeitszunahme des Versatzmaterials findet direkt nach dem Einbau unter Tage statt. Dieses Material kann als stützender Versatz für Widerlager oder für Barrieren verwendet werden. Beim Einbau werden aufgrund des pastösen Materialverhaltens Schalungen und/oder Widerlager benötigt. [Eng06]

An der TU Clausthal wurde ein auf Steinsalz-Calciumsulfat-basierendes Versatzmaterial entwickelt, das durch pneumatische Verfahren untertägig eingebaut werden kann. Das Versatzmaterial besteht aus einer Salzgruskörnung, die mit einem Anhydritgemisch vermischt wird. Ein reaktives α -Halbhydrat, das als Bindemittelphase dient und zur Verfestigung des Materials führt, bewirkt eine Erhärtung des Materials. Der zur Reaktion notwendige Flüssigkeitsanteil wird dem Versatzmaterial beim Einbringen unter Tage hinzugegeben. Im Jahr 2006 wurde ein Großversuch in situ mit dem Versatzbaustoff im Bergwerk Asse durchgeführt. Die Ergebnisse des Großversuches zeigten, dass eine generelle Eignung des Versatzbaustoffes vorliegt und eine Dichtwirkung sowie eine Aushärtung des Versatzmaterials stattfindet. Allerdings wurde eine geringe Volumenzunahme von ca. 0,2 % ermittelt. [Mis99] [Lan06]

3.2.1.6 Mineralische Gesteinskörnungen

Um einen sofortwirkenden stützenden Versatzkörper zu generieren, können mineralische Gesteinskörnungen in Form von Kiessanden oder Basaltschotter als Versatzmaterial verwendet werden. Diese Versatzmaterialien haben den Vorteil, dass nach dem Einbringen eine sofortige Stützwirkung des umgebenden Gebirges aufgrund der setzungsstabilen Versatzsäule erreicht wird. Dieses verhindert eine Verformung des umgebenden Gebirges sowie ein Auspressen von Lösungen im Störfall. Darüber hinaus kann der Porenraum als Aufnahmefolumen für Gase dienen und durch eine Druckentlastung eine Migration von Gasen verzögern [Mül12].

Der Nachteil an diesen Materialien ist, dass diese Versatzkörper dauerhaft für Fluide durchlässig sind. Eine Verschlusswirkung durch Abnahme des

Durchlässigkeitsbeiwertes ist auch über lange Zeiträume durch diese Versatzmaterialien nicht zu erwarten [Rüb10].

Darüber hinaus kann es beim Umschließen der mineralischen Versatzkörper durch das salinare Gebirge zu Spannungsspitzen an der äußeren Kontur geben, da die mineralischen Gesteinskörnungen über keine Kriecheigenschaften verfügen und somit der langfristigen Deformation des Salinars entgegenwirken.

Die Langzeitstabilität der verwendeten Materialien ist durch die Verwendung von geeigneten mineralischen Gesteinen zu gewährleisten. Es ist darauf zu achten, dass keine Reaktionen mit dem salinaren Gebirgskörper sowie den darin auftretenden Mineralisationen bzw. den im Störfall zutretenden Lösungen ablaufen.

3.2.2 Verfüllmaßnahmen in einem Endlager

3.2.2.1 Verfüllmaßnahmen von Schächten

Der Tageszugang zum ewG findet in den bekannten Endlagerungsplanungen im Salinar über Schächte statt. Ein Schacht ist eine vertikale bergmännische Auffahrung von der Tagesoberfläche in das Endlager. Der Schacht durchteuft zwangsläufig die über dem ewG befindlichen geologischen Schichten. Um langfristig einen Zufluss von Fluiden aus den darüber liegenden Schichten zu verhindern, ist ein hydraulisch undurchlässiger Schachtverschluss erforderlich. Dieser Schachtverschluss wird durch eine darunterliegende Füllsäule stabilisiert.

Für das Verfüllen von Tageszugängen ist aufgrund der geringen Setzungen der Verfüllsäule eine Schottersäule aus gebrochenen mineralischen Materialien wie Basalt oder Diabas geplant. Darüber hinaus dient dieses Material als Speicherelement aufgrund des bleibenden Porenraums. Der Bau der Widerlager ist aus Betonen geplant. Die Nutzung von Salzgrus wird zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit im Rahmen von arteigenen Langzeitdichtungen in Schachtverschlüssen untersucht. Dabei wird dem Salzgrus eine Salzlösung, voraussichtlich $MgCl_2$ -reiche Lösung, im Massenbereich von ca. 1,5 Masse-% hinzugegeben. Zielstellung der Flüssigkeitszugabe ist eine Verbesserung des Kompaktionsverhaltens, um den Salzgrus als Dichtelement auf geringe Porositäten während des Einbaus zu verdichten. [Kud15] [Mül12]

Den aktuell erprobten Stand der Technik beim langzeitdichten und flüssigkeitsdichten Verschluss von Schächten in Untertagedeponien im Salinar stellt das

Schachtverschlusskonzept „Salzdetfurth“ dar. Bei diesem Verschlusskonzept werden Bentonit-Dichtelemente mit Widerlagern aus Hartgesteinsschotter genutzt. [Kud15]

Ein neues Schachtverschlusskonzept für HAW-Endlager im Salinar oder Tongestein wurde im Forschungsvorhaben „Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle“ ELSA - Phase 1 entwickelt. Im Anschlussvorhaben ELSA - Phase 2 wird ein für die Endlagerung im Wirtsgestein Salz vorverdichtetes Salzgrus-Ton-Gemisch als Widerlager und Füllsäule mit einer geringen Permeabilität und Setzungsstabilität entwickelt. Erste Ergebnisse zeigen, dass bei der Vorverdichtung Porositäten von $n = 7,7\%$ erreicht werden können. Die erreichbare Restporosität des Salzgrus-Ton-Gemisches ist vom Tonanteil abhängig. Für das Wirtsgestein Ton wird ein Verschlusskonzept basierend auf Schotter-Bitumen-Elementen und Betonwiderlagern mit integrierter Bitumenschicht entwickelt. [Kud13] [Kud15]

3.2.2.2 Verfüllmaßnahmen in Einlagerungsbereichen

Nach dem aktuellen Stand der Forschung werden die Verfüllmaßnahmen von Einlagerungsbereichen (Kammer-, Strecken- und Bohrlochlagerung) im Salinar mittels herkömmlichem naturtrockenen Salzgrus durchgeführt. Bei der Verfüllung der Einlagerungsbereiche ist von Bedeutung, dass auf einen Eintrag von Fluiden verzichtet wird um Reaktionen mit den Abfällen bzw. der technischen Barriere (Abfallbinde) auszuschließen. Flüssigkeiten in den Einlagerungskammern könnten beispielsweise zur Korrosion der Abfallbehälter und somit zur frühzeitigen Freisetzung von Radionukliden in den Einlagerungsbereichen führen. Des Weiteren kann eine flüssige Phase als Transportmedium für freigesetzte Radionuklide dienen. [Bol12]

Bei der Kammer- und Streckenlagerung ist geplant, Salzgrus der Korngrößen $d < 31,5$ mm zu verwenden. Die Verfüllung in der Bohrlochlagerung soll mit trockenem Salzgrusversatz durchgeführt werden. Das Versatzmaterial wird dabei in den Ringraum zwischen Behälter und Gebirge eingebracht. Für diesen Zweck ist die Nutzung eines Salzgruskorngemisches aus dem Forschungsvorhaben DEBORA (DEBORA = engl.: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste) vorgesehen, welches über ein Größtkorn der Korngröße $< 8,0$ mm verfügt. [Krö09] [Rot99]

Die Verwendung von Salzgrus als Versatzmaterial in den Einlagerungsbereichen ist, neben der Stabilisierung des ewG, auf die hohe Wärmeleitfähigkeit des Steinsalzes

zurückzuführen (Kapitel 2.1). Die bei dem Zerfall des radioaktiven Materials entstehende Wärme wird über die technische Barriere zunächst an die geotechnische Barriere und schließlich an die geologische Barriere weitergegeben. Die hohe Wärmeleitfähigkeit von Steinsalz erlaubt eine hohe Wärmeableitung in das umgebende Steinsalzgebirge. Dabei begünstigt der zusätzliche Wärmeeintrag die Deformation von Steinsalz und dementsprechend vom Salzgrusversatz. Ein beschleunigter vollständiger Einschluss der Abfälle wird begünstigt. Dieses wurde durch Untersuchungen des Temperatureinflusses nachgewiesen. [Bol12] [Krö09]

3.2.2.3 Verfüllmaßnahmen in untertägigen Infrastrukturbereichen

Das Verfüllen der untertägigen Infrastrukturbereiche wird den Großteil der notwendigen Verfüllmaßnahmen in einem zukünftigen Endlager im Salinar umfassen. Aufgrund der Endlagerkonzipierung, bei dem ein Mindestabstand zwischen den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle aufgrund der Temperaturerhöhung des umliegenden Gebirges gefordert ist, werden entsprechende infrastrukturelle Auffahrungen notwendig, die mehrere Kilometer umfassen können. Abbildung 4 [Bol14] stellt die notwendigen infrastrukturellen Auffahrungen in einem theoretisch geplanten Endlager mit Streckenlagerung dar. Momentan ist geplant, trockenen oder leicht angefeuchteten Salzgrusversatz in diese Hohlräume einzubringen. Der Salzgrus wird mit dem Ziel eingebracht, sich durch die einwirkenden Gebirgskonvergenzen zu verdichten und langfristig die Barrierefunktion des umgebenden Gebirges zu erreichen [Wie12].



Abbildung 4: Ausmaß der zu versetzenden infrastrukturellen Auffahrungen in einem theoretischen Endlager [Bol14]

Es ist geplant, dass die infrastrukturellen Hohlräume mittels Salzgrus zu verfüllen, da dieser über lange Zeiträume die Dichtwirkung von gewachsenem Steinsalz annimmt. Um die Kompaktion des Steinsalzversatzes zu beschleunigen soll angefeuchteter Salzgrusversatz verwendet werden.

3.3 Motivation und Beschreibung des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens „Gefügestabilisierten Salzgrusversatz GESAV – Phase 1“

Wie aus Kapitel 3.2 zu entnehmen ist, existiert eine Wissenslücke zwischen den reinen Salzgrusversatzmaterialien und den salinaren Baustoffen. Mit der Entwicklung des „Gefügestabilisierten Salzgrusversatzes“ (GESAV) soll diese Wissenslücke geschlossen werden. Es wird ein Salzgrusversatz entwickelt, der unmittelbar nach dem Einbringen unter Tage das umgebende Gebirge durch eine ausreichende Frühfestigkeit und vollständige Verfüllung der Hohlräume stabilisiert bei gleichzeitigem minimalen Flüssigkeitsgehalt unter Beibehaltung der schüttgutmechanischen Materialeigenschaften.

Dies wird durch die Stabilisierung des Korngerüstes erreicht. Das Korngerüst wird durch die Ausbildung neuer und langzeitstabiler Salzmineralphasen an den Kornkontaktflächen der Steinsalzkörnung verfestigt. Dies bewirkt einen Anstieg der

Kohäsion des Versatzmaterials. Die Verschiebung von Salzgruskörnern relativ zu einander wird gehemmt. Abbildung 2 stellt die angestrebte Gefügestabilisierung dar.

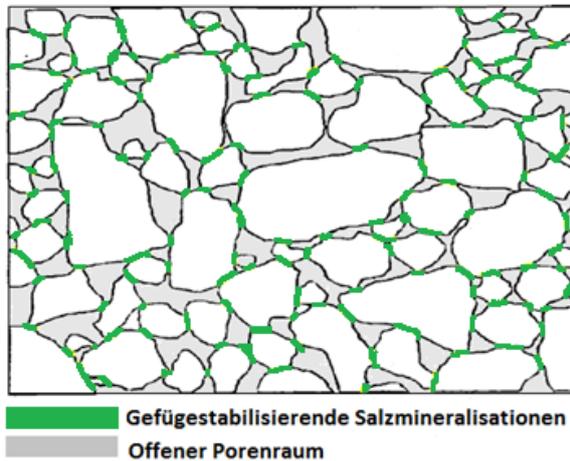


Abbildung 5: Darstellung der Gefügestabilisierung im Forschungsvorhaben GESAV (angelehnt an [Pat00])

Den Hauptbestandteil des „Gefügestabilisierten Salzgrusversatzes“ stellt eine Steinsalzkörnung dar. Diese wird hinsichtlich der Zielstellungen des Gesamtvorhabens optimiert. Im Fokus stehen dabei die Parameter Setzungsstabilität, Einbaudichte und Verfügbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit des Salzgruskorngemisches. Aufgrund der hohen Versatzmengen, die für Verfüllmaßnahmen in einem Endlager notwendig sind, ist ein reproduzierbares Korngemisch als Grundlage zu wählen.

Die entwickelte Salzgruskornmischung muss mit dem im Forschungsvorhaben REPOPERM-Phase 1 genutzten Referenzsalzgrus vergleichbar sein, um eine Ergebnisübertragung zu ermöglichen. Hierfür sind eine einheitliche Salzgruscharakterisierung sowie ein entsprechendes Referenzsalzgrus aus dem genannten Forschungsvorhaben erforderlich. Die Salzgrusentwicklung und die Charakterisierung werden im AP1 durchgeführt.

Durch einen sogenannten „Salzbinder“ wird die Mineralneubildung induziert. Der Salzbinder besteht aus denen für die Bildung vom langzeitstabilen Salzmineral Polyhalit notwendigen chemischen Komponenten sowie einer für die Rekristallisation notwendigen Salzlösung. Die Salzmineralneubildung wird im AP2 untersucht.

Der Lösungsgehalt in dem Salzbinder wird minimiert, um die in das Endlager eingebrachte Flüssigkeitsmenge gering zu halten. Diese Minimierung des Lösungsgehaltes macht eine Untersuchung der Mischbarkeit des Salzgruskorngemisches mit dem Bindemittel notwendig. Die Mischbarkeit wird im AP1 untersucht.

Am Ende vom AP1 und AP2 steht die Entwicklung einer Rezeptur für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz. Diese Rezeptur wird im AP3 und AP4 hinsichtlich Festigkeiten, Porosität, Permeabilität, Kompaktions- und Relaxationsverhalten sowie der hydraulischen Stabilität analysiert und bewertet.

Anschließend an GESAV – Vorhabensetappe 1 soll ein In situ Versuch mit dem entwickelten Versatzmaterial durchgeführt werden. Dieses soll im Rahmen einer Anschlußetappe in einem untertägigen Steinsalzbergwerk durchgeführt werden. Das Gesamtziel der Vorhabensetappe 2 ist die Untersuchung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im In situ Zustand bei der Verwendung unterschiedlicher Einbauverfahren. Die Planung hierfür wird im Rahmen von GESAV – Vorhabensetappe 1 AP4 durchgeführt.

3.4 Anforderungen an die generelle Eignung als Verfüllmaterial für HAW-Endlager im Salinar

3.2.1 Langzeitbeständigkeit im salinaren Milieu

Aufgrund der Verwendung des Versatzmaterials im salinaren Gebirge, ist die Langzeitbeständigkeit im Salinar während des Wirkungszeitraums eine zwingend erforderliche Materialeigenschaft. Unter der Langzeitbeständigkeit wird die Funktionstüchtigkeit des Versatzmaterials über lange geologische Zeiträume verstanden. Diese beruht auf der Beibehaltung der Materialeigenschaften durch Vermeidung von unbeabsichtigten Reaktionen des Versatzmaterials mit dem umgebenden salinaren Gebirge bzw. darin enthaltenen Lösungen über lange geologische Zeiträume. Ungewollte Prozesse innerhalb des Versatzmaterials können in ungünstigen Fällen zur Verringerung der Qualität der geotechnischen Barriere führen und sind zu vermeiden. Dieses wird im Rahmen des Integritätsnachweises für Verschluss- und Versatzbauwerke überprüft. [Rot11]

Die Langzeitbeständigkeit von Materialien im Salinar kann durch natürliche Analoga nachgewiesen werden. Die zur Herstellung des gefügestabilisierten Salzgrusversatz verwendeten Komponenten, die daraus gebildeten Salzminerale und die verwendete wässrige Lösung müssen in natürlichen Steinsalzlagerstätten nachgewiesen werden. Ist ein natürliches Analogon für jede Komponente nachweisbar, kann von einer Langzeitbeständigkeit des Versatzmaterials in tiefen geologischen Steinsalzlagerstätten ausgegangen werden.

Neben dem inerten Reaktionsverhalten gegenüber dem umgebenden salinaren Gebirge sind Lösungserscheinungen des umgebenden Steinsalzgebirges durch die verwendete wässrige Lösung zu unterbinden. Lösungsvorgänge des Salinars könnten zur Generierung von Fluidwegsamkeiten führen. Diese würden eine Schwächung der Dichtwirkung des Salinars darstellen. Durch die Verwendung von

Natriumchlorid oder Magnesiumchlorid gesättigten Lösungen wird dies ausgeschlossen.

3.2.2 Mineralneubildung von gefügestabilisierenden Mineralphasen

Die Umsetzung der Zielstellung wird durch den Aufbau eines stabilen Salzgruskorngefüges durch Salzmineralneubildungen, vorzugsweise des Polyhalits, erreicht. Das Mineral Polyhalit stellt eine Gleichgewichtsphase im hexären System der ozeanischen Salze¹ dar. Aus diesem Grund ist mit Umwandlungsprozessen über lange geologische Zeiträume nicht zu rechnen. Die aneinandergrenzenden Halitkörner werden an den Kornkontaktflächen durch die Neubildungen von Mineralphasen miteinander verbunden. Die Salzmineralneubildung ist ein thermodynamisch gesteuerter Prozess, der über lange Zeiträume ablaufen kann.

Die Bildung von metastabile Phasen im hexären System der ozeanischen Salze, die nicht zum Polyhalit führen, ist zu vermeiden. Diese können zu weiterführenden Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozessen über die Standzeit des Versatzbauwerks führen. Diese Prozesse sind mit Volumenänderungen verbunden. Eine Störung der Salzgrusmatrix bzw. des Steinsalzes ist in diesem Fall nicht auszuschließen. Die Folge von Volumenänderungen können Rissbildungen bzw. die Schaffung von Fluidwegsamkeiten sein. Die Freisetzung von Flüssigkeiten ist zu vermeiden. Dies könnte beispielsweise durch einen nicht beabsichtigten Salzmineralneubildungsprozess geschehen, bei dem Kristallwasser freigesetzt wird. Dieses freigesetzte Kristallwasser kann durch Migrationsprozesse oder durch Auspressen aus Porenräumen ein Transportmedium innerhalb des Endlagersystems darstellen. Eine Freisetzung von Kristallwasser aus dem Polyhalit findet bei Temperaturen > 250 °C statt [Fre03]. In einem Endlager im Salinar werden solche Temperaturen in verfüllten Infrastrukturbereichen nicht erwartet.

Durch die Bildung thermodynamisch stabiler Salzmineralphasen werden die dargestellten Problematiken vermieden. Die Bildung von metastabilen Salzmineralphasen ist nicht auszuschließen. Diese sollten jedoch durch frühzeitige Salzmineralneubildungsprozesse zu thermodynamisch stabilen Phasen führen.

¹ Das hexäre System ozeanischer Salze beschreibt die Salzbildung durch das Verdampfen von Meerwasser: Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ // Cl⁻, SO₄²⁻ - H₂O. [Fre00]

3.2.3 Minimaler Flüssigkeitsgehalt des Versatzmaterials

Um Lösungs- und Mineralneubildungsprozesse zur Gefügestabilisierung zu ermöglichen, wird eine wässrige Lösung im Versatzmaterial benötigt. Durch die wässrige Lösung können Salzminerale gelöst werden und neue Salzmineralisationen auskristallisieren. Die zu lösenden Salzmineralisationen sowie die wässrige Lösung bilden eine reaktive Phase, die dem Salzgrus hinzugegeben wird.

Aufgrund der hohen Massenströme an Versatz, die notwendig sind, um ein Endlager vollständig zu verfüllen, ist die Minimierung des Flüssigkeitsgehaltes im Versatzmaterial von hoher Bedeutung. Eine Minimierung des Lösungsgehaltes im gefügestabilisierten Salzgrusversatz wird durch die Begrenzung des Gehaltes an einer reaktiven Phase sichergestellt. Die Zugabe einer reaktiven Phase erfolgt in dem Maße, dass eine vollständige und homogene Benetzung der Salzgrusoberflächen, aber noch keine Porenraumfüllung stattfindet.

Der Flüssigkeitsgehalt im Versatzmaterial kann neben der Minimierung in der Ausgangsrezeptur ebenfalls durch den Einbau in langzeitstabile Mineralphasen verringert werden. Durch die Zugabe von entsprechenden reaktiven Substanzen, die über eine Langzeitbeständigkeit verfügen, kann das in dem Versatzmaterial verbleibende Wasser gebunden werden. Dies bedingt jedoch, dass die daraus gebildeten Produkte ebenfalls das Kriterium der Langzeitbeständigkeit erfüllen.

3.2.4 Setzungsstabilität der Versatzsäule

Durch das Verfüllen von Hohlräumen wird ein Versatzkörper geschaffen, der unmittelbar nach dem Einbringen über die erreichte Einbauhöhe, die im Idealfall der Hohlraumhöhe entspricht, verfügt. Aus dem Eigengewicht des Versatzmaterials resultiert ein Druck, der auf das Salzgruskorngefüge wirkt und von der Einbaudichte sowie der Einbauhöhe abhängig ist (Formel 1):

$$p = \rho * g * h \quad (1)$$

p = Druck [Pa]

ρ = Einbaudichte des Salzgrus [kg/m³]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

h = Höhe des Betrachtungsraums [m]

Wie Formel 1 entnommen werden kann, steigt mit zunehmender Höhe der Druck des Versatzkörpers sowohl innerhalb des Versatzkörpers als auch auf die Sohle. Es lässt sich erkennen, dass vor allem im unteren Bereich des Versatzkörpers der Druck aus dem Eigengewicht am höchsten ist. Aufgrund der Belastung erfolgen vor allem der Prozess Kornumorientierungen der zu einer Verdichtung des Korngerüstes und somit zu einer Abnahme des Volumens in Form von Setzungen führt. Diese Volumenabnahme hat eine Reduktion der Höhe zur Folge. Die Konsequenz ist die Ausbildung eines Ringraums entlang des oberen Bereichs der Stöße und Firste (Firstspalt).

Um die Setzung des Versatzkörpers und die Ausbildung eines Firstspalts nach dem Einbringen des Versatzmaterials unter Tage weitgehend zu unterbinden, wird ein Salzgruskorngemisch verwendet, das über eine hohe Einbaudichte verfügt und dessen Gefüge stabilisiert werden kann. Durch die Stabilisierung des Korngerüstes werden Relativbewegungen der Halitkörner zueinander verringert, sodass eine Kompaktion des Versatzes durch das Eigengewicht unterbunden wird.

3.2.5 Festigkeit und Festigkeitszunahme

Zur frühzeitigen Stabilisation des umgebenden Steinsalzgebirges soll das eingebrachte Versatzmaterial einen Festigkeitszuwachs entwickeln. Diese frühzeitige Festigkeitszunahme des Versatzes dient sowohl der Vermeidung von Setzungsvorgängen des Versatzkörpers (Kapitel 3.2.4) und somit die Bildung eines Firstspaltes, und ermöglicht auch die Lastaufnahme aus dem umgebenden Gebirgskörper.

Die erreichbare Festigkeit des Versatzmaterials resultiert aus der Bildung von neuen Salzmineralphasen aus dem Salzbinder. Diese neugebildeten Salzmineralphasen verbinden die Halitkörner miteinander und erhöhen die notwendige Energie zur Mobilisierung der Halitkörner des verwendeten Salzgruskorngemisches.

Die Festigkeit hängt zum einen von der Festigkeit der neu gebildeten Mineralphasen zum anderen von der Anzahl an stabilisierten Kornkontaktflächen ab. Eine Erhöhung der Kornkontaktflächen verursacht eine höhere Festigkeit.

3.2.6 Kriecheigenschaften

Das unter Tage eingebrachte Versatzmaterial erreicht über die Zeit die Dichtwirkung des gewachsenen Steinsalzes mit einer Permeabilität von $k < 10^{-21} \text{ m}^2$. Aufgrund der Kriecheigenschaft des umgebenden Steinsalzgebirges kommt es, wie in Kapitel 2 erläutert, mit zunehmender Standzeit zu einer Deformation des Steinsalzgebirges in Richtung der ehemaligen bergmännisch geschaffenen Hohlräume. Durch die Bewegung des Steinsalzgebirges wird der eingebrachte Versatz zunehmend belastet. Unter dem Einfluss der äußeren Last findet eine Kompaktion des Versatzmaterials statt. Dieses führt zu einer Abnahme der Porosität und zu einer Verringerung der Permeabilität des Versatzes.

Um Rissbildungen im umgebenden Gebirge zu unterbinden, muss die Deformationsrate des Versatzmaterials der Konvergenzrate des umgebenden Steinsalzgebirges entsprechen. Sowohl eine zu geringe Deformationsrate, als auch eine zu hohe Deformationsrate des Versatzmaterials im Vergleich zum umgebenden Steinsalzgebirge sind zu vermeiden. Unverhältnismäßig geringe Deformationsraten des Versatzes führen zu Spannungsspitzen an den Kontaktstellen zwischen Versatz und Gebirge. Eine unverhältnismäßig hohe Deformationsrate führt zu einer Deformation der umgebenden Gebirgsschichten.

3.2.7 Porositäts- und Permeabilitätsbeziehung

Korngemische weisen eine direkte Abhängigkeit zwischen der Porosität und der Permeabilität auf. Die Änderung der Permeabilität in Abhängigkeit von der Porosität unterscheidet sich bei unterschiedlichen Korngemischen. Hierbei ist vor allem die Kornverteilung der Versatzmaterialien von besonderer Bedeutung. Diese Beziehung wurde bereits für bekannte Salzgrusmaterialien untersucht und zusammengefasst. [Mül91]

Die Permeabilität des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes muss, um einen positiven Einfluss auf die Dichtwirkung auszuüben, bei vergleichbaren Porositäten im niedrigeren Permeabilitätsbereich liegen als vergleichbare Salzgruskorngemische. Darüber hinaus muss die tendenzielle Permeabilitätsabnahme bei einer Verringerung der Porosität im unteren Wertebereich liegen. Dies gewährleistet eine frühzeitige Dichtwirkung bei einer fortschreitenden Kompaktion des Versatzmaterials.

3.2.8 Lösungsstabilität

Die in dem Versatzmaterial vorhandene Lösung unterliegt wie jede andere Materialkomponente der Gravitation. Dies kann bei ungebundenen Lösungen zu Fließbewegungen und zur Bildung von Schichtungen innerhalb des Versatzkörpers führen. Inhomogene Flüssigkeitsverteilungen bzw. das Ausbluten² des Versatzmaterials sind die Folge. Die Konsequenz dieser Flüssigkeitsbewegungen ist eine ungleichmäßige und gehemmte Bildung von Salzmineralphasen. Durch diese inhomogene Salzmineralneubildung sind ein Ausbilden von anisotropen Materialeigenschaften und negativen Einflüssen auf die Versatzqualität nicht auszuschließen.

Beim Ausbluten des Versatzmaterials findet eine gravitative Entwässerung der oberen Versatzschichten statt, bei der die Flüssigkeit in den unteren Bereich des Versatzkörpers fließt. Die Bildung von lösungsgesättigten Schichten durch das Ausbluten stellt potentielle Transportwege für Radionuklide dar. Werden mit Radionukliden belastete Fluide im Versatzmaterial durch eine Kompaktion aus dem ewG ausgepresst, ist die Migration von Radionukliden über die vollständig gesättigte und fließfähige Schicht im Versatzmaterial aus dem ewG heraus nicht vollständig auszuschließen.

3.2.9 Realisierung eines technisch einfachen Einbaus unter Tage

In einem zukünftigen HAW-Endlager können Versatzmaßnahmen für infrastrukturelle Auffahrung von mehreren zweistelligen Kilometern (Kap. 2.3.3) und somit mehrere hunderttausend Kubikmeter zu verfüllender Hohlraum anfallen. Um einen ausreichend schnellen Fortschritt in den Versatzmaßnahmen und somit eine möglichst frühzeitige Stabilisierung der geologischen Barriere zu erreichen, sind technologisch einfach durchzuführende Versatzmaßnahmen mit ausreichendem Materialdurchsatz erforderlich.

Aus diesem Grund muss der Einbau des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes ohne den Gebrauch von Schalungen und/oder Widerlager erfolgen, die einen Einbau des Versatzmaterials erschweren. Die schüttgutmechanischen Eigenschaften des Versatzmaterials sollen weiterhin denen von herkömmlichem Salzgrusversatz ähneln, sodass bereits genutzte Versatztechnologien (z.B. Blas- und Schleudertechnologien) genutzt werden können.

² Gravitative Freisetzung von Flüssigkeit im Sohlenbereich des Versatzkörpers

Hierbei sind vor allem der Schüttwinkel sowie die lockerste und dichteste Lagerung zu beachten. Der Schüttwinkel des Materials sollte hohe Werte annehmen, um die entstehende Böschung steil zu halten. Daraus resultiert eine geringere Wurfweite des Materials von der Sohle bis zur Firste im Sinne einer Vollverfüllung. Sowohl die lockerste als auch die dichteste Lagerung sollen im Vergleich zum herkömmlichen Salzgrus höhere Werte annehmen, um eine höhere Einbaudichte zu ermöglichen. Die Einschätzung der Eignung erfolgt durch einen Vergleich von herkömmlichen Salzgrusversatzmaterialien mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz.

4 AP1 – Anpassung möglicher Bindemittelsysteme hinsichtlich der Mischbarkeit und Benetzung von Salzgrus

4.1 Identifizierung der Ausgangskomponenten des Versatzmaterials

Die in Kapitel 3.1 formulierten Zielstellungen sehen die Entwicklung eines auf Salzgrus basierenden Versatzmaterials vor, das durch eine reaktive Phase ergänzt wird. Durch die hinzugegebene reaktive Phase wird eine Gefügestabilisierung ermöglicht, die zu einer Verbesserung der Versatzmaterialeigenschaften führt. Die verwendeten Ausgangskomponenten des Versatzmaterials müssen den in Kapitel 3.2 genannten Anforderungen der Langzeitbeständigkeit im salinaren Milieu, Mineralneubildung und geeignete Porositäts- Permeabilitätsbeziehung entsprechen. Die weiteren Anforderungen nach Kapitel 3.2 werden anschließend durch die Wirkungsweise der Gefügestabilisierung umgesetzt.

Aufgrund der notwendigen Verfügbarkeit des Salzgrusversatzmaterials für Folgeversuche werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich aktuell auf dem Markt verfügbare Salzgruskorngemische aus laufenden Produktionsbetrieben verwendet und hinsichtlich der Zielstellungen optimiert. Als Ausgangsmaterial werden hierbei Salzgrusmaterialien aus dem Steinsalzbergwerk Sondershausen verwendet. Die Optimierung eines Salzgruskorngemisches kann unabhängig von der Salzbinderentwicklung erfolgen, da erwartet wird, dass sich die Materialien untereinander inert verhalten.

Die reaktive Phase wird ebenfalls hinsichtlich der in Kapitel 3.1 formulierten Zielstellungen sowie den in Kapitel 3.2 erläuterten Anforderungen entwickelt. Im weiteren Verlauf wird die reaktive Phase als Salzbinder bezeichnet. Die Festlegung der Nomenklatur erfolgt aufgrund des Mechanismus, mit dem der Salzbinder die Salzgruskörnung des Versatzmaterials stabilisiert. Es findet eine aus den Salzbinderkomponenten heraus resultierende Salzmineralneubildung an den Steinsalzoberflächen statt. Dies entspricht jedoch keiner Reaktion des Salzbinders mit den chemischen Komponenten des Salzgruses bzw. der festen mit der flüssigen Phase. Die feste Phase beinhaltet die für eine Salzmineralneubildung notwendigen chemischen Komponenten, während die flüssige Phase als Lösungs- und Mineralneubildungsmedium dient. Dies ist ein signifikanter Unterschied zu bisher verwendeten Bindemitteln wie sie zum Beispiel in MgO-Baustoffen verwendet werden. Bei diesen Bindemitteln findet eine Hydratation der festen Bestandteile durch die verwendete Lösung statt und entspricht somit einer Reaktion der verwendeten Bindemittelphasen miteinander.

Für die Zusammensetzung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes ergibt sich somit die Notwendigkeit der Entwicklung folgender in Tabelle 1 dargestellter Einzelkomponenten:

Tabelle 1: Darstellung der Zusammensetzung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

| Gefügestabilisierter Salzgrusversatz | |
|---|--|
| Salzgruskornmisch | Salzbinder (reaktive Phase) |
| <ul style="list-style-type: none"> • Optimierte Steinsalzgruskörnungen | <ul style="list-style-type: none"> • Feste Salzbinderkomponente • Flüssige Salzbinderkomponente (< 4 Masse-% im Versatz) |

Die Rezepturentwicklung wurde am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau in Zusammenarbeit mit dem Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

4.2 Entwicklung eines optimierten Salzgruskornmisches für das Forschungsvorhaben

4.2.1 Verwendete Geräte und Methoden zur Salzgruscharakterisierung

Die Versatzeigenschaften des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im Einbauzustand und unmittelbar nach dem Einbau unter Tage werden durch die Auswahl der Ausgangsmaterialien sowie die Verarbeitung des Versatzmaterials erreicht. Dabei kommt dem verwendeten Salzgruskornmisch eine besondere Bedeutung zu, da dieses die hydraulischen und mechanischen Versatzeigenschaften maßgeblich bestimmt.

Bei der Auswahl des Salzgruskornmisches musste auf folgende Materialeigenschaften geachtet werden:

- Ungleichförmigkeit und Kornband
- Lockerste und dichteste Lagerung
- Schüttwinkel
- Verdichtbarkeit
- Verfügbarkeit des Kornmisches
- Vergleichbarkeit mit bekannten und definierten Materialien (Referenzsalzgrus)

Bei den Untersuchungen wurde sich an den Untersuchungsmethoden für die Kennwertermittlung von nichtbindigen Böden orientiert. Da für Salzgrus hierfür keine entsprechenden Normen vorliegen, wurden die Normen aus der Bodenmechanik adaptiert.

Als wichtigste Charakterisierungsmöglichkeit eines Korngemisches dient die Siebanalyse. Bei der Siebanalyse wird das Korngemisch mittels Analysesieben mit absteigender Maschenweite in Kornfraktionen zerlegt. Diese Kornfraktionen bestehen aus Korngemischen definierter Korndurchmesser. Am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg werden die Siebanalysen mit einer Siebmaschine des Herstellers Retsch vom Typ VE 1000 (Abbildung 6) durchgeführt [Bec13].



Abbildung 6: Siebmaschine am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau des Typs Retsch VE 1000

Die Bodenklassifikation granularer, nichtbindiger Böden ist in [Deu161] festgelegt und kann für Salzgrus adaptiert werden. Anhand der Siebanalyse wird die spezifische Kornverteilungskurve des Korngemisches erstellt. Diese Kornverteilungskurve ist eine graphische Darstellung im semilogarithmischen Maßstab der Massenanteile einzelner Kornfraktionen an der Gesamtprobe. Sie wird durch den Siebdurchgang [%] und den Korndurchmesser [mm] gebildet. Anhand der Kornverteilungskurve kann eine Aussage über die Ungleichförmigkeit,

Krümmungszahl und über das Kornband getroffen werden. Bei der Durchführung der Siebanalyse für Salzgrusmaterialien wurde sich an [Deu162] orientiert.

Die Ungleichförmigkeit eines Korngemisches beschreibt den Anteil unterschiedlicher Korngrößen innerhalb des Korngemisches. Abbildung 7 stellt den Einfluss der Ungleichförmigkeit bildlich dar. Es ist zu erkennen, dass ein gering ungleichförmiges Korngemisch über großräumige Poren verfügt. Aufgrund der geringen Anzahl von Füllkörnern ist die Verdichtbarkeit als gering zu bezeichnen. Durch die geringe Verdichtbarkeit von gering ungleichförmigen Korngemischen verfügen diese über einen früh wirkenden Versatzwiderstand. Eine hohe Ungleichförmigkeit bewirkt konträre Materialeigenschaften. Die Ungleichförmigkeit lässt sich durch die Ungleichförmigkeitszahl C_U (Formel 2) ermitteln [Deu161].

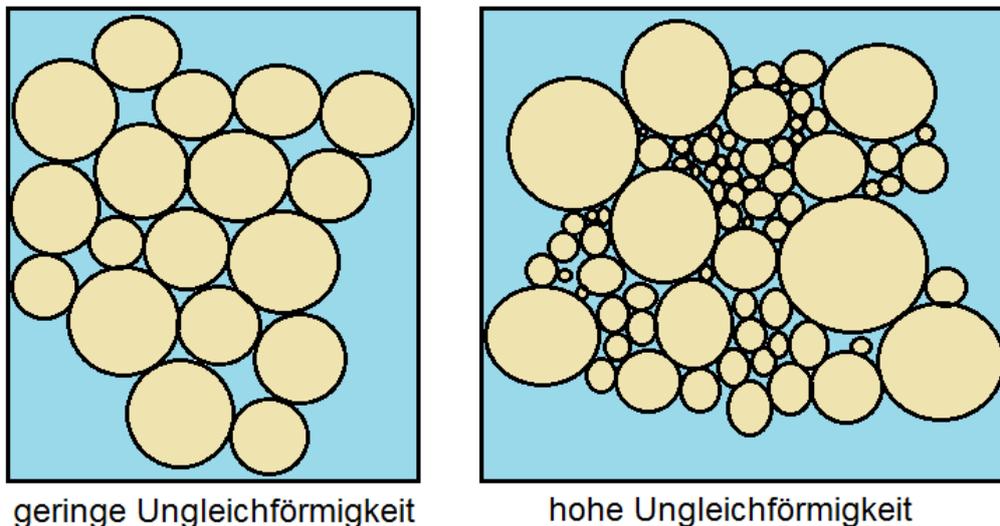


Abbildung 7: Darstellung unterschiedlicher Ungleichförmigkeiten von Korngemischen

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2)$$

C_U = Ungleichförmigkeitszahl [-]

d_{60} = Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang [mm]

d_{10} = Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang [mm]

Die Krümmungszahl C_C bezeichnet die Steigung der Kornverteilungskurve zwischen 10 % und 60 % Siebdurchgang. Ähnlich wie die Ungleichförmigkeitszahl deutet eine hohe Steigung auf eine gleichförmige Korngrößenverteilung hin. Eine geringe Steigung bezeichnet eine ungleichförmige Korngrößenverteilung. Die Krümmungszahl wird durch Formel 3 ermittelt [Deu161]:

$$C_C = \frac{d_{30}^2}{d_{10} * d_{60}} \quad (3)$$

C_C = Krümmungszahl [-]

d_{30} = Korndurchmesser bei 30% Siebdurchgang [mm]

d_{60} = Korndurchmesser bei 60 % Siebdurchgang [mm]

d_{10} = Korndurchmesser bei 10 % Siebdurchgang [mm]

Anhand Tabelle 2 kann das Kornband eines mineralischen Korngemisches definiert werden. Hierfür werden die Kennwerte C_U und C_C benötigt, die für jedes Korngemisch durch eine Siebanalyse ermittelt werden.

Tabelle 2: Charakterisierung eines Korngemisches anhand der Ungleichförmigkeitszahl und der Krümmungszahl nach [Deu161]

| Benennung | C_u | C_c |
|-------------------------|----------|--------------|
| eng gestuft | < 6 | beliebig |
| weit gestuft | ≥ 6 | 1 - 3 |
| intermittierend gestuft | ≥ 6 | < 1 oder > 3 |

Für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz muss entsprechend der Zielstellungen ein ungleichförmiges Korngemisch mit einem weiten Kornband verwendet werden. Dies ist auf die angestrebte hohe Einbaudichte sowie auf die geringe Anfangspermeabilität des Versatzmaterials zurückzuführen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Benetzbarkeit des Salzgruses mit einer minimalen Salzbindermenge, die durch ein weites Kornband negativ beeinflusst wird, weiterhin technisch realisierbar bleibt.

Wie in Abbildung 7 (S. 31) zu erkennen ist, verfügt ein ungleichförmiges Korngemisch mit einem weiten Kornband über eine hohe spezifische Oberfläche. Aufgrund dieser hohen spezifischen Oberfläche im Korngemisch kommt es zur Ausbildung einer höheren Anzahl von Kornkontaktflächen, die durch einen entsprechenden Salz binder stabilisiert werden können. Ein Korngemisch mit einer höheren spezifischen Oberfläche ist dementsprechend vorzuziehen.

Die Kornverteilungskurve eines Korngemisches kann mit der Fuller-Kurve (Idealsieblinie) verglichen werden. Die Fuller-Kurve beschreibt ein Korngemisch mit definiertem Größtkorn, das über eine optimale Verdichtbarkeit verfügt und somit hohe

Einbaudichten ermöglicht. Eine Ähnlichkeit zu der spezifischen Fuller-Kurve ist bei tragenden Baustoffen aufgrund der erreichbaren Einbaudichten zu empfehlen, da mögliche Setzungserscheinungen minimiert werden. Die Fuller-Kurve für ein bekanntes Größtkorn berechnet sich nach Formel 4 [Fis09]:

$$A_i = 100 * \left(\frac{d_i}{D}\right)^n \quad (4)$$

- A_i = Siebdurchgang bei Korndurchmesser d_i [%]
 d_i = Korngröße i [mm]
 D = Größtkorn [mm]
 n = Kornformspezifischer Exponent [-]

Der verwendete kornformspezifische Exponent nimmt in Abhängigkeit von der Kornform des Materials Werte im Bereich von 0 bis 1 an. Für ein Material mit sphärischen Kornformen wird ein Wert von $n = 0,5$ [Fis09] angenommen. Materialien, die aufgrund von Brechprozessen eine eckige Form haben (z. B. Splitt) wird ein Exponent von $n = 0,35$ [Fis09] verwendet.

Der Schüttwinkel θ eines granularen Korngemisches beschreibt den Winkel, der sich beim Schütten des Materials zu einem Kegel einstellt. Die Abbildung 8 zeigt den Einfluss des Schüttwinkels auf granulare Gemische.

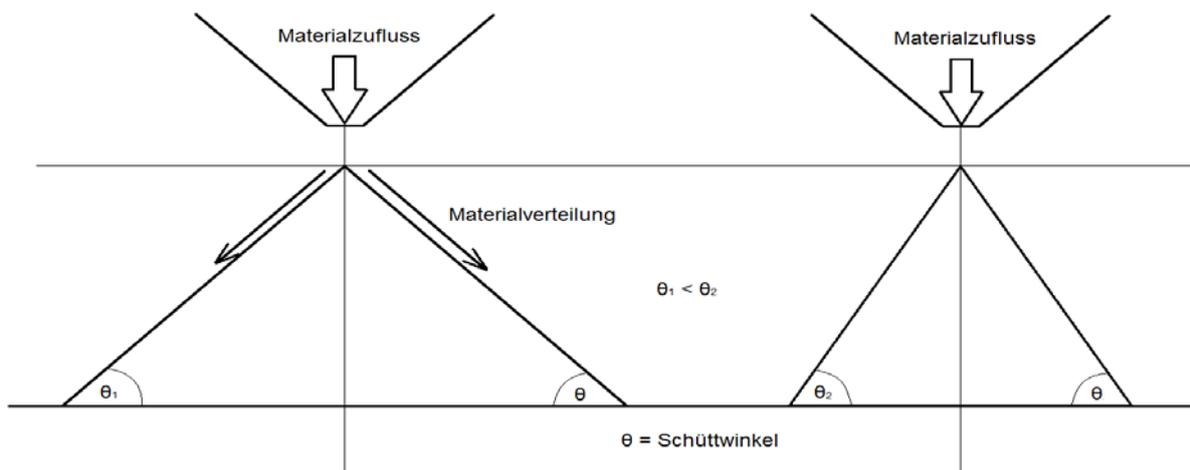


Abbildung 8: Darstellung des Schüttwinkels

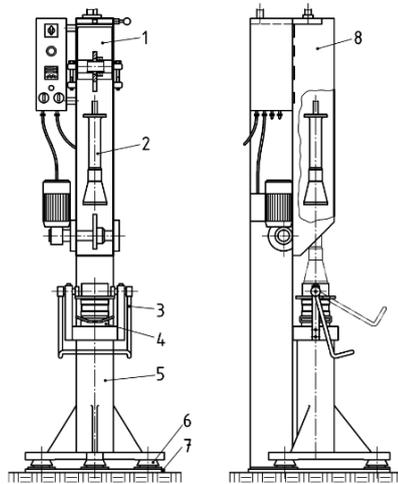
Der Schüttwinkel ist vor allem hinsichtlich des Einbauverhaltens wichtig. Ein geringer Schüttwinkel verursacht eine flache Kopfböschung des Materials. Dies erhöht maßgeblich den Einbauaufwand, da das Versatzmaterial für eine Vollverfüllung über höhere Distanzen in den Hohlraum eingebracht werden muss. Für das GESAV-

Material wird trotz der hinzugegebenen flüssigen Komponenten ein hoher Schüttwinkel angestrebt, um den Einbauaufwand zu minimieren.

Bei der Beschreibung der Lagerungsdichte werden vor allem die lockerste und die dichteste Lagerung betrachtet. Die lockerste Lagerung definiert die geringste mögliche Einbaudichte, die mit dem Material zu erreichen ist. Im Gegensatz hierzu definiert die dichteste Lagerung die maximal zu erreichende Einbaudichte, bei der noch kein Kornbruch auftritt. Diese beiden Parameter sind wichtig, um die beim Einbau zu erreichenden Dichten zu charakterisieren und zu bewerten.

Neben dem Schüttwinkel sind die lockerste sowie die dichteste Lagerung hinsichtlich der Vorhabensziele von Bedeutung. Die lockerste Lagerung beschreibt die Lagerungsdichte des granularen Materials bei keiner Verdichtung. Dies stellt die minimalste Einbaudichte dar. In dem Vorhaben wird eine möglichst hohe lockerste Lagerung angestrebt, um auch bei geringen Verdichtungsenergien eine ausreichende Einbaudichte zu erreichen. Die dichteste Lagerung ist die höchst mögliche Einbaudichte des Materials, bei der noch keine Kornzerstörung auftritt. Es wird ebenfalls eine hohe dichteste Lagerung angestrebt. Die Verfahren zur Ermittlung der Parameter sind in [Deu12] festgeschrieben. Da für Salzgrusmaterialien keine eigene Regelung hinsichtlich der lockersten bzw. dichtesten Lagerung getroffen wurde, wird [Deu12], die für nichtbindige Böden gilt, für Salzgrusmaterialien in diesem Forschungsvorhaben adaptiert.

Des Weiteren ist die Verdichtbarkeit des Korngemisches von Bedeutung. Die Verdichtbarkeit beschreibt die notwendige Energie, die dem Material zugeführt werden muss, um es zu verdichten. Die Verdichtbarkeit von mineralischen Korngemischen kann durch einen Marshall-Verdichter überprüft werden. In [Deu12] ist die Untersuchungsmethode festgeschrieben. Bei dem Marshall-Verdichter wird das zu untersuchende Material durch ein definiertes Fallgewicht mit einer vorgegebenen Anzahl von Schlägen verdichtet. Anhand der Fallenergie und der Anzahl an Schlägen sowie der Setzung des Materials, kann die Verdichtung bei unterschiedlichen Verdichtungsenergien ermittelt werden. Am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau wird der Marshall-Verdichter genutzt. Dieser ist in Abbildung 9 dargestellt.

**Legende**

- 1 Basisgerät mit motorgetriebener Hubvorrichtung für das Fallgewicht und einem Schlagzähler (in der Darstellung ohne Schutzabdeckung)
- 2 Fallhammer mit dem Führungsstab für das Fallgewicht
- 3 Exzenter der Einspannvorrichtung
- 4 Formgrundfläche mit daran befestigter Verdichtungsform
- 5 Verdichtungssockel
- 6 FüÙe
- 7 Stahlgrundplatte
- 8 Schutzabdeckung

Abbildung 9: Schematischer Aufbau des verwendeten Marshall-Verdichtungsgerätes nach [Deu12]

Zu Beginn eines Verdichtungsversuchs, wird das zu untersuchende Probenmaterial mit der lockersten Lagerung in den Probenbehälter eingebaut. Die lockerste Lagerung berechnet sich dabei nach:

$$\rho_l = \frac{m_{pr}}{V} \quad (6)$$

- ρ_l = lockerste Dichte [g/cm³]
 m_{pr} = Masse des Probenmaterial [g]
 V = Volumen des Probenbehälters [cm³]

Anschließend wird die Probe in dem Probenbehälter in den Marshall-Verdichter eingebaut und mittels des Fallgewichtes verdichtet. Nach der Verdichtung wird der Probenbehälter wieder ausgebaut und die Setzung gemessen. Durch die Setzung findet eine Änderung des Volumens statt bei gleichbleibender Masse. Die erhaltene Dichte berechnet sich nach:

$$\rho_2 = \frac{m_{pr}}{V_{neu}} \quad (7)$$

- ρ_2 = Dichte [g/cm³]
 m_{pr} = Masse des Probenmaterial [g]
 V = Volumen des Probenbehälters [cm³]
 V_{neu} = Volumen der Probenmasse nach der Verdichtung [cm³]

Da durch den spezifischen Geräteaufbau eine konstante Verdichtungsenergie in das Material eingetragen wird, kann die Verdichtbarkeit der Materialien zwischen der lockersten sowie der dichtesten Lagerung untersucht werden. Angegeben wird die notwendige Energie für die Verdichtung von der lockersten Lagerung bis zur dichtesten Lagerung. Errechnet wird dies nach Formel 5 [Cap85]:

$$E = \frac{H * Q * g * N}{V} \quad (5)$$

E = Verdichtungsenergie pro Volumeneinheit in [J/m³]

H = Fallhöhe [m]

Q = Stempelmasse [kg]

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

N = Anzahl der Schläge [-]

V = Probenvolumen [m³]

Die Verfügbarkeit des verwendeten Salzgrusmaterials ist in ausreichenden Massen über den Zeitraum der Betriebsphase zu gewährleisten, um eine zeitliche Verzögerung der Verfüllmaßnahmen zu vermeiden. Darüber hinaus ist eine konstante Qualität des Versatzmaterials durch eine entsprechende Konditionierung notwendig.

Diese Bedingungen werden durch kontrollierte Brech- und Siebanlagen umgesetzt. In Steinsalzbergwerken wird dies national als auch international zur Qualitätskontrolle der Produkte standardmäßig umgesetzt. Es ist sicherzustellen, dass das verwendete Salzgruskornmisch sowie der verwendete Salzbinder über lange Zeiträume verfügbar und reproduzierbar sind.

4.2.2 Auswahl eines Referenzsalzgruses (REPOPERM – Phase 1)

Zur Beurteilung der entwickelten Salzgruskornmische ist ein Vergleich mit bekannten und charakterisierten Salzgrusversatzmaterialien notwendig. Ein solches Salzgrusmaterial wird im weiteren Verlauf als Referenzsalzgrus bezeichnet. Anhand des Referenzsalzgruses lässt sich eine Einordnung des entwickelten Salzgrusversatzmaterials mit bereits untersuchten Salzgruskörnungen tätigen. Dies

ermöglicht einen Vergleich und eine Beurteilung ausgewählter Materialeigenschaften im Kontext der Endlagerung von HAW-Abfällen im Salinar.

Als geeignetes Referenzsalzgrus wird das im Forschungsvorhaben „Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM-Phase 1“ [Krö09] verwendete Salzgrusmaterial definiert. Dieses Steinsalz stammt aus der älteren Zechsteinformation (z2) und wurde mittels Teilschnittmaschine gewonnen. Der Durchmesser des Größtkorns beträgt $d > 64$ mm. Im Rahmen von Laboruntersuchungen wurde das Größtkorn auf $d < 31,5$ mm eingegrenzt. Diese Verringerung des Größtkorns ist notwendig, um Probenmaterial im Labormaßstab untersuchen zu können. Dieses Material wird in dem zugrunde liegenden Bericht als Sieblinie 1 bezeichnet. [Krö09]

Ein weiteres geeignetes Salzgruskorngemisch ist die DEBORA-Sieblinie. Die DEBORA-Sieblinie wurde in dem Forschungsvorhaben „The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste“ entwickelt [Rot99]. Die DEBORA-Sieblinie verfügt über eine hohe Ähnlichkeit zur Sieblinie 1 bei Begrenzung des Grobkorns auf $d = 8$ mm. Die Verringerung der zulässigen Größtkorns ist notwendig, um eine Verfüllung des Ringraums zwischen Behälter und Bohrloch zu ermöglichen.

Aufgrund der Verwendung der Sieblinie 1 in [Krö09] und dem bereits vorhandenen Wissensstand wird in dieser Arbeit diese Kornverteilung als Referenzsalzgrus angewendet. Eine begrenzte Menge eines geeigneten Probenmaterials dieses Referenzsalzgruses stand zur labortechnischen Charakterisierung zur Verfügung. Abbildung 10 (S. 38) stellt die Sieblinien des beschriebenen Referenzsalzgruses sowie der DEBORA-Sieblinie im Vergleich zur Fuller-Kurve mit dem Fullerexponent $n = 0,5$ dar. Die Fuller-Kurve beschreibt eine ideale Sieblinie mit einer höchst möglichen Verdichtbarkeit. Der Fullerexponent orientiert sich an der Kornform. Ein Fullerexponent von $n = 0,5$ beschreibt sphärische Kornformen, während ein Exponent von $n = 0,35$ für gebrochene Kornformen verwendet wird [Fis09]. Neuste Untersuchungen zeigen, dass auch bei gebrochenen Steinsalzmaterialien ein Fullerexponent von $n = 0,5$ zu empfehlen ist [Kud14].

Aus Abbildung 10 ist zu entnehmen, dass sowohl die DEBORA-Sieblinie als auch das Referenzsalzgrus über eine hohe Ähnlichkeit zur dargestellten Fuller-Kurve verfügen. Dieses lässt auf eine gute Verdichtbarkeit der Salzgruskorngemische schließen. Abbildung 10 zeigt darüber hinaus, dass die Siebkurven der DEBORA-

Sieblinie und des Referenzsalzgruses im Feinkornbereich $d < 2,00$ mm einen identischen Kurvenverlauf aufweisen.

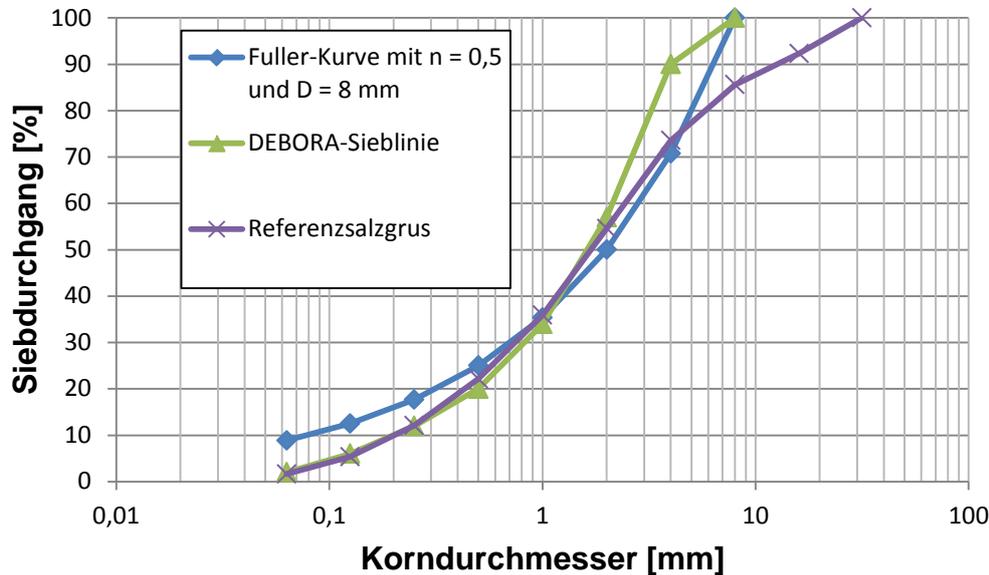


Abbildung 10: Darstellung des Referenzsalzgruses und der DEBORA-Sieblinie im Vergleich zur Fuller-Kurve mit $n = 0,5$

4.2.3 Entwicklung eines optimierten Salzgruskorngemisches hinsichtlich der Zielstellungen von GESAV

4.2.3.1 Auswahl möglicher Salzgruskörnungen für eine Gefügestabilisierung

In dem FuE-Vorhaben GESAV wird Salzgrus vom Unternehmen „Glückauf Sondershausen Entsorgungs- und Sicherungsgesellschaft“ aus der Steinsalzgrube Sondershausen verwendet. Eine Nutzung dieses Materials ist auf die ausreichend hohe Verfügbarkeit, auch in einer späteren in situ Phase, sowie der chemisch-physikalischen Eignung zurückzuführen.

Die chemischen Bestandteile des Steinsalzes aus der Grube in Sondershausen sind in Tabelle 3 aufgeführt. Die in Tabelle 3 dargestellte Salzgrusanalyse wurde vom Unternehmen GSES zur Verfügung gestellt [Glü13]. Es ist zu erkennen, dass der Hauptbestandteil der Steinsalzkörnung das Salzmineral Halit (NaCl) mit ca. 98,75 % Anteil ist. Neben dem NaCl liegt CaSO_4 (Calciumsulfat) mit 0,34 % vor. Die restlichen Nebenbestandteile sind mit weniger als 0,2 % vertreten.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung des Salzgruses aus der Steinsalzgrube in Sondershausen

| Bestandteil | Anteil | Bestandteil | Anteil |
|---------------------------------|--------|--------------------------|--------|
| NaCl | 98,753 | NaBr | 0,017 |
| MgCl ₂ | 0,012 | MgSO ₄ | 0,045 |
| K ₂ SO ₄ | 0,186 | CaSO ₄ | 0,34 |
| Na ₂ SO ₄ | 0,052 | Feuchte | 0,03 |
| Unlösliches | 0,168 | CaCl ₂ u. KCl | < 0,01 |

Am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik der TU Bergakademie Freiberg wurde die Kornrohddichte des Salzgrusmaterials mittels Helium-Psychrometer ermittelt. Die durchschnittliche Kornrohddichte des untersuchten Probenmaterials beträgt 2,198 g/cm³ und bewegte sich im Wertebereich von 2,192 – 2,205 g/cm³. Dies stimmt mit in Literatur entnommenen Werten für die Kornrohddichte von vergleichbaren Steinsalzmaterialien, die im Wertebereich von 2,195 – 2,200 g/cm³ [Bam00] liegen, überein.

Das vorhandene Material wurde mittels Bohren und Sprengen (B+S) gewonnen. Nach der Gewinnung wird das Steinsalzmaterial in einer untertägigen Brech- und Siebanlage weiterverarbeitet. In Abhängigkeit von der Brech- und Siebphase stellen sich unterschiedliche Korngemische ein. Dabei handelt es sich um Streusalz, Futtermittelsalz und Feinsalz. Ein Vorprodukt ist das aus der ersten Brechphase stammende Korngemisch Überkorn, das aufgrund der nicht für das Unternehmen nutzbaren Korngröße weiterverarbeitet wird. Im weiteren Verlauf werden die einzelnen Korngemische nach dem Entnahmeort in der untertägigen Brech- und Siebphase benannt. Dabei wird folgende Benennung verwendet:

- Erste Brech- und Siebphase = Überkorn
- Streusalz = Band 6
- Futtermittelsalz = Band 8
- Die Bezeichnung Feinsalz bleibt bestehen.



Abbildung 11: Die Kornfraktionen Überkorn, Band 6, Band 8 und Feinsalz

Abbildung 12 stellt die Kornverteilungskurven der einzelnen Korngemische dar. In der Abbildung ist zu erkennen, dass die einzelnen Korngemische sehr steile

Kornverteilungskurven aufweisen und daher als eng gestuft bezeichnet werden müssen. Eine ausreichend hohe Verdichtbarkeit sowie hohe Einbaudichten sind für die einzelnen Korngemische in Frage zu stellen.

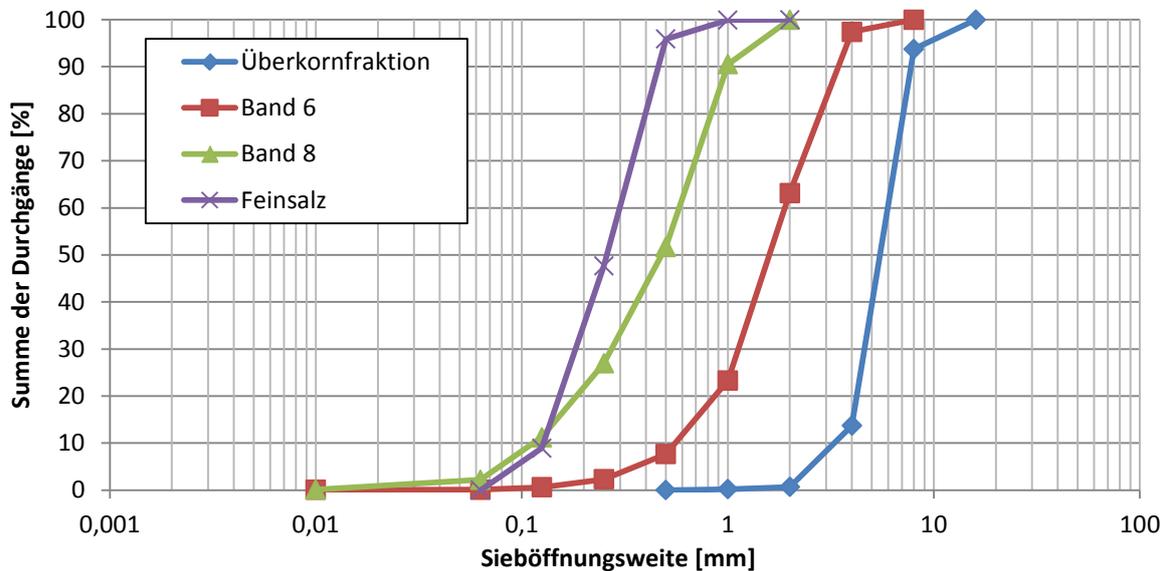


Abbildung 12: Sieblinien der Kornfraktionen aus der untertägigen Brech- und Siebanlage in der Grube Sondershausen

4.2.3.2 Erstellung eines optimierten Kornbandes

Um ein setzungsarmes Materialverhalten des „Gefügestabilisierten Salzgrusversatzes“ zu generieren, muss eine Salzgruskörnung verwendet werden, die über eine höhere Ungleichförmigkeit sowie ein größeres Kornband verfügt als die in Kapitel 4.1.3.1 genannten Ausgangsmaterialien. Eine hohe Einbaudichte ist durch eine optimale Verdichtbarkeit beim Einbau zu erreichen. Zur Verbesserung der Parameter Verdichtbarkeit und Einbaudichte, muss eine Optimierung der Korngemische durch eine Mischung der Einzelfraktionen miteinander erfolgen. Dabei wird versucht ein Korngemisch zu erstellen, das sich dem Verlauf der Fuller-Kurve mit $n = 0,35$ [Fis09] und $n = 0,2$ annähert. Diese Werte für den Fuller-Exponenten wurden aus der Literatur für gebrochene mineralische Gesteinskörnungen entnommen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Korngemische entwickelt:

1. Korngemisch 1 mit minimierter spezifischer Oberfläche
2. Korngemisch 2 mit maximierter Raumausfüllung

Das Korngemisch 1 verfügt über eine minimierte spezifische Oberfläche, um eine Mischbarkeit bei einem minimalen Bindemittelanspruch zu ermöglichen. Hierbei wurde auf den Feinsalzanteil verzichtet. Das Korngemisch besteht aus folgenden Salzgrusfraktionen der Grube Sondershausen:

- 27 Massen-% Überkorn (ÜK)
- 29 Massen-% Band 6 (B6)
- 44 Massen-% Band 8 (B8)

Das Korngemisch 2 wurde mit der Zielstellung entwickelt, eine möglichst hohe Einbaudichte sowie hohe Raumausfüllung zu ermöglichen. Dies ist vor allem hinsichtlich der Anfangspermeabilität des Versatzmaterials von besonderem Interesse. Das Korngemisch 2 besteht aus folgenden Salzgrusfraktionen der Grube Sondershausen:

- 21,6 Massen-% Überkorn
- 23,2 Massen-% Band 6
- 35,2 Massen-% Band 8
- 20 Massen-% Feinsalz (FS)

4.2.3.3 Charakterisierung der optimierten Kornverteilungskurven

In der Abbildung 13 sind die Kornverteilungskurven der optimierten Salzgruskorngemische zu erkennen. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Korngemische 1 und 2 deutlich ungleichförmiger sind als die verwendeten Einzelfraktionen. Der Verlauf der Kornverteilungskurven nähert sich dem der Fuller-Kurven mit $n = 0,2$ und $n = 0,35$ an. Dabei ist durch die Zugabe des Feinsalzes eine Erhöhung der Ungleichförmigkeit zu erkennen. Dementsprechend ist bei den Korngemischen 1 und 2 von einer Verbesserung der Verdichtbarkeit auszugehen.

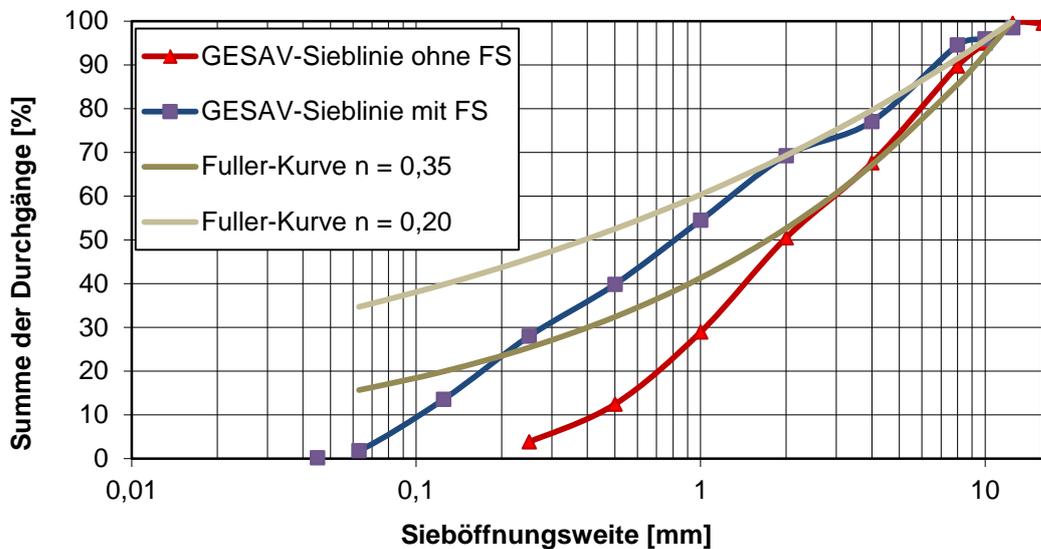


Abbildung 13: Sieblinien der GESAV-Kornmischung ohne Feinsalz (FS) sowie der mit 20 Massen-% Feinsalz optimierten GESAV-Kornmischung

Die Materialeigenschaften der entwickelten Salzgruskornmischungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Materialeigenschaften der optimierten Salzgruskornmischungen Kornmischung 1 und 2 sowie dem Referenzsalzgrus

| Materialeigenschaft | Kornmischung 1 | Kornmischung 2 | Einheit |
|---|----------------|----------------|-----------------------|
| Ungleichförmigkeitszahl C_u | 7 | 10 | [-] |
| Krümmungszahl C_c | 1 | 0,5 | [-] |
| Schüttwinkel | 28,6 | 33,3 | [°] |
| Lockerste Lagerung | 1,36 | 1,30 | [g/cm ³] |
| Dichteste Lagerung | 1,68 | 1,66 | [g/cm ³] |
| Verdichtungsenergie bis zur dichtesten Lagerung | 0,74 | 0,29 | [MNm/m ³] |

Wie aus der Tabelle 4 erkenntlich wird, befinden sich die Salzgruskornmischungen 1 und 2 in dem Bereich von weitgestuften bzw. intermittierend gestuften Kornmischungen. Dieses ist mit der Verwendung von verschiedenen ausgewählten Kornfraktionen zu erklären. In der Abbildung 13 ist dies anhand des treppenförmigen Verlaufs der Siebkurve zu erkennen. Aufgrund der Verwendung von drei bzw. vier Kornfraktionen, die als enggestuft beschrieben werden können, ergibt sich ein intermittierendes Kornmischungen. Dies weist vor allem bei den Korngrößen, die in dem Übergangsbereich von Kornfraktionen liegen, einen Mangel auf.

Die Verdichtbarkeit der Salzgruskornmischungen zeigt, dass die notwendige Energie zum Erreichen der dichtesten Lagerung bei dem Kornmischung 1 Werte $> 0,7$

MNm/m³ annimmt. Durch eine Feinsalzzugabe wird die notwendige Energie zum Erreichen der dichtesten Lagerung deutlich auf < 0,3 MNm/m³ verringert. Durch eine Feinsalzzugabe kann durch entsprechende Versatztechnologien eine höhere Einbaudichte erreicht werden.

Anhand der Verteilungsdichte der Korngemische (Abbildung 14) ist zu erkennen, dass die Verläufe der Verteilungsdichten vom Korngemisch 1 und 2 eine hohe Ähnlichkeit aufweisen. Durch die Feinsalzzugabe erfolgt eine Verschiebung der Verteilungsdichten. Der durch die Verwendung von stark gleichförmigen Einzelkornfraktionen auftretende Kornmangel bei bestimmten Korndurchmessern kann durch die Feinsalzzugabe nicht behoben werden. Dies bestätigt, dass es sich bei den Korngemischen aufgrund der verwendeten Einzelkornfraktionen um intermittierende Korngemische handelt.

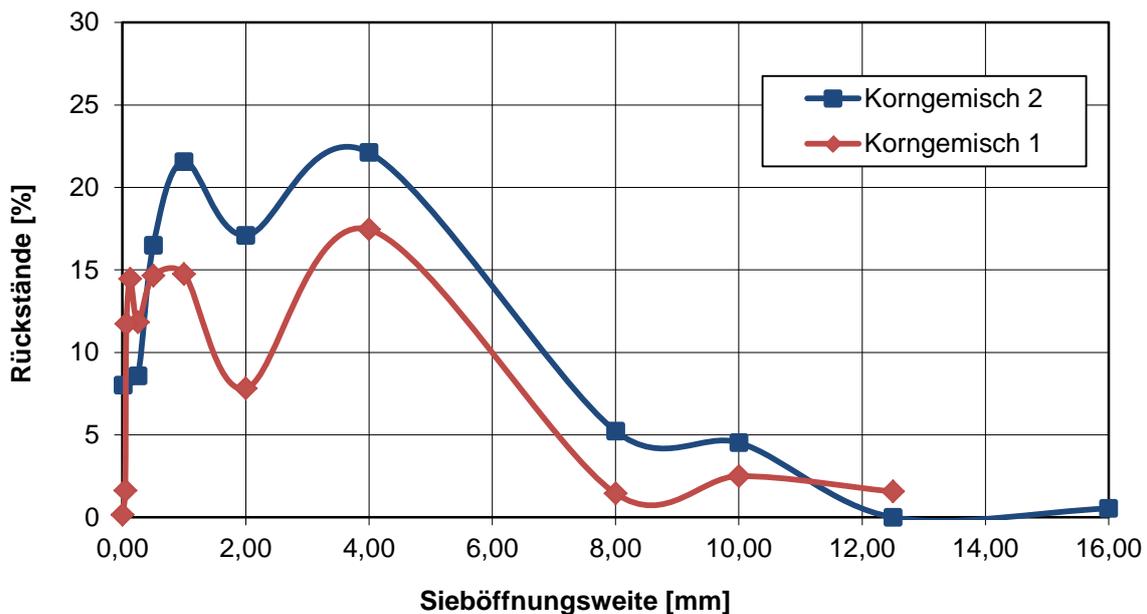


Abbildung 14: Verteilungsdichte der Korngemische 1 und 2

Die für das FuE-Vorhaben optimierten Korngemische können als ungleichförmig bezeichnet werden. Vor allem das Korngemisch 2 weist hierbei eine große Ungleichförmigkeit auf. Dieses ist vor allem hinsichtlich der Raumausfüllung des Korngemisches positiv zu bewerten. Die Krümmungszahl weist wie oben beschrieben auf intermittierende Kornbänder hin. Intermittierende Kornbänder verfügen über eine un stetige Kornverteilung. Dieses kann für die homogene Benetzung des Korngerüsts positiv sein, da Füllkörner in dem Korngerüst in geringerem Anteil vorhanden sind und die spezifische Oberfläche somit verringert ist.

Der Nachteil an intermittierenden Korngemischen ist der erhöhte Porenraum innerhalb des Korngerüstes.

4.2.3.4 Produktbedingte Schwankungsbreite der Salzgruskorngemische

Die Kornfraktionen Band 6 sowie Band 8 werden von dem Unternehmen GSES als Produkte verwendet und verfügen dementsprechend über eine gleichbleibende Kornverteilungskurve. Dennoch konnten Schwankungen der Kornverteilungen nachgewiesen werden, die auf Sedimentationen sowie mechanische Belastungen des Salzgrusmaterials durch den Transport zurückzuführen sind. Diese Schwankungen sind in den Abbildungen 15 und 16 zu erkennen. Die Kornfraktionen Überkorn sowie Feinsalz werden vom Unternehmen regelmäßig beprobt und unterliegen petro-geologischen, mineralogischen und produktionstechnischen Schwankungen.

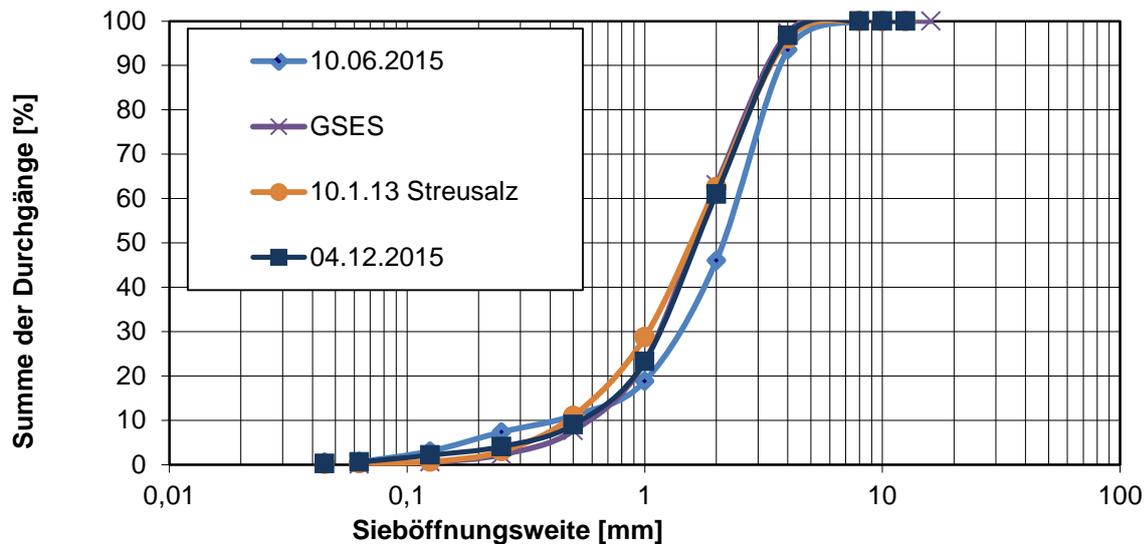


Abbildung 15: Kornverteilungskurven des Korngemisches Band 6 über den Zeitraum 2013 – 2015 nach Transport

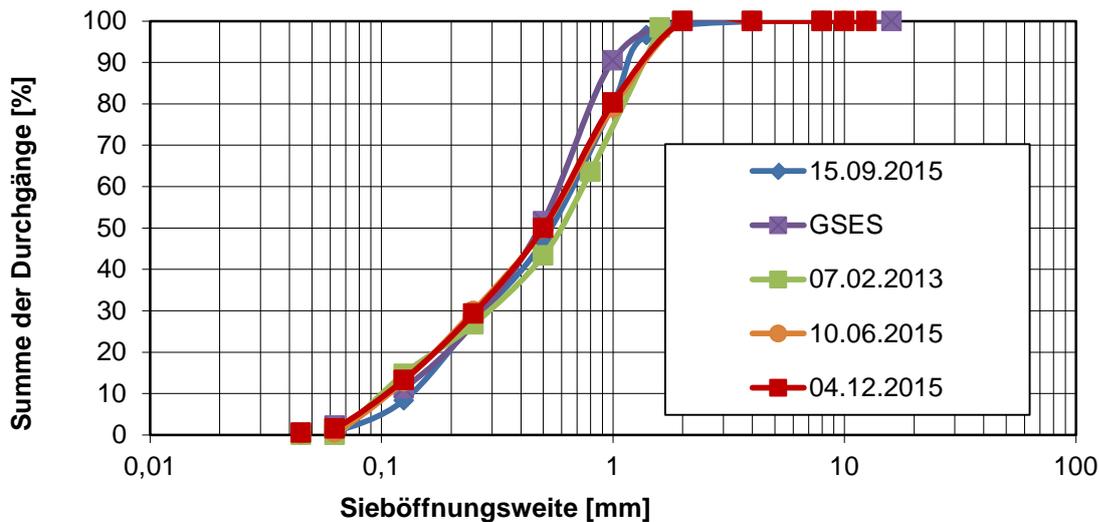


Abbildung 16: Kornverteilungskurven des Korngemisches Band 8 über den Zeitraum 2013 – 2015 nach Transport

Das Überkorn wird in der ersten Brechphase erzeugt und besitzt einen Durchmesser von bis zu 16 cm. Das Produkt der ersten Brechphase wird anschließend gesiebt und Korngrößen > 8,0 cm werden der ersten Siebphase wieder rückgeführt. Das Material für das vorliegende FuE-Vorhaben wurde aus zwischen der ersten Brechphase und der anschließenden Siebphase entnommen. Aus diesem Grund, ist eine stetige Schwankung des Größtkorns vorhanden, das durch die Absiebung von Korngrößen > 12,0 cm behoben wurde. Dennoch ist eine Schwankung innerhalb des Korngemisches vorhanden, die auf petro-geologische und mineralogische Materialeigenschaften zurückzuführen ist. Die Abbildung 17 stellt die Siebanalysen der genutzten Überkornchargen dar. Das Datum der Siebanalysen ist der Legende zu entnehmen

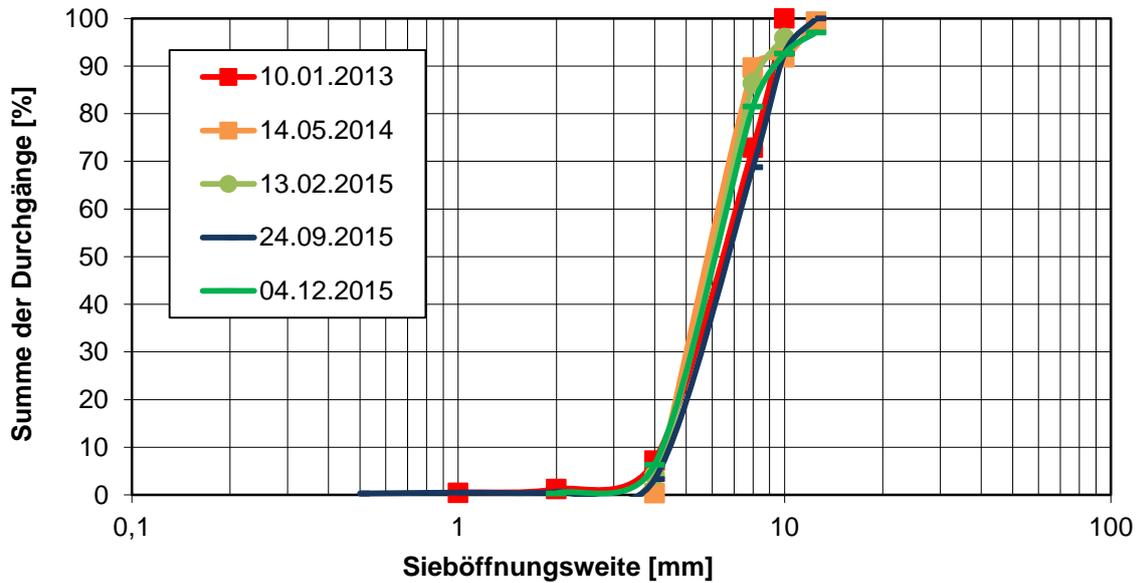


Abbildung 17: Kornverteilungskurven des Korngemisches Überkorn über den Zeitraum 2013 - 2015 nach Transport

Das Feinsalz wird durch die Absiebung der für die Produktion von Band 8 verantwortlichen Brechphase gewonnen. Das entstehende Korngemisch wird unter Tage für den Bau von z. B. Wetterdämmen genutzt. Haupteinflussfaktoren auf die Kornverteilung sind petro-geologische und mineralogische Schwankungen. Abbildung 18 stellt die Siebkurven der genutzten Feinkornchargen dar. Das Datum der Siebanalysen ist der Legende zu entnehmen.

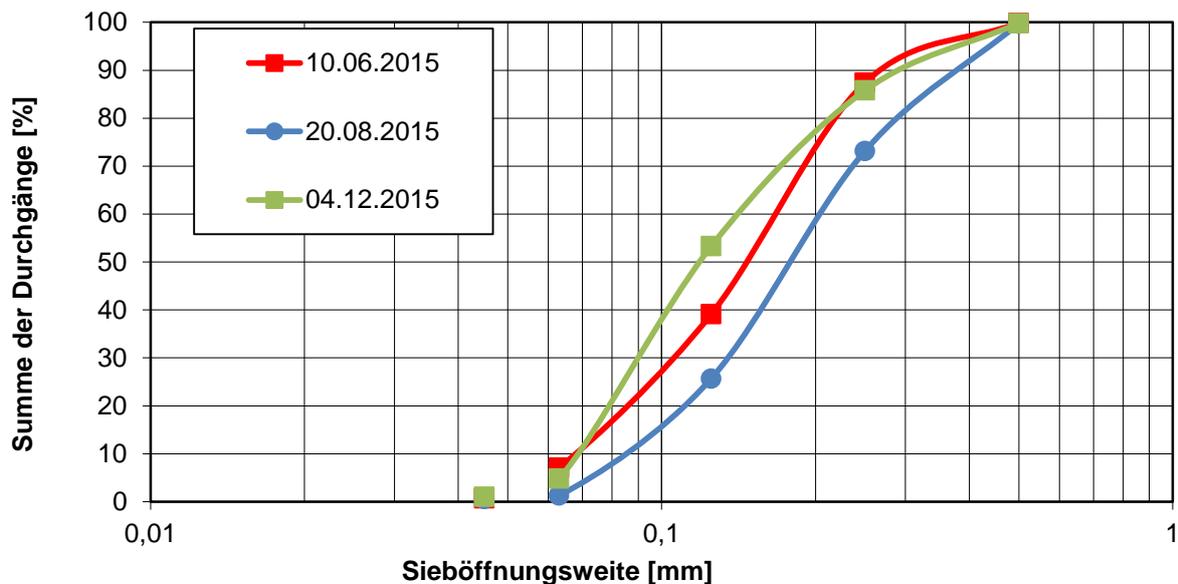


Abbildung 18: Kornverteilungskurven des Korngemisches Feinsalz über den Zeitraum 2013 - 2015 nach Transport

Aufgrund der in den Abbildungen 15 - 18 ersichtlichen Schwankungen, die auf die oben genannten physikalischen Gründe zurückzuführen sind, liegt eine Schwankung der Kornverteilungskurven der optimierten Salzgruskornmische vor. Aus den dargestellten Abbildungen ist zu erkennen, dass die Schwankungsbreite als gering definiert werden kann. Aus diesem Grund kann eine generelle Eignung der vorliegenden Kornmische bestätigt werden.

4.2.3.5 Vergleich optimierte Salzgruskornmische für das FuE-Vorhaben GESAV mit den Referenzsalzgrusen

Der Vergleich der Salzgruskörnungen erfolgt anhand der Kornverteilungskurve und den in Kapitel 4.1.1 durchgeführten Versuchen. In Abbildung 20 sind die Kornverteilungskurven der Kornmische gegeneinander aufgetragen, um einen direkten Vergleich durchzuführen.

In Tabelle 5 sind die Materialkennwerte für die optimierten GESAV-Sieblinien sowie des Referenzsalzgruses zum Vergleich aufgeführt.

Tabelle 5: Charakterisierung der optimierten Salzgruskornmische für GESAV nach Kapitel 5.2 im Vergleich zum Referenzsalzgrus

| Materialeigenschaft | Kornmisch 1 | Kornmisch 2 | Referenzsalzgrus | Einheit |
|---|-------------|-------------|------------------|-----------------------|
| Ungleichförmigkeitszahl C_u | 7 | 10 | 10,5 | [-] |
| Krümmungszahl C_c | 1 | 0,5 | 1,5 | [-] |
| Schüttwinkel | 28,6 | 33,3 | 29,6 | [°] |
| Lockerste Lagerung | 1,36 | 1,30 | 1,36 | [g/cm ³] |
| Dichteste Lagerung | 1,68 | 1,66 | 1,70 | [g/cm ³] |
| Verdichtungsenergie bis zur dichtesten Lagerung | 0,74 | 0,29 | 0,88 | [MNm/m ³] |

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Materialparameter der entwickelten Salzgruskornmische für das Forschungsvorhaben GESAV mit denen des Referenzsalzgruses vergleichbar sind. Vor allem eine Feinsalzzugabe bewirkt eine Optimierung des Kornmisches hinsichtlich der Verdichtbarkeit und des Schüttwinkels. Dies hat einen positiven Einfluss auf das Einbauverhalten des Salzgruskornmisches.

Im Vergleich zum Referenzsalzgrus weisen die Kornmische 1 und 2 eine vergleichbare bzw. geringere lockerste und dichteste Lagerung auf. Dies kann mit den fehlenden Korngrößen innerhalb der speziell hergestellten Kornverteilungen

erklärt werden. Die Unterschiede in der dichtesten Lagerung können mit maximal $0,04 \text{ g/cm}^3$ als gering beschrieben werden.

Wie zu erwarten ist, weisen die Korngemische in Abhängigkeit vom Feinkornanteil sowie der Ähnlichkeit zur Fuller-Kurve eine unterschiedliche Verdichtbarkeit auf. Das Korngemisch 2 benötigt die geringste Verdichtungsenergie mit $0,29 \text{ MNm/m}^3$, um die dichteste Lagerung zu erreichen. Dies ist mit der hohen Ähnlichkeit zur Fullerkurve sowie dem Feinkorngehalt zu erklären. Dabei ist zu bemerken, dass die dichteste Lagerung des Korngemisches 2 die geringste der untersuchten Korngemische ist. Das Korngemisch 1 benötigt eine Verdichtungsenergie von $0,74 \text{ MNm/m}^3$, um die dichteste Lagerung zu erreichen. Dies ist mit der höheren dichtesten Lagerung sowie der höheren Abweichung von der Fuller-Kurve zu erklären. Der geringe Feinkorngehalt der Kornverteilung im Vergleich zu den anderen geprüften Korngemischen sowie das Erreichen der höheren Lagerungsdichte wirken sich auf die Verdichtungsenergie aus. Die höchste Verdichtungsenergie zum Erreichen der dichtesten Lagerung wird von dem untersuchten Referenzsalzgrus benötigt.

Als Fazit der Entwicklung von geeigneten Salzgruskorngemischen wurde festgestellt, dass die entwickelten Korngemische 1 und 2 für die Zielstellungen geeignet sind. Der Vergleich mit dem Referenzsalzgrus zeigt, dass die entwickelten Korngemische über Vorteile gegenüber herkömmlichen Salzgrusmaterialien verfügen. Dies sind besonders die signifikant geringere Verdichtungsenergie sowie der geringfügig höhere Schüttwinkel. Dabei zeigt sich insbesondere beim Vergleich des Korngemisches 1 mit dem Korngemisch 2 der Einfluss der Feinsalzzugabe. Vor allem das Korngemisch 2 verfügt über vorteilhafte Materialeigenschaften aufgrund der im Vergleich geringeren Verdichtungsenergien und vergleichbaren Lagerungsdichten. Die Materialeigenschaften im Einbauzustand der optimierten Salzgruskorngemische sind mit denen des Referenzsalzgruses vergleichbar bzw. vorteilhafter für die Zielstellungen des Forschungsvorhabens.

4.3 Mischbarkeit eines auf CaSO_4 - bzw. MgO -basierenden Bindemittelsystems mit dem optimierten Salzgrusversatz

4.3.1 Grundlagen der rheometrischen Materialuntersuchungen

Um isotrope Versatzeigenschaften zu generieren, müssen eine homogene Mischung des Salzbinders mit dem Salzgrus sowie eine vollständige Benetzung aller Salzgrusoberflächen erfolgen. Die wird durch die Untersuchung der Mischbarkeit von möglichen Bindemitteln mit einem Salzgruskorngemisch festgestellt.

Zur Bewertung der Mischbarkeit von Salzgruskorngemischen mit einer Bindemittelphase sind vor allem die rheologischen Eigenschaften der flüssigen Phase in Kontakt mit der zu benetzenden Feststoffphasen von Bedeutung. Beim Mischprozess wird eine Salzkörnung mit einem Bindemittel benetzt. Die Benetzung eines Schüttgutes wie z.B. Salzgrus kann als Benetzung eines porösen Feststoffes charakterisiert werden.

Beim Benetzen wird zwischen dem Eindringen der Flüssigkeit in den porösen Feststoff und dem Ausbreiten (Spreiten) der Flüssigkeit auf der Feststoffoberfläche unterschieden. Das Eindringen einer Flüssigkeit in ein poröses Medium kann mathematisch von der Washburn-Gleichung beschrieben werden (Formel 6) [Pal00]

$$t = (2 \cdot V \cdot l \cdot \eta) / (\pi \cdot r^3 \cdot \gamma \cdot \cos \Theta) \quad (6)$$

- t = benötigte Zeit zur Benetzung der Oberflächen [s]
- V = das im Pulver transportierte Flüssigkeitsvolumen [m^3]
- L = Eindringtiefe [m]
- η = dynamische Viskosität der Flüssigkeit [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]
- r = Radius der Kapillare [m]
- γ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]
- Θ = Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit, Feststoff und Luft [$^\circ$]

Aus der Washburn-Gleichung ist der Einfluss der dynamischen Viskosität (im Weiteren als Viskosität bezeichnet) auf das Eindringvermögen eines Fluids in einen porösen Feststoff zu erkennen. Die Viskosität ist eine Materialkonstante, die den Zustand der inneren Reibung eines Stoffes beschreibt. Um ein Verhalten der Bindemittelsuspension hinsichtlich einer Mischbarkeit mit einem Schüttgut zu beurteilen, muss dementsprechend die Viskosität als Einflussgröße herangezogen werden. Wie aus der Washburn-Gleichung zu entnehmen ist, steigt mit zunehmender Viskosität auch die notwendige Zeit, die zur vollständigen Benetzung der Oberfläche benötigt wird. Bei einem Bindemittel, das eine starke Zunahme der Viskosität über

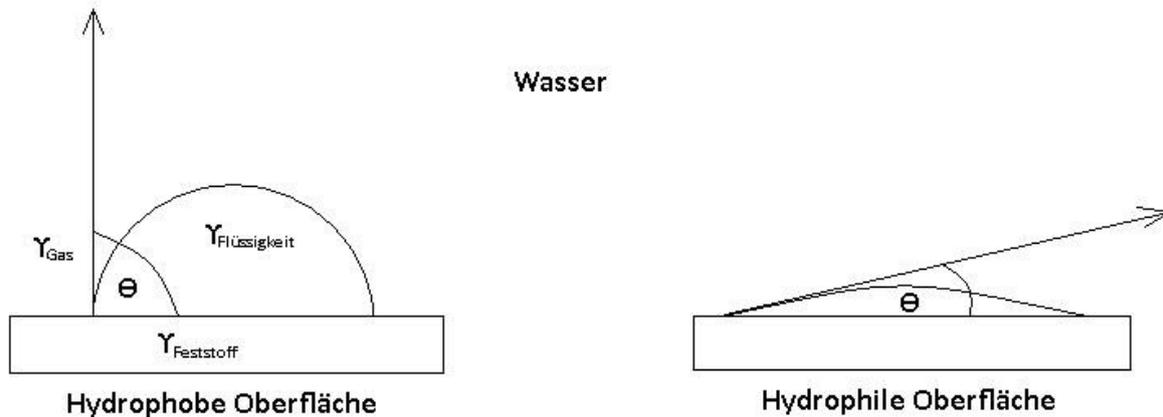


Abbildung 19: Prinzip der Kontaktwinkelmessung [Bun11]

die Zeit besitzt, nimmt der benötigte Zeitraum zur Benetzung der Salzgrusoberfläche dementsprechend zu. Das Ausbreiten (Spreiten) einer Flüssigkeit auf einen Feststoffkörper wird vom Kontaktwinkel beschrieben. Dabei wird ein Tropfen der entsprechenden Flüssigkeit auf die Feststoffoberfläche gegeben und der sich ausbildende Winkel an den Phasengrenzen zwischen Flüssigkeit, Luft und Feststoff gemessen. Der sich ausbildende Kontaktwinkel ist abhängig von den Grenzflächenspannungen zwischen den genannten Phasen. [Bun11]

Für eine optimale Oberflächenbenetzung sollte der Kontaktwinkel einen geringen Wertebereich annehmen ($< 90^\circ$). Bewertet wird der Kontaktwinkel nach folgendem Maßstab [Tec]:

- $\theta \sim 20^\circ$ = hydrophil, vollständig benetzbar
- $\theta \sim 90^\circ$ = hydrophob, schlecht benetzbar
- $\theta \sim 135^\circ$ = superhydrophob, nicht benetzbar

Problematisch ist hierbei die Herstellung einer repräsentativen Salzoberfläche. Es muss eine vollständig ungestörte, geschliffene und polierte Salzoberfläche aus einem vergleichbaren Referenzsalz verwendet werden. Darüber hinaus ist, aufgrund des hygroskopischen Verhaltens von Salz, die geschliffene Oberfläche von der Luftfeuchtigkeit zu isolieren. Nach der Herstellung der Salzoberfläche muss eine Möglichkeit zum Auftragen eines sehr geringen Bindemittelvolumens entwickelt werden, was bei Bindemitteln höherer Viskosität zu Problemen führen kann.

Bei der Ermittlung der dynamischen Viskosität und des Erstarrungsverhaltens wird in beiden Fällen das Messgerät MARS II des Herstellers Haake Mars verwendet. Das Messgerät ist in der Abbildung 20 dargestellt. [Haa]

Um die Vergleichbarkeit der Messwerte zu gewährleisten, werden die Messungen bei vergleichbaren Umgebungsparametern durchgeführt. Dies sind:

- Vergleichstemperatur der Proben während der Messung 28 °C
- Anwendung der Platte-Platte-Messeinrichtung PP20s
- Plattenabstand 0,5 mm
- Nutzung des Rotationsverfahrens
- Umdrehungszahl 104,7 min⁻¹

Die Messeinrichtung Platte-Platte besteht aus zwei Platten mit einem vorgegebenen Abstand. Bei diesen Versuchsdurchführungen beträgt der Plattenabstand 0,5 mm. Zwischen den Platten befindet sich das Messmedium. Die obere Platte wird in Bewegung gesetzt und durch den Widerstand des Messmediums auf die Plattenbewegung kann auf die Viskosität bzw. auf das Erstarrungsverhalten geschlossen werden.

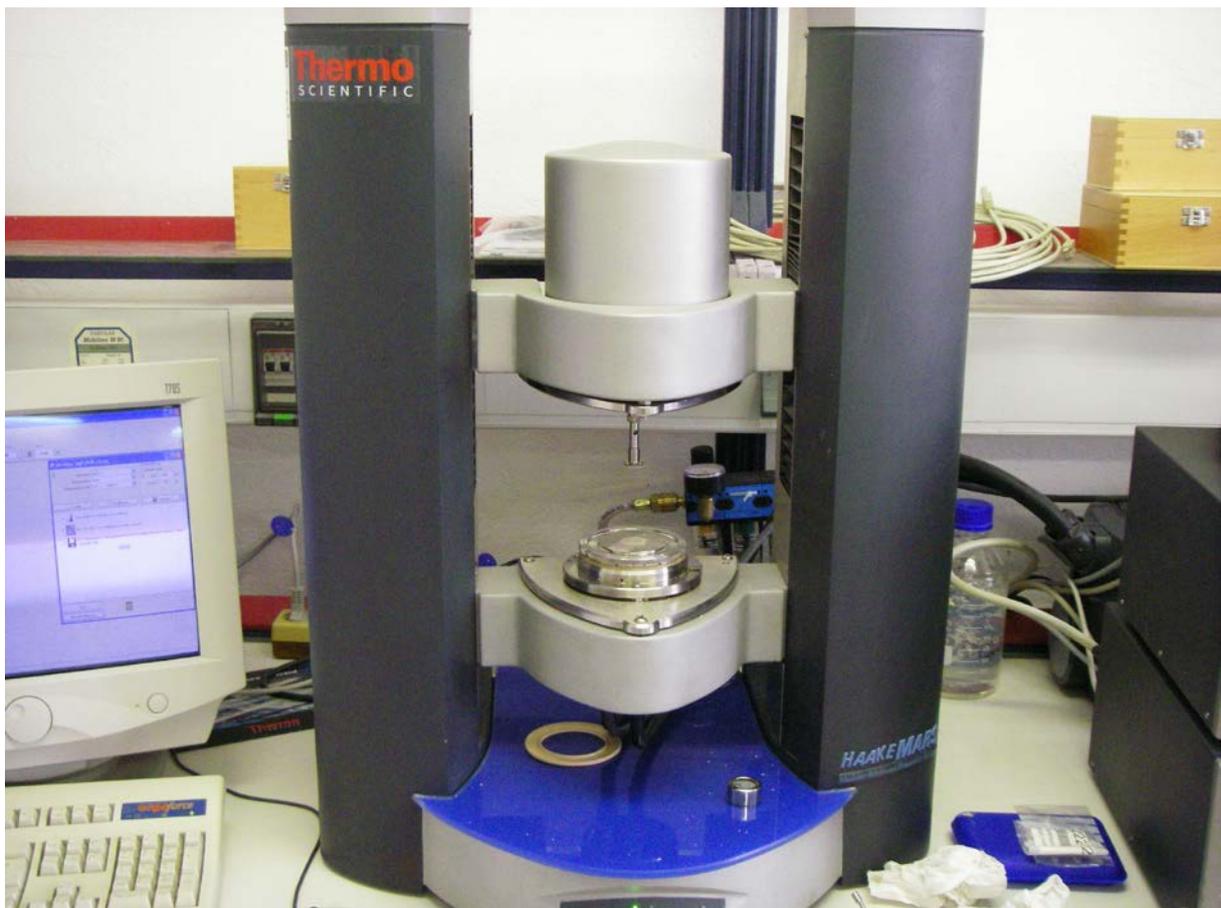


Abbildung 20: Rheometer „HAARKE MARS II“

Zur Verfügung standen die Messeinrichtungen PP20s und PP60t. Es wurde sich für die Verwendung der Messeinrichtung PP20s aufgrund der deutlich besseren

Messergebnisse bei hochviskosen Fluiden entschieden. Dieses wurde in Vorversuchen ermittelt. Die dynamische Viskosität der Anmachlösungen wurde mit der Messeinrichtung PP60t ermittelt.

Die Messung der Viskosität erfolgt mit dem Rotationsverfahren, bei dem die obere Platte eine definierte und konstante Umdrehungszahl besitzt. Die Viskosität berechnet sich aus der Schubspannung dividiert durch das Geschwindigkeitsgefälle. Die Schubspannung t ist proportional dem Drehmoment M_d und dem Schubfaktor A (Formel 7). [Haa]

$$T = A \cdot M_d \quad (7)$$

T = Schubspannung

A = Schubfaktor

$$A = 2 / (\pi \cdot R^3)$$

R = Plattenradius [mm]

M_d = Drehmoment [Nm]

Das Geschwindigkeitsgefälle y ist proportional der Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehzahl und dem Scherfaktor M (Formel 8). [Haa]

$$y = M \cdot \Omega \quad (8)$$

y = Geschwindigkeitsgefälle

M = Scherfaktor

$$M = R / h$$

R = Plattenradius [mm]

H = eingestellter Plattenabstand [mm]

Ω = Winkelgeschwindigkeit

Infolge der permanenten Zerstörung der inneren Struktur entsteht bei der Aushärtung des Bindemittels eine Scherfläche. Die Ausbildung einer Scherfläche hat einen messbaren Einfluss auf das Materialverhalten. Dieser Einfluss überlagert im späteren Messverlauf die Messergebnisse, sodass die Viskositätsmessung nur bis zu einem bestimmten Wert ausgewertet werden kann.

Zur Ermittlung des Kontaktwinkels wird ein im Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik der TU Bergakademie Freiberg vorhandenes Kontaktwinkelmessgerät genutzt. Das Kontaktwinkelmessgerät besteht aus einem Aufnahmegerät, einer Lichtquelle, einer Einspannvorrichtung für die zu

benetzende Oberfläche sowie einer Apparatur zur Datenaufnahme und -verarbeitung. Gemessen wird eine Suspension mit 10 min Ruhezeit.

In Abbildung 21 ist das verwendete Kontaktwinkelmessgerät G20 der Firma Krüss GmbH abgebildet.



Abbildung 21: Kontaktwinkelmessgerät (TU Bergakademie Freiberg, Institut für mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik)

4.3.2 Mögliche $MgSO_4$ -basierte Bindemittel

4.3.2.1 Grundlagen von MgO -basierenden Bindemittelsystemen

Der Begriff Magnesiumoxidbaustoff beschreibt Baustoffrezepturen, die auf basischen Magnesiumsalzhydraten im System $Mg(OH)_2$ - $MgCl_2$ - H_2O basieren. Diese Reaktion zeichnet sich durch einen Festigkeitszuwachs aus und ist bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Die Bezeichnung Sorelbaustoff stammt vom Ihrem Entdecker S. Sorel ab. [Fre14]

Dabei werden je nach Umgebungsbedingungen unterschiedliche Phasen gebildet, die sogenannten Sorel-Phasen ($x\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot y\text{MgCl}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$). In dem Forschungsvorhaben „Zusammenhang von Chemismus und mechanischen Eigenschaften des MgO-Baustoffs“ (FKZ 02E10880) wurden die Einflüsse auf die Phasenbildung untersucht. Die für die Verwendung als Baustoff im System Endlager wichtigsten Phasen sind demnach die sogenannte 3:1:8-Phase und die 5:1:8-Phase.



Die oben genannten Bindemittelphasen werden durch folgende Einflussfaktoren eingestellt [Fre14]:

- MgO-Qualität und MgO-Reaktivität
- Verhältnis MgO zur Anmachlösung
- MgCl_2 -Konzentration der Anmachlösung

Die Sorelphase 5:1:8 verfügt im Vergleich zur 3:1:8-Phase über eine höhere Festigkeit und härtet schneller aus. Allerdings ist die 5:1:8-Phase bei Zutritt von MgCl_2 -Lösung als metastabil zu bezeichnen. Die Eignung für die Verwendung als Baustoffkomponente in einem Endlager ist daher noch zu klären.

Die 3:1:8-Phase verfügt über einen höheren Flüssigkeitsgehalt aufgrund der Rezeptur. Dies bedingt im Vergleich zur 5:1:8-Phase eine geringere Festigkeit und langsames Erstarrungsverhalten. Die ausgebildete 3:1:8-Phase weist allerdings ein langzeitstabiles Materialverhalten auf. Aus diesem Grund ist die 3:1:8-Phase als Baustoffkomponente für ein Endlagersystem geeignet. Die Rezeptur der 3:1:8-Phase ist 100 g MgO auf 234,24 g einer 5 molalen MgCl_2 -Lösung eingestellt.

4.3.2.2 Auswahl der zu verwendenden MgO-Phase für eine Gefügestabilisierung

Wie bereits in Kapitel 4.2.1.1 beschrieben stellt die 3:1:8-Phase eine langzeitbeständige Sorelphase dar. Als gefügestabilisierende Komponente eines Versatzmaterials für HAW-Endlager wurde aus diesem Grund die 3:1:8-Phase verwendet. Darüber hinaus wurde sich für die Verwendung der 3:1:8-Phase aufgrund der deutlich geringeren Viskosität als im Vergleich zur 5:1:8-Phase entschieden. Da eine minimale Zugabe von Flüssigkeit in das Salzgrusmaterial erfolgen soll, muss die

Mischbarkeit technisch realisierbar bleiben. Eine hohe Viskosität hat negative Einflüsse auf die Mischbarkeit eines Korngemisches mit einer Flüssigkeit.

Die Analyse der Viskosität wurde am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Verwendet wurde das Rheometer des Typs HAAKE MARS II der Firma Thermo Fisher Scientific, mit einer Platte – Platte – Anordnung. Verwendet wurde das MgO vom Hersteller Styromag.

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 22 dargestellt. Dabei wurde auch die Entwicklung der Viskosität ermittelt und die erstellten Suspensionen nach 10 min und nach 1 h untersucht. Es konnten die bereits in der Literatur beschriebenen Unterschiede der Sorelphasen bezüglich der Viskosität und des Erstarrungsverhaltens zueinander nachgewiesen werden. Die entsprechenden rheologischen Ergebnisse können mit den Ergebnissen aus der Literatur bestätigt werden, die in vergleichbaren Wertebereichen liegen [Fre14]. Unterschiede können auf das verwendete MgO zurückgeführt werden.

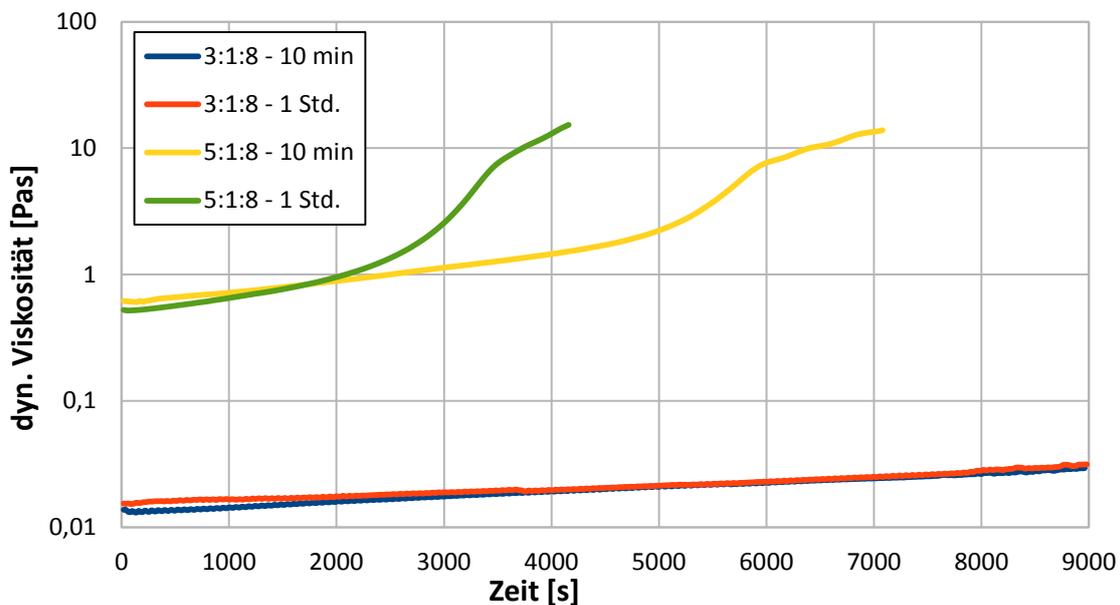


Abbildung 22: Ergebnisse der rheometrischen Materialuntersuchungen der Sorelphase 5:1:8 und 3:1:8

Aufgrund des hohen Flüssigkeitsgehaltes der 3:1:8-Rezeptur, kann es aufgrund von gravitativ bedingten Sedimentationserscheinungen des MgO-Feststoffes in der Lösung zu einer Verschiebung der gebildeten Sorelphase von der 3:1:8 hin zur 5:1:8 kommen. Dieses hätte negative Auswirkungen auf die Langzeitbeständigkeit und ist zu vermeiden.

Eine Generierung von Polyhalit kann mit diesen MgO-basierten Bindemitteln nicht erreicht werden. Die Stabilisierung basiert ausschließlich auf der Bildung von Magnesiumsalzhydraten.

Ein Vergleich der Bindemittelphasen ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Überblick über die Kennwerte der MgO-Bindemittelsysteme (28 °C)

| Kennwert | 5:1:8-Phase (10 min) | 5:1:8-Phase (1 Std.) | 3:1:8-Phase (10 min) | 3:1:8-Phase (1 Std.) |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Anfangsviskosität [mPas]: | 61,8 | 52,0 | 1,37 | 1,54 |
| Zeit bis Viskosität auf 10 Pas gestiegen ist [h]: | 1,78 | 1,06 | n.e. | n.e. |
| Erstarrungszeitraum [h]: | > 8,5 | 5,56 | n.e. | n.e. |
| Kontaktwinkel [°] | 70,58 +/- 6,0 | n.e. | 61,13 +/- 3,15 | n.e. |

(n.e. = nicht ermittelt)

Aus Tabelle 6 lässt sich erkennen, dass die 5:1:8-Phase über eine signifikant beschleunigte Zunahme der dynamischen Viskosität sowie über einen höheren Kontaktwinkel verfügt. Dieses ist mit dem höheren Feststoffanteil in Lösung zu begründen. Die 3:1:8-Phase zeigt eine zeitlich verzögerte Festigkeitszunahme. Darüber hinaus einen geringeren Kontaktwinkel. Dieses begünstigt eine homogene Benetzung aller Kornoberflächen.

4.3.2.3 Benetzbarkeit des für GESAV optimierten Salzgruskorngemisches mit einem MgO-basierten Bindemittel

Zur Gefügestabilisierung von Salzgrus mittels MgO-basierten Bindemitteln wurde sich für die Verwendung der Sorelphase 3:1:8 aufgrund der in Kapitel 4.2.1.1 und 4.2.1.2 dargestellten Vorteile sowie Materialverhalten entschieden. Verwendet wurde das für GESAV optimierte Salzgruskorngemisch. Es wurde untersucht, ob

gefügestabilisierte Probenkörper mit der optimierten Salzgruskörnung und dem MgO-Binder hergestellt werden können ohne Sedimentationserscheinungen.

Es wurden Probenkörper mit 10, 15, 20 und 30 Masse-% des MgO-basierenden Bindemittels hergestellt. In der Abbildung 23 sind die entsprechenden Probenkörper zu erkennen.

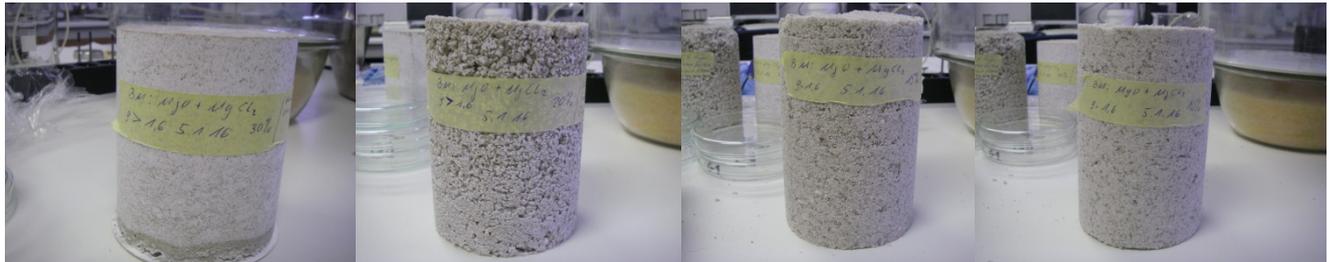


Abbildung 23: Salzgrusprobenkörper mit unterschiedlichen MgO-Bindemittelzugaben d3:1:8-Rezeptur (von links nach rechts: 30, 20, 15 und 10 [Masse-%])

Es konnten folgende Erkenntnisse aus der Betrachtung der Probenkörper entnommen werden:

- Bindemittel weist eine ausreichend geringe Viskosität für die Erstellung eines homogenen Salzgrus-Bindemittel-Gemisches auf,
- Mit allen getesteten Bindemittelanteilen konnten stabile Probenkörper hergestellt werden,
- Sedimentationserscheinungen konnten in den Probenkörper 10 – 30 Masse-% erkannt werden,
- Probenkörper mit 10 Massen-% wies ein schwach stabilisiertes Korngefüge auf und es kam zum leichten Abrieb von Salzgrus an der Probenoberfläche.

Als Ergebnis kann gesagt werden, dass die hinzugegebene Flüssigkeitsmenge in allen Probenkörpern zu einer Sedimentation des Feinkorns über den Erstarrungszeitraum führte. Dieses kann bei der Betrachtung der Probenkörper erkannt werden. Es konnte nicht sichergestellt werden, dass in den Versatzkörpern eine homogene Kornverteilung erhalten bleibt. Dieses kann zu unterschiedlichen Materialeigenschaften in den Probenkörperhöhen führen. Darüber hinaus ist bei der Probe mit dem geringsten MgO-Bindemittelgehalt die Festigkeit nicht ausreichend hoch, um die äußere Kontur zu stabilisieren. Es konnte ein deutlicher Abrieb an Salzgrus, vor allem bei den Korngrößen < 1,0 mm erkannt werden.

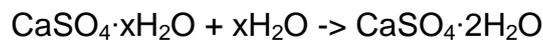
Probekörper ab 15 Massen-% MgO-Gehalt weisen eine ausreichende Festigkeit auf. Aufgrund der Sedimentation steht der Nachweis der 3:1:8-Phasenbildung aus.

Darüber hinaus ist der in dem Versatzmaterial vorhandene Flüssigkeitsgehalt als hoch zu bezeichnen.

4.3.3 Mögliche CaSO₄-basierte Bindemittel

4.3.3.1 Grundlage von CaSO₄-basierten Baustoffen

Als Calciumsulfat-basierte Bindemittel werden Bindemittel definiert, die auf der Hydratation von Calciumsulfaten im System CaSO₄-H₂O basieren. Für die Baustoffe gilt die allgemeine Reaktionsgleichung:



Das verwendete Calciumsulfat tritt in unterschiedlichen Modifikationen auf, die sich in ihrem Kristallwassergehalt sowie Struktur unterscheiden. Zur Auswahl standen die Calciumsulfatmodifikationen:

- Anhydrit I und II (CaSO₄)
- α- und β-Calciumsulfathalhydrat (CaSO₄·0,5H₂O)

Das Materialverhalten im System CaSO₄-MgCl₂-H₂O unterscheidet sich deutlich von dem System CaSO₄-H₂O. Die Anforderungen an das Material resultieren aus den Vorhabenszielen. Aufgrund der forcierten Salzmineralneubildung mit dem Schwerpunkt Polyhalit, ist eine Calciumsulfatkomponente zu verwenden, die eine ausreichende Benetzbarkeit des optimierten Salzgrusmaterials erlaubt sowie die Bildung des Polyhalits ermöglicht.

4.3.3.2 Auswahl geeigneter Calciumsulfate für das FuE-Vorhaben GESAV

Das verfügbare Calciumsulfatmaterial wurde von dem Unternehmen Knauf Gips KG freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Die Materialien stellen eine große Auswahl an dem auf dem Markt verfügbaren Calciumsulfat dar.

Zur Verfügung standen unterschiedliche alpha- und beta-Halhydrate, Anhydrite sowie ein Hochofengips. Die exakte Aufschlüsselung der vorhandenen Calciumsulfate ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Liste aller untersuchten Calciumsulfatphasen (HH = Halbhydratphase)

| CaSO ₄ -Phasen | Phasenbestand | | spezifische Oberfläche BET [m ² /g] |
|---------------------------|---------------|---------------------------------------|---|
| | Raman | XRD | |
| α-Gips A | HH | HH | 0,71 |
| α-Gips B | HH | HH (Quarz, Calcit, Anhydrit II) | 1,53 |
| α-Gips C | HH | HH (Calcit, Anhydrit II) | 0,52 |
| β-Gips D | HH | HH (Anhydrit III/II) | 8,52 |
| β-Gips E | HH | HH (Quarz, Calcit, Anhydrit III / II) | 11,02 |
| β-Gips F | HH | HH (Quarz, Calcit, Anhydrit III / II) | 6,85 |
| β-Gips G | HH | HH (Quarz, Calcit, ?) | 8,5 |
| β-Gips H | HH | HH (Calcit, Anhydrit III / II) | 6,85 |
| β-Gips I | HH, ? | HH (?, Anhydrit III / II) | 9,5 |
| Anhydrit L | Anhydrit II | Anhydrit II | 1,76 |
| Anhydrit K | Anhydrit II | Anhydrit II | 1,76 |
| Hochofengips | Anhydrit II | Anh II, Anhy III, HH, (Quarz) | 8,73 |

Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Verwendung von Calciumsulfathalbhydratphasen. Dies ist mit der zu erreichenden Festigkeit nach dem Anmischen zu erklären sowie mit der höheren Reaktivität.



Abbildung 24: Im Forschungsvorhaben verwendete Calciumskomponente

Als Halbhydratkomponenten sind sowohl α- als auch β-Halbhydrate (CaSO₄·0,5H₂O) geeignet. Calciumsulfathalbhydrate kommen in natürlicher Form als Mineral Bassanit vor oder werden künstlich durch die Dehydratation des Calciumsulfatdihydrats (CaSO₄·2H₂O) hergestellt. Die α- und β-Halbhydrate unterscheiden sich durch ihre kristalline Form. Das α-Halbhydrat bildet kompakte, große, idiomorphe,

hexagonale bzw. pseudo-hexagonale Kristalle aus, während das β-Halbhydrat kleine kryptokristalline Kristalle ausbildet, die sowohl flockig in Konglomeraten als auch als

einzelne Kristalle vorliegen können. Aufgrund der unterschiedlichen Kristallform und der daraus resultierenden unterschiedlichen spez. Oberfläche weisen die Halbhydratvariationen im System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ein unterschiedliches Materialverhalten auf. Im System $\text{CaSO}_4\text{-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ treten keine Unterschiede hinsichtlich der Reaktivität auf. Halbhydrate sind Bestandteile vieler CaSO_4 -basierender Baustoffe und ein auf dem Markt verfügbares Massenprodukt. Das verwendete Calciumsulfathalhydrat (Abbildung 25) weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,62\text{ g/cm}^3$ auf. [Tes07] [Mül07] [Fre00]

Die in Tabelle 7 aufgeführten Halbhydratphasen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens mittels rheometrischen Untersuchungen hinsichtlich der dynamischen Viskosität nach Kapitel 4.2.1 untersucht.

In Abbildung 25 ist die ermittelte Abhängigkeit der Anfangsviskosität vom Lösungsgehalt dargestellt.

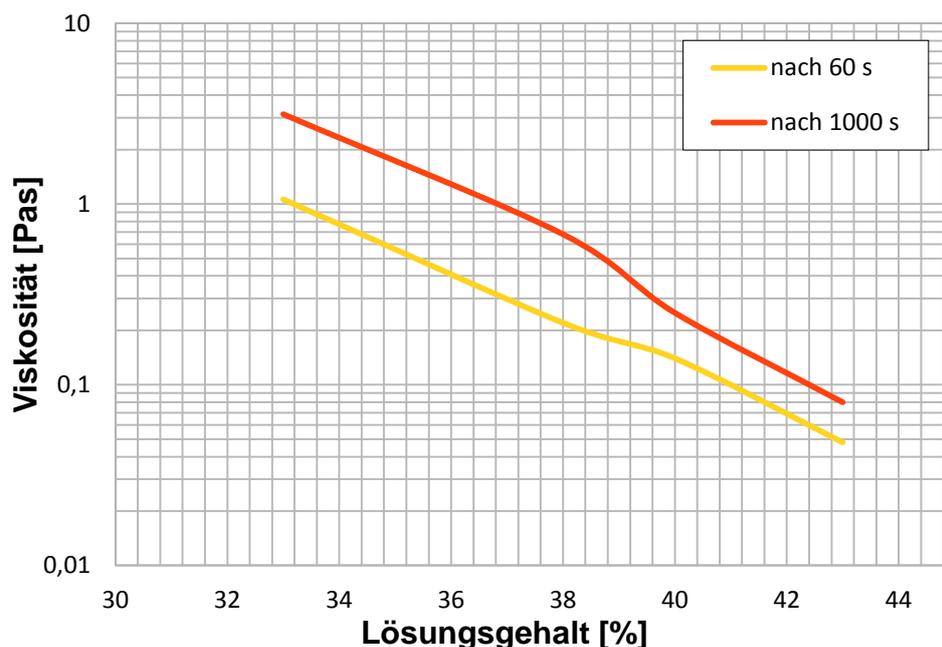


Abbildung 25: Entwicklung der dynamischen Viskosität des α -Halbhydrats

Beim α -Halbhydrat wurde beobachtet, dass ab $> 43\%$ Lösungsgehalt unmittelbar nach dem Rührvorgang eine Sedimentation eintritt. Bis 41% traten Sedimentationen über die Zeit auf. Die dyn. Viskositäten von Bindemittelsuspensionen mit Lösungsgehalten $< 33\%$ stiegen stark an, sodass diese für eine Mischung mit Salzgrus nicht infrage kommen. Geeignete Lösungsgehalten wurden zwischen $33 - 43\%$ ermittelt.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse wird festgestellt, dass die Lösungsgehalte der Bindemittelsuspension zwischen 33 % und 43 % liegen sollten. Bezogen auf den Mischvorgang weisen Lösungsgehalte $< 33 \%$ eine ungeeignet hohe Viskosität auf, während Gehalte $> 43 \%$ zur sofortigen Sedimentation neigen. Werden Lösungsgehalte zwischen 41 % und 43 % verwendet, sollten diese aufgrund der zeitabhängigen Sedimentation unmittelbar nach dem Ende des Rührvorgangs mit dem Salzgrus gemischt und eingebaut werden.

Der für das α -Halbhydrat ermittelte Kontaktwinkel auf Steinsalzoberflächen beträgt $25,54^\circ \pm 4,97^\circ$. Damit ist die Salzgrusoberfläche als vollständig mit dem Bindemittelsystem benetzbar zu bezeichnen. Nach 10 s betrug der Kontaktwinkel aufgrund des Spreitens $20,83^\circ \pm 6,22^\circ$.

Im Vergleich zum α -Halbhydrat, tritt beim β -Halbhydrat eine sofortige Sedimentation erst bei Lösungsgehalten von $> 56 \%$ auf. Für die Mischung mit Salzgrus ungeeignet hohe dyn. Viskositäten wurden bei Lösungsgehalten $< 45 \%$ festgestellt. Die Abbildung 26 verdeutlicht die festgestellten Eigenschaften des β -Halbhydrats.

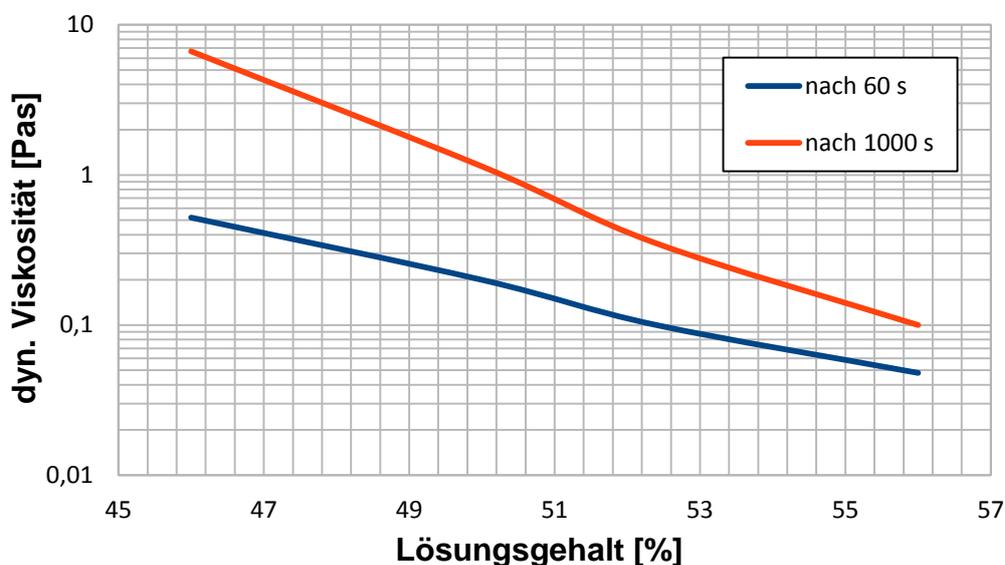


Abbildung 26: Entwicklung der dynamischen Viskosität des beta-Halbhydrats

Ab $< 52 \%$ Lösungsgehalt wurde keine über die Zeit ablaufende Sedimentation erkannt. Der optimale Lösungsgehalt beim β -Halbhydrat liegt zwischen 45 % und 56 %. Der ermittelte Kontaktwinkel für das β -Halbhydrat auf einer Steinsalzoberfläche beträgt $29,13^\circ \pm 3,54^\circ$. Dies liegt im Bereich der vollständigen Benetzbarkeit der Salzoberfläche mit dem Bindemittelsystem. Nach 10 s nahm der Kontaktwinkel einen Wert von $26,21^\circ \pm 2,39^\circ$ an.

4.3.4 Fazit der Mischbarkeitsuntersuchungen und Auswahl eines Bindemittelsystems

Die Ergebnisse der Mischungsversuche von auf MgO- und CaSO₄-basierten Bindemitteln mit einem Salzgruskornmisch zeigen, dass die verwendeten Bindemittelrezepturen für eine vollständige Benetzung von Salzgrusoberflächen geeignet sind.

Die auf MgO-basierten Bindemittel zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen den Phasen 3:1:8 und 5:1:8 bezüglich der Mischbarkeit. Die 5:1:8-Phase zeigt im Vergleich zur 3:1:8-Phase deutlich höhere dynamische Viskosität sowohl unmittelbar nach dem Anmischen als auch nach einem Zeitraum von einer Stunde. Für eine vollständige Benetzung aller Salzgrusoberflächen sowie für eine technisch einfache Anmischung vor Ort eignet sich aus diesem Grund die 3:1:8-Phase. Die 3:1:8-Phase ist darüber hinaus eine langzeitbeständige Mineralphase. Jedoch zeigt sich im Zuge der labortechnischen Materialuntersuchungen, dass die 3:1:8-Phase des MgO-Bindemittelsystems zu einer Sedimentation neigt. Ein „Ausbluten“ des Versatzmaterials unter Tage ist somit nicht vollständig auszuschließen. Darüber hinaus ist für eine ausreichende Gefügestabilisierung des Salzgruskornmisch eine Bindemittelmenge > 10 Masse-% erforderlich. Dies führt zu einem hohen Flüssigkeitsgehalt im Bindemittel und somit im Versatzmaterial.

Die Untersuchung des auf CaSO₄-basierten Bindemittels zeigt, dass eine homogene Mischbarkeit mit Salzgruskornmischungen sowohl durch ein alpha- als auch durch ein β -Halbhydrat erreicht werden können. Allerdings ist bei einer Verwendung von Calciumsulfathalhydrat und einer gesättigten NaCl-Lösung von einer Gipsbildung auszugehen. Dieses führt zu einer frühzeitigen Materialfestigkeit jedoch nicht zu einem langzeitbeständigen Materialverhalten.

Aus diesem Grund wurde sich entschlossen, aufbauend auf den CaSO₄-basierten Bindemittelsystemen eine Polyhalitbildung zu generieren. Dabei wirkt das untersuchte CaSO₄-basierte Bindemittel als grundlegendes System, das durch die Zugabe der weiterhin erforderlichen Komponenten für die Polyhalitbildung ergänzt wird.

5 AP2 – Möglichkeiten der Polyhalitbildung durch Anpassung der in AP1 untersuchten Rezepturansätze

5.1 Definition der notwendigen Ansätze $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+}$ und Ableitung von Basisrezepturen

5.1.1 Einstellung des für die Polyhalitbildung notwendigen Verhältnisses der Feststoffkomponenten $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+}$

Zur Polyhalitbildung ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$) müssen die im Polyhalit vorhandenen Elemente zur Verfügung stehen. Dies sind folgende Komponenten:

- Kaliumsulfat (K_2SO_4)
- Magnesiumsulfat ($MgSO_4$)
- Calciumsulfat ($CaSO_4$)
- Wasser (H_2O)

Die Polyhalitkomponenten werden von den Feststoffen des verwendeten Salzbinders zur Verfügung gestellt. Diese werden durch die flüssige Phase des Salzbinders gelöst, um anschließend durch Rekristallisationsprozesse gefügestabilisierende Salzmineralisationen zu bilden. Hierfür ist eine Auswahl geeigneter chemischer Komponenten erforderlich.

Die Feststoffphase des Salzbinders wird im weiteren Verlauf als *Polyhalittrockengemisch* bezeichnet, da eine Bildung des Polyhalits auf dem Verbrauch der in der Feststoffphase vorhandenen Komponenten basiert.



Abbildung 27: Kaliumsulfat des Salzbinders

Als Kaliumkomponente wird technisches Kaliumsulfat (K_2SO_4) verwendet. Technisch reines Kaliumsulfat wird aus unterschiedlichen kaliumhaltigen Mineralen gewonnen. Als Mineral kann Kaliumsulfat unter anderem als Arkanit in Steinsalzlagerstätten vorkommen. Kaliumsulfat wird vor allem in der Düngemittelproduktion, der Lebensmittelindustrie und chemischen Industrie verwendet. Das verwendete

Kaliumsulfat (Abbildung 27) weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$ auf.



Abbildung 28: Magnesiumsulfat-Monohydrat des Salzbinders

Als Magnesiumkomponente wird ein wasserhaltiges Magnesiumsulfat ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) verwendet. Dieses Magnesiumsulfat kommt in der Form von Kieserit in der Natur als Bestandteil von Kali- und Steinsalzlagerstätten vor und wird maßgeblich in der Düngemittelproduktion eingesetzt. Die Korndichte des Kieserits (Abbildung 28) liegt bei einem Wert von $\rho_s = 2,60 \text{ g/cm}^3$.

Die Bestandteile des Polyhalittrockengemisches werden anhand des stöchiometrischen Verhältnisses eingestellt. Tabelle 8 zeigt die Verhältnisse der Einzelkomponenten der Feststoffphase im Salzbinde zueinander.

Tabelle 8: Verhältnis der Feststoffkomponenten im Salzbinde zueinander zur Generierung des Polyhalits

| Salzbindekomponente | Anteil [Masse-%] |
|---|------------------|
| $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ | 48,15 |
| K_2SO_4 | 28,90 |
| $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 22,95 |
| Summe | 100,00 |

5.1.2 Charakterisierung des Einflusses der flüssigen Phasen für Lösungs- und Rekrystallisationsprozesse

Zur Initiierung von Lösungsprozessen der Ausgangskomponenten des Salzbinders und den anschließenden Rekrystallisationsprozessen von gefügestabilisierenden Salzmineralisationen, ist die Anwesenheit einer flüssigen Phase notwendig. Zur Anwendung kommen Lösungen, die eine Lösung des umliegenden Gebirges sowie des Salzgruskorngefüges unterbinden. Dies erfordert ein inertes Lösungsverhalten gegenüber Halit (NaCl).

Als geeignet werden folgende Lösungen erachtet:

- gesättigte NaCl -Lösung
- gesättigte MgCl_2 -Lösung

Die aufgeführten Lösungen wurden hinsichtlich der Eignung zur Generierung der langzeitbeständigen Salzmineralphase Polyhalit untersucht. Dies wurde am Institut

für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg anhand Analysen des Phasenbestands durchgeführt.

5.1.2.1 Untersuchtes Bindemittelsystem $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : gesättigte NaCl$ -Lösung

Zur Vermeidung von Lösungserscheinungen an der verwendeten Steinsalzgruskörnung sowie am umliegenden Gebirge, wurde die Verwendung einer gesättigten Steinsalzlösung untersucht. Darüber hinaus hat die Verwendung der gesättigten Steinsalzlösung einen unmittelbaren Festigkeitszuwachs zur Folge, der auf der Reaktion des in der Lösung vorhandenen Wassers mit dem Calciumsulfathalhydrat zum -dihydrat basiert.

Zur Untersuchung der Eignung der verwendeten Lösung wurde sich für die Analyse der gebildeten Mineralphasen entschieden. Diese wurden anhand röntgendiffraktometrischer Untersuchungen (P-XRD-Analyse) festgestellt. Ziel des Forschungsvorhabens GESAV ist die Ausbildung eines langzeitbeständigen Gefüges durch die Polyhalitbildung. Die P-XRD-Analysen wurden am Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

5.1.2.2 Untersuchtes Bindemittelsystem $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : MgCl_2$ -Lösung

Neben einer gesättigten NaCl-Lösung kann eine konzentrierte $MgCl_2$ -Lösung verwendet werden, um unkontrollierte Lösungserscheinungen zu unterbinden. Eine Bildung des Calciumsulfatdihydrats aus dem -halbhydrat durch das in der salinaren Lösung vorhandenen Wassers ist nicht zu erwarten. Die $MgCl_2$ -Lösung dient der Ermöglichung von Lösungsprozessen und Mineralneubildungsprozessen. Dabei wird die Mineralneubildung aufgrund der Magnesiumionen beeinflusst. Es ist zu erwarten, dass zur Mineralneubildung von magnesiumhaltigen Salzmineralisationen die Magnesiumchloridlösung ein vorteilhaftes Materialverhalten aufweist.

5.2 Phasen- und Gefügeentwicklung der untersuchten Bindemittelphasen

5.2.1 Grundlagen der P-XRD-Analyse

Das Messverfahren der Pulver-Röntgendiffraktometrie (P-XRD) basiert auf der Beugung von Röntgenstrahlung an kristallographischen Netzebenen kristalliner und teilkristalliner Stoffe und wird u.a. angewendet, um den Phasenbestand von

Probenmaterialien zu bestimmen. Die Materialanalyse erfolgt durch die Bestrahlung des Probenmaterials mittels Röntgenstrahlung aus unterschiedlichen Einfallswinkeln, da die Verteilung der Einzelkristalle in polykristallinen Proben im Idealfall statistisch regellos ist. An den Netzebenen der Kristallgitter der in der Probe enthaltenen kristallinen bzw. teilkristallinen Minerale führt die Beugung von Röntgenstrahlen zu sogenannten Beugungsmustern (Reflexen), wenn die Bragg'sche Gleichung (Formel 9) erfüllt ist. [Spi09]

$$n * \lambda = 2 * d * \sin(\theta) \quad (9)$$

n = ganzzahliger Gangunterschied der Wellenlänge (Reflexionsordnung)

λ = Wellenlänge der Röntgenstrahlung

d = Abstand zwischen parallelen Gitterebenen (Netzebenenabstand)

θ = Winkel zwischen der einfallenden Strahlung und der Gitterebene

Die Intensität der Reflexe wird in Abhängigkeit des doppelten Beugungswinkels 2-Theta (2θ) aufgetragen. Das daraus resultierende Diffraktogramm ermöglicht eine Aussage über die mineralogische Zusammensetzung des untersuchten Probenmaterials, da jeder kristalline Stoff ein substanzspezifisches Beugungs- bzw. Reflexmuster aufweist. [Spi09]

Ein Vergleich von Diffraktogrammen über die Zeit ermöglicht eine Interpretation der Änderung der mineralogischen Zusammensetzung des Probenmaterials. Aus diesem Grund werden zur Analyse der mineralogischen Zusammensetzung Probenkörper mit unterschiedlichem Probenalter vermessen und die Diffraktogramme miteinander verglichen.

Zur Analyse des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes wurde eine fein pulverisierte Probe hergestellt und mittels Pulver-Röntgendiffraktometrie (P-XRD) analysiert. Die röntgendiffraktometrischen Materialuntersuchungen wurden am Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg mit am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg hergestellten Probenkörpern durchgeführt. Verwendet wurde ein Röntgendiffraktometer D8 Discover der Fa. Bruker mit linearem Detektor Vantec-1.

Zur Analyse des zeitabhängigen Phasenbestands wurden die in Tabelle 9 aufgeführten Proben mit dem P-XRD analysiert.

Tabelle 9: Analyierte Probenkörper mit Angabe des Probenalters für die P-XRD-Analyse nach [Ins16]

| Lfd. Nr. | Probenbezeichnung | Herstellungsdatum | Analysedatum | Probenalter bei der Messung |
|----------|--|-------------------|--------------|-----------------------------|
| 1 | Salzbinder-Probe 1 | - | 29.03.2016 | - |
| 2 | Steinsalzgrus-Probe 1 | - | - | - |
| 3 | Gefügestabilisierter Salzgrus Probe 2 (Bindemittelsystem: $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : NaCl$ -Lösung) | 19.08.2013 | 27.08.2013 | 8 Tage |
| 4 | Polyhalittrockengemisch mit 30 Masse-% (PH-TrMi. + 30% 5 molale $MgCl_2$ -Lösung) | 16.07.2013 | 25.07.2013 | 9 Tage |
| | | | 30.08.2013 | 45 Tage |
| 5 | Gefügestabilisierter Salzgrus Probe 1 (Bindemittelsystem: $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : MgCl_2$ -Lösung) | 23.08.2013 | 03.09.2013 | 10 Tage |
| | | | 23.09.2013 | 31 Tage |
| | | | 12.11.2013 | 81 Tage |
| | | | 29.03.2016 | 2 Jahre, 5 Monate |

Zur Beschreibung der Ausgangssituation wurden zu Beginn die Ausgangsmaterialien des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes untersucht. Die Proben „Salzbinder-Probe 1“ und „Steinsalzgrus-Probe 1“ stellen die Ausgangskomponenten des Versatzmaterials dar. Anhand des Vergleichs der Diffraktogramme der Salzbinderproben zu unterschiedlichen Zeiträumen mit den Diffraktogrammen der Ausgangskomponenten kann eine Aussage zur Phasenentwicklung getroffen werden.

5.2.2 Grundlagen der Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Zur visuellen Bestimmung der Salzmineralneubildung und des Gefüges wurde die Rasterelektronenmikroskopie (REM) verwendet. REM ist ein bildgebendes Messverfahren, das auf dem Prinzip der Wechselwirkungen einer fokussierten Elektronenstrahlung mit dem zu untersuchenden Material basiert.

Bei der REM wird das zu untersuchende Material auf einen Probenträger aufgetragen und in eine Unterdruckzelle der Messapparatur eingebaut. Um eine elektrostatische Aufladung und somit einen negativen Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse zu vermeiden, kann das Probenmaterial durch leitfähige Stoffe bedampft werden (z. B. Gold und Kohlenstoff). Vor der Messung wird in der Zelle ein entsprechender Unterdruck erzeugt, um Wechselwirkungen des Elektronenstrahls mit Gasmolekülen zu vermeiden.

Die von der Messapparatur ausgesendete Elektronenstrahlung tritt mit den Atomen der Probenmasse in Wechselwirkung und entsprechende Messsignale werden von einem Detektor erfasst. Anhand dieser Messsignale wird eine visuelle Darstellung der Materialoberfläche erzeugt. Ein Vergleich der Gefügaufnahmen zu unterschiedlichen Probenaltern ermöglicht eine vergleichende Aussage zur Mineralbildung und Gefügestabilisierung.

Die REM-Analyse der Proben wurden am Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bergbau und Spezialtiefbau durchgeführt. Verwendet wurde die Versuchsapparatur VEGA II SBH der Firma TESCAN. Die Messung der Probenkörper erfolgte mit einer Beschleunigungsspannung von 10 kV.

Im Rahmen dieses Analyseverfahrens wurden Probenmaterialien mit folgender Zielstellung analysiert:

- Probenkörper jünger als 3 Tage nach der Herstellung: Feststellung der Textur und des Korngefüges unmittelbar nach der Herstellung des Versatzmaterials (Ausgangszustand).
- Probenkörper ca. 3 Monate nach Herstellung: Visuelle Analyse der Textur und des Gefüges nach der Ausbildung neuer Mineralphasen an der Oberfläche des Salzgrusgefüges (Zwischenphase).
- Probenkörper 32 Monate nach der Herstellung: Visuelle Analyse des langzeitstabilen Korngefüges und Mineralverteilung (Endzustand).

5.2.3 Analyse der Phasen- und Gefügeentwicklung der Bindemittelsysteme

5.2.3.1 Die Ausgangskomponenten

Abbildung 29 stellt einen repräsentativen Ausschnitt des Diffraktogramms der Ausgangskomponenten dar.

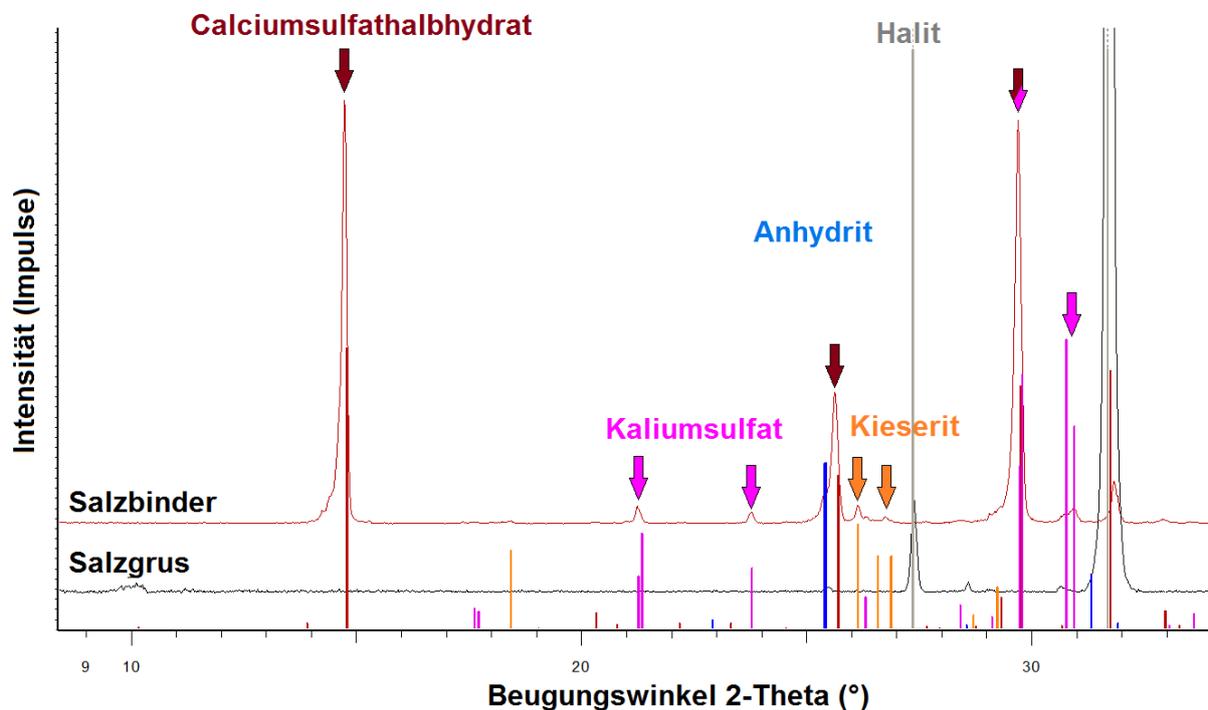


Abbildung 29: Repräsentativer Ausschnitt des Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) „Salzbinder-Probe 1“ und „Steinsalzgrus Probe1“

Anhand des Diffraktogramms konnten die Salzbinderkomponenten Calciumsulfathalhydrat, Kaliumsulfat und Kieserit nachgewiesen werden. Diese Reflexe dienen als Grundlage für den Vergleich der zeitlichen Änderung des Phasenbestands durch Lösungs- und Mineralneubildungsvorgänge in den folgenden P-XRD-Analysen.

Das Diffraktogramm der Ausgangsmaterialien bestätigte darüber hinaus eine hohe Reinheit der verwendeten Ausgangskomponenten. Der nachgewiesene Anhydrit ist ein natürlich auftretender Nebenbestandteil des Steinsalzgruses. Dies wird durch die Tabelle 3 bestätigt. Im weiteren Verlauf der Materialuntersuchungen wurde Anhydrit nicht weiter betrachtet.

Ein weiterführender Vergleich der Diffraktogramme der gefügestabilisierten Salzgrusproben mit dem Diffraktogramm des Steinsalzgruses wurde nicht erforderlich. Da innerhalb des Steinsalzgruses keine Mineralneubildungsvorgänge mit dem Halit erwartet wurden, ist eine Veränderung dieses Reflexes nicht zu erwarten. Aufgrund der stark ausgeprägten Halitreflexe, bei denen keine Änderungen erwartet wurden, konnten diese im oberen Bereich abgeschnitten werden, um die Reflexe der Salzbinderkomponenten hervorzuheben. Da Anhydrit thermodynamisch

geringe Triebkräfte zur Phasenneubildung aufweist, ist auch bei diesem eine Änderung im Betrachtungszeitraum ausgeschlossen worden.

5.2.3.2 Analyse des Bindemittelsystems $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+}$:gesättigte NaCl-Lösung

Abbildung 30 stellt die röntgendiffraktometrische Untersuchung des Bindemittelsystems $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+}$:gesättigte NaCl-Lösung nach acht Tagen dar.

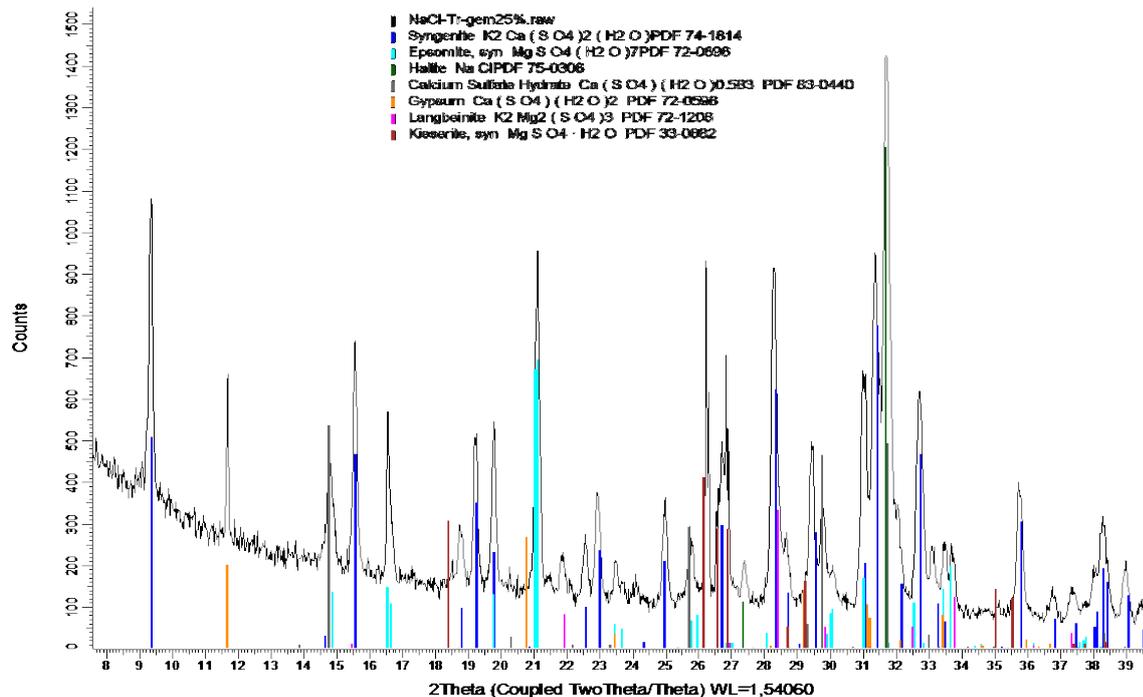


Abbildung 30: Repräsentativer Ausschnitt des Bindemittelsystems mit Natriumchloridlösung nach acht Tagen

Aus dem Diffraktogramm lässt sich erkennen, dass durch die Zugabe einer gesättigten NaCl-Lösung die Bildung des Dihydrats aus dem Calciumsulfathalhydrat stattgefunden hat. Darüber hinaus wurden die Mineralphasen Syngenit, Epsomit sowie Langbeinit gebildet. Eine Bildung von Polyhalit ist nicht zu erkennen. Über lange Zeiträume ist eine Bildung von Polyhalit zu erwarten.

5.2.3.3 Analyse des Bindemittelsystems $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : MgCl_2$ -Lösung

Abbildung 31 stellt die röntgendiffraktometrische Untersuchung des Bindemittelsystems $K^+ : Mg^{2+} : Ca^{2+} : MgCl_2$ -Lösung nach drei und nach 45 Tagen dar. Anhand des Diffraktogramms lässt sich erkennen, dass nach drei Tagen bereits eine

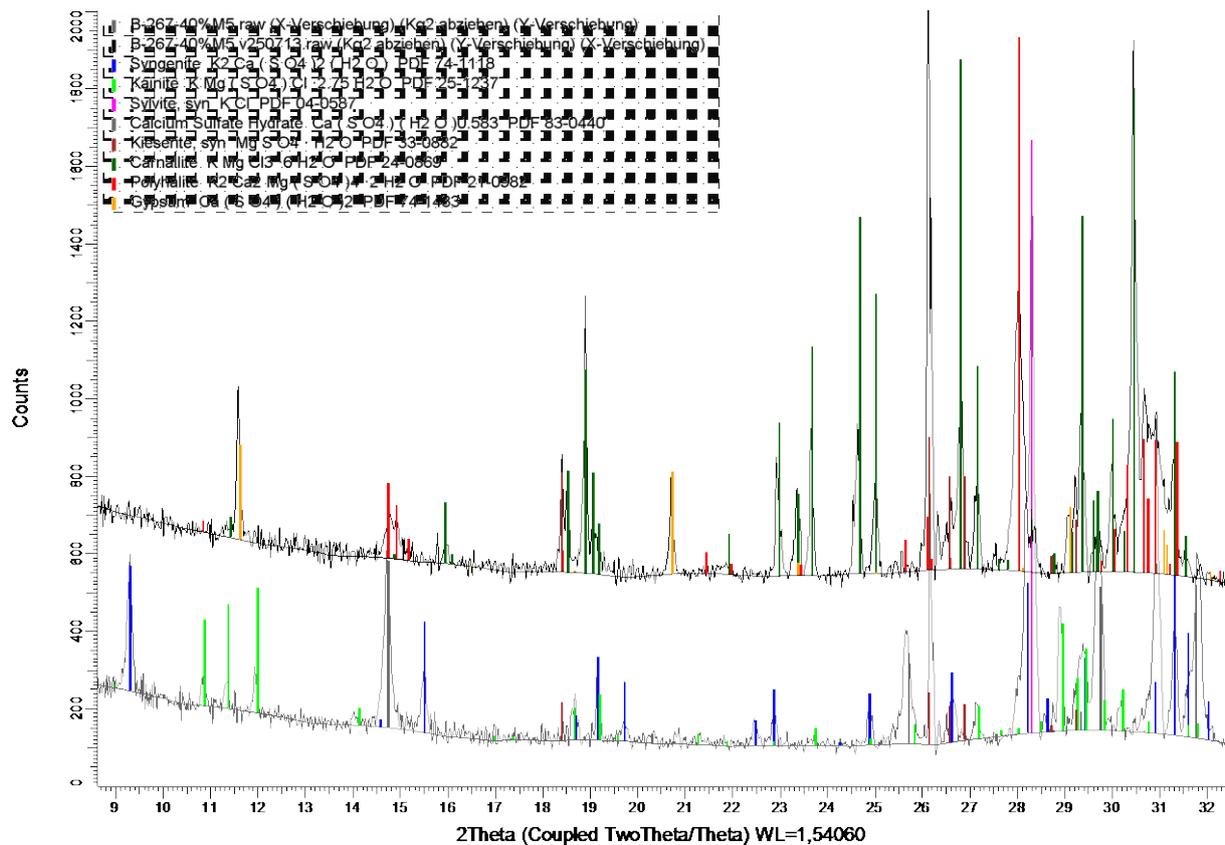


Abbildung 31: Repräsentativer Ausschnitt des Bindemittelsystems basierend auf Magnesiumchloridlösung

Bildung der Mineralphasen Syngenit und Kainit vorliegen. Eine Dihydratbildung aus dem Halbhydrat des Calciumsulfats heraus wie bei der NaCl-Lösungszugabe ist ebenfalls nachgewiesen worden. Nach 45 Tagen konnte eine deutliche Polyhalitbildung in dem Bindemittelsystem nachgewiesen werden.

5.2.4 Langzeitanalyse des Bindemittelsystems $K^+Mg^{2+}:Ca^{2+}:MgCl_2$ -Lösung mit einem optimierten Steinsalzgruskornmischung

5.2.4.1 Analyse eines 10 Tage alten Probenkörpers

Das Diffraktogramm in Abbildung 32 stellt die P-XRD-Analyse eines gefügestabilisierten Salzgruses nach $t = 10$ d dar. Anhand des Vergleichs der P-XRD-Analyse dieses Probenkörpers mit dem Diffraktogramm des Salzbinders wird ersichtlich, dass innerhalb dieses Zeitraums eine Änderung des Phasenbestands stattgefunden hat. Dies wird durch die neuen Reflexlagen im Vergleich zum Diffraktogramm des Ausgangsmaterials deutlich. Die neu entstandenen Salzminerale waren Syngenit ($K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$) und Kainit ($MgSO_4 \cdot KCl \cdot 2,75H_2O$).

Eine Abnahme der Reflexintensität der Ausgangskomponenten ist sowohl beim Kaliumsulfat, Kieserit und Calciumsulfathalbhydrat zu erkennen gewesen. Da zur Bildung der Salzminerale Syngenit und Kainit die im Salzbinder verwendeten Komponenten (Kalium, Calcium und Magnesium) benötigt wurden, haben die Intensitäten der spezifischen Reflexe der Ausgangskomponenten im Diffraktogramm (Abbildung 32) abgenommen. Vor allem die Intensitäten der Kaliumreflexe haben signifikant abgenommen, da Kalium in beide Salzmineralisationen (Syngenit und Kainit) eingebaut wird. Eine angestrebte Polyhalitbildung wurde zu diesem Zeitpunkt nicht nachgewiesen.

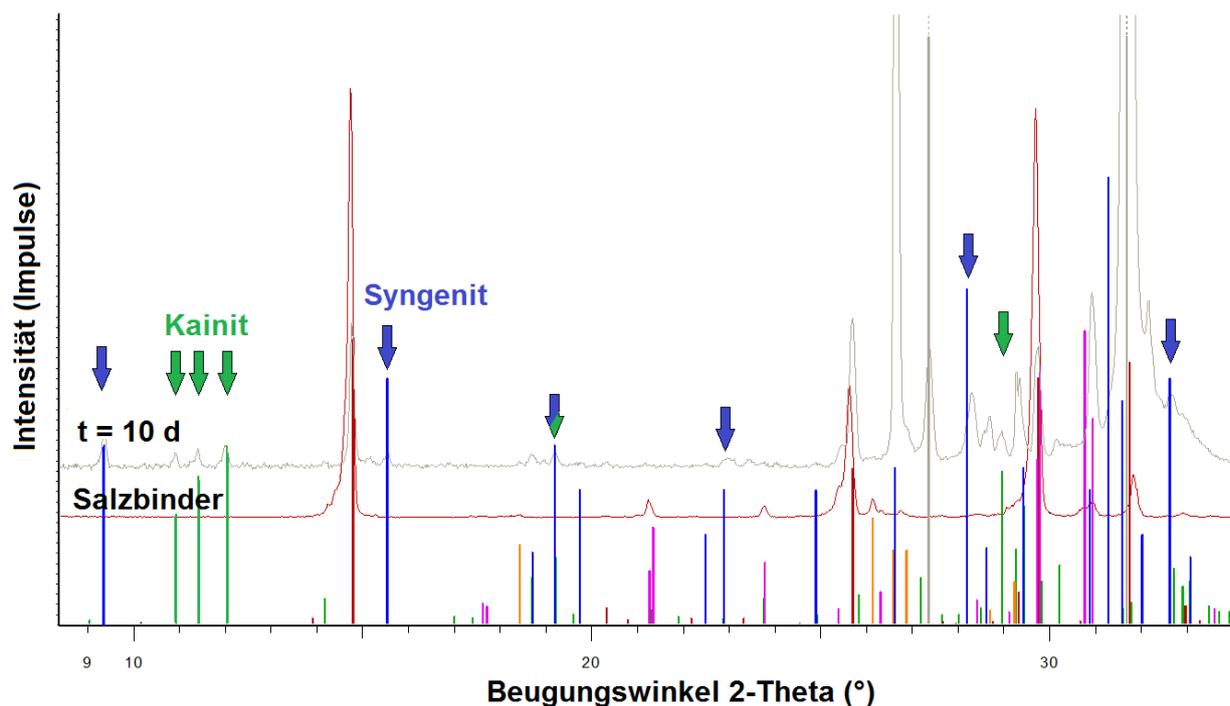


Abbildung 32: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 10 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu den Ausgangskomponenten des Salzbinders

5.2.4.2 Änderung des Phasenbestands nach 31 Tagen

Ein repräsentativer Ausschnitt des Diffraktogramms der 31 Tage alten gefügestabilisierten Salzgrusversatzprobe ist in der Abbildung 33 dargestellt. Anhand des Diffraktogramms kann die Polyhalitbildung nachgewiesen werden. Weiterhin sind die Zunahme der Reflexintensitäten des Syngenits und des Kainits sowie eine Abnahme der Reflexintensitäten der Ausgangskomponenten zu erkennen.

Das Salzmineral Polyhalit bildete sich neben dem Syngenit und Kainit. Die Bildung des Polyhalits aus den Ausgangskomponenten heraus oder aus dem Syngenit bzw.

Kainit heraus konnte anhand des Diffraktogramms nicht erkannt werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass der Polyhalit durch Mineralneubildungsprozesse aus dem Syngenit und Kainit unter Anwesenheit der in der wässrigen Phase befindlichen Ionen gebildet wird. Dies lässt sich damit begründen, dass bereits nach 10 Tagen eine Bildung von Syngenit und Kainit aus den Ausgangskomponenten heraus stattgefunden hat. Zu diesem Zeitpunkt konnte kein Polyhalit nachgewiesen werden. Eine Polyhalitbildung aus den Ausgangskomponenten des Salzbinders heraus wird dementsprechend als unwahrscheinlich erachtet. Dieses kann im weiteren Untersuchungsverlauf genauer betrachtet werden.

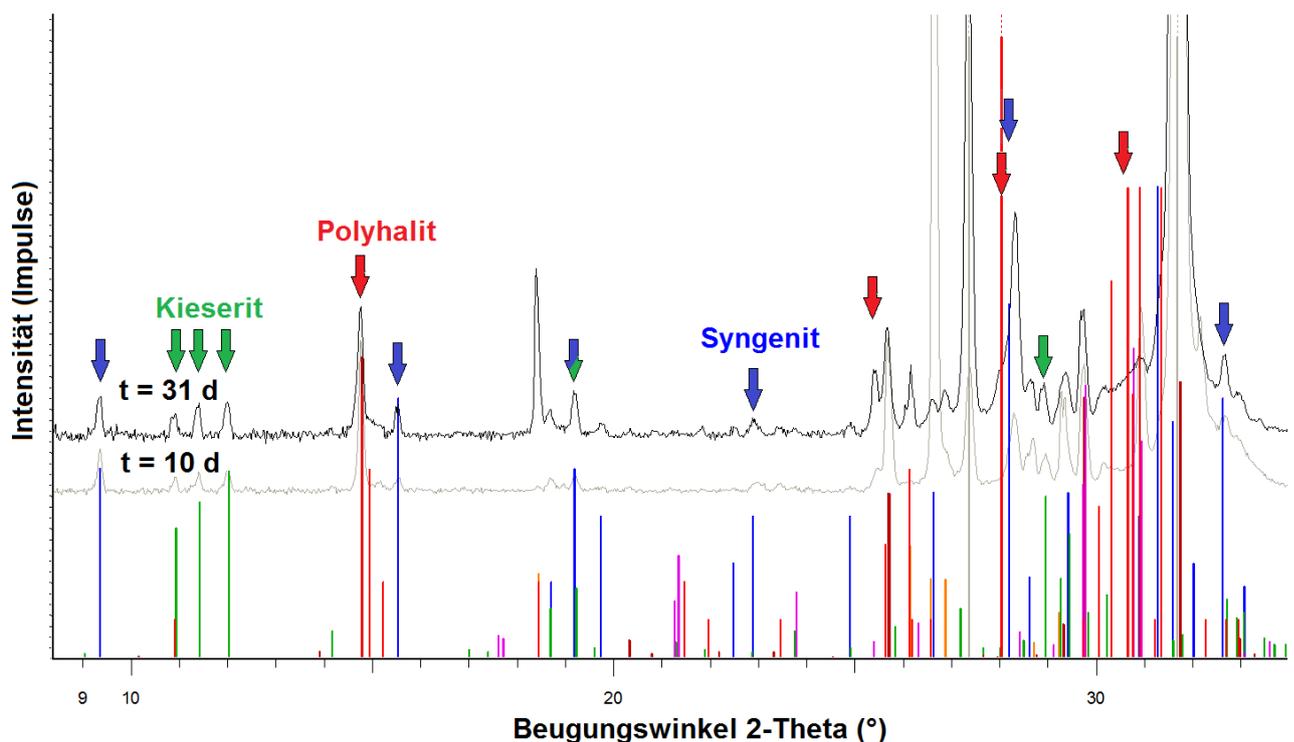


Abbildung 33: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 31 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 10 Tage alten Probe

5.2.4.3 Änderung des Phasenbestands nach 81 Tagen

Der Vergleich des Diffraktogramms des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes nach $t = 81$ d mit dem Diffraktogramm nach $t = 31$ d zeigt, dass eine weitere Zunahme der Salzmineralphase Polyhalit stattgefunden hat. Das entsprechende Diffraktogramm ist in Abbildung 34 dargestellt.

Nach 81 Tagen sind die Reflexe der Ausgangskomponenten bereits signifikant geringer geworden. Die Reflexe des Calciumsulfathalhydrats bei Beugungswinkeln

von $14,8^\circ$ und $25,7^\circ$ konnten aufgrund der Überlagerung mit Polyhalitreflexen nicht eindeutig den entsprechenden Phasen zugeordnet werden. Die Reflexe des Kieserits sowie des Kaliumsulfats waren nicht zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Ausgangskomponenten des Salzbinders zum Großteil durch die wässrige Phase gelöst wurden. Dies wird durch die REM-Aufnahmen in Abbildung 34 belegt. In der REM-Aufnahme sind die charakteristischen Ausgangskomponenten, die in der REM-Aufnahme $t = 3$ d dargestellt sind (Abbildung 29), nicht zu erkennen.

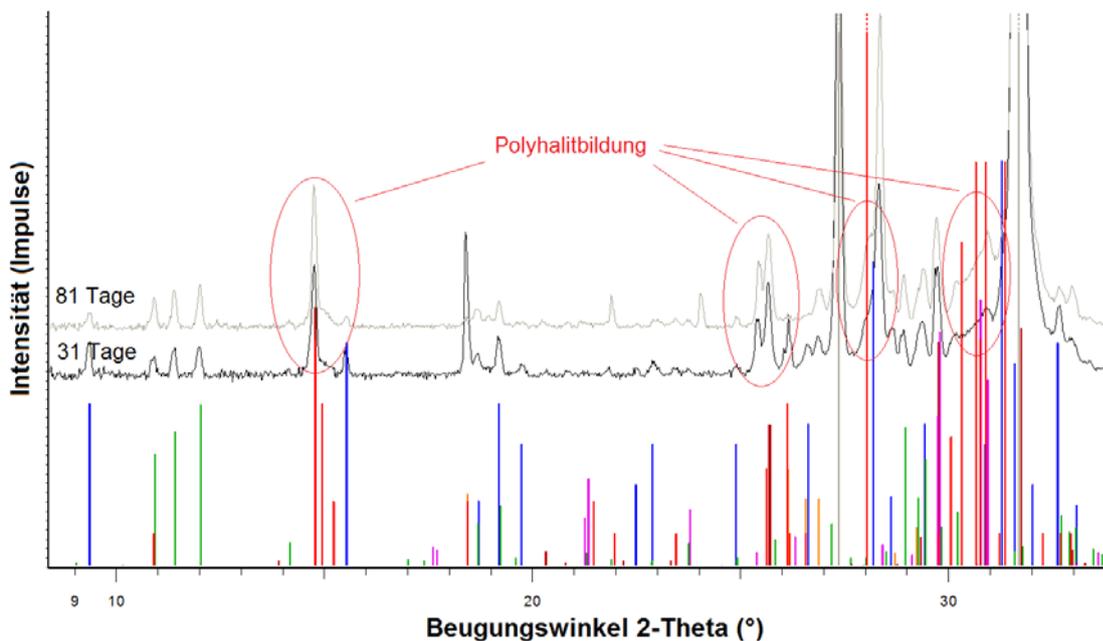


Abbildung 34: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 81 Tage alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 31 Tage alten Probe

Darüber hinaus ist in Abbildung 35 die Verbindung von zwei Halitkörnern durch die an den Kontaktflächen befindlichen neuen Salzmineralisationen zu erkennen. In Abbildung 35 sind die Konturen der miteinander verbundenen Halitkörner durch rote Linien kenntlich gemacht worden. Die an den Oberflächen der Halitkörner gebildeten neuen Salzmineralisationen haben sich an den Kontaktflächen miteinander verbunden. Dieses deutet auf eine gefügestabilisierende Wirkung der gebildeten Salzmineralisationen hin.

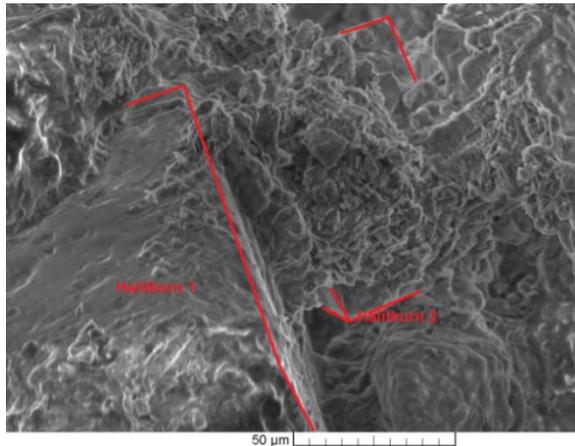


Abbildung 35: Stabilisierung von Kornkontaktflächen durch die Salzmineralneubildung

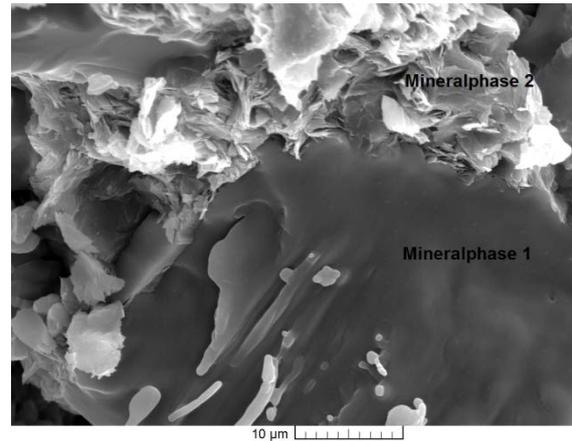


Abbildung 36: Salzmineralneubildung an den Oberflächen des Halitkorngefüges durch den Salzbinder

Sowohl Syngenit als auch Kainit wurden weiterhin nachgewiesen. Dabei ist eine Abnahme der Reflexintensität des Syngenits zu erkennen. Eine Änderung der Reflexintensitäten des Kainits wurde nicht nachgewiesen. Es ist zu vermuten, dass der Syngenit durch Mineralneubildungsvorgänge umgewandelt wird. In Abbildung 36 sind zwei neugebildete Mineralphasen zu erkennen, die im Ausgangsmaterial nicht vorlagen. Die Mineralphasen haben sich auf den Halitoberflächen gebildet und gehen ineinander über.

Die Interpretation der P-XRD-Ergebnisse, die durch die REM-Aufnahmen unterstützt wird ist, dass an den Oberflächen der Halitkörner die Mineralphasen Syngenit und Kainit gebildet werden (Abbildung 36, Mineralphase 1). Mit fortschreitender Zeit bildet sich aus der ersten Mineralphase eine zweite Mineralphase heraus. Der Polyhalit scheint aus den Zwischenphasen Syngenit und Kainit heraus zu kristallisieren. Dies setzt die Anwesenheit der wässrigen Lösung voraus, um die notwendige Mineralneubildung des Syngenits und des Kainits zu ermöglichen. Dabei muss die wässrige Lösung mit den für die Polyhalitbildung benötigten Ionen angereichert sein.

5.2.4.4 Änderung des Phasenbestands nach 2 Jahren und 5 Monaten

Abbildung 37 (S. 76) stellt das Diffraktogramm einer 2 Jahre und 5 Monate alten gefügestabilisierten Salzgrusprobe im Vergleich zu einer 81 Tage alten Probe dar. Das Diffraktogramm bestätigt, dass ein nahezu vollständiger Lösungsprozess der Ausgangskomponenten des Salzbinders stattgefunden hat. Die Reflexe der Ausgangskomponenten können in dem Diffraktogramm nach 2 Jahren und 5 Monaten nicht nachgewiesen werden.

Der gefügestabilisierte Salzgrusversatz mit einem Alter von $t > 2$ Jahre und 5 Monate wies eine Zusammensetzung von Halit und Polyhalit auf. Geringe Mengen der Zwischenphasen Syngenit und Kainit sowie verbleibende Reste der Ausgangskomponenten, die noch nicht umgesetzt wurden, können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Anhand des Diffraktogramms kann bestätigt werden, dass mit der unter Kapitel 5.4 vorgestellten Rezeptur eine langzeitbeständige Salzmineralneubildung des Polyhalits erreicht wird. Die langfristige Bildung von metastabilen Phasen, die nicht zu einer Polyhalitbildung führen, ist nicht bestätigt worden. Die gebildeten metastabilen Zwischenphasen Syngenit und Kainit haben sich im Untersuchungszeitraum nahezu vollständig in Polyhalit umgewandelt.

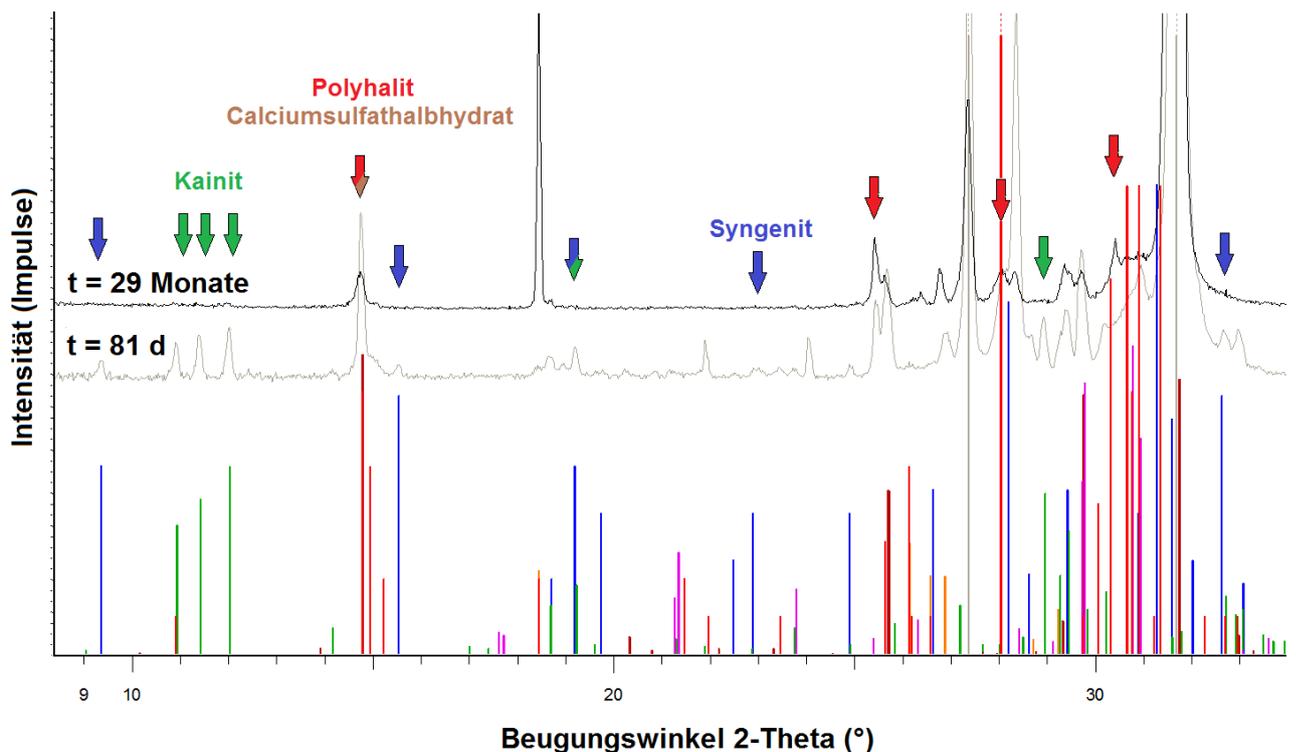


Abbildung 37: Repräsentativer Ausschnitt eines Diffraktogramms (P-XRD-Analyse) einer 2 Jahre und 5 Monate alten Versatzprobe im Vergleich zu einer 81 Tage alten Probe

Durch REM-Aufnahmen konnte die vollständige Umwandlung der Ausgangskomponenten und der Zwischenphasen in Polyhalit bestätigt werden. Abbildung 38 stellt eine Aufnahme des Gefüges dar. Die in Abbildung 36 (S. 75) bezeichnete Mineralphase 1 ist nicht zu erkennen. Anhand der Nahaufnahme des Polyhalits in Abbildung 39 kann gesagt werden, dass diese mit der Mineralphase 2 aus Abbildung 36 vergleichbar ist. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die

Mineralphase 2 den Polyhalit darstellt. Des Weiteren ist eine flächenhafte Verteilung des Polyhalits auf dem Halitkorngefüge zu erkennen.



Abbildung 38: REM-Aufnahme eines Halitkorngefüges mit neu gebildeten Salzmineralisationen

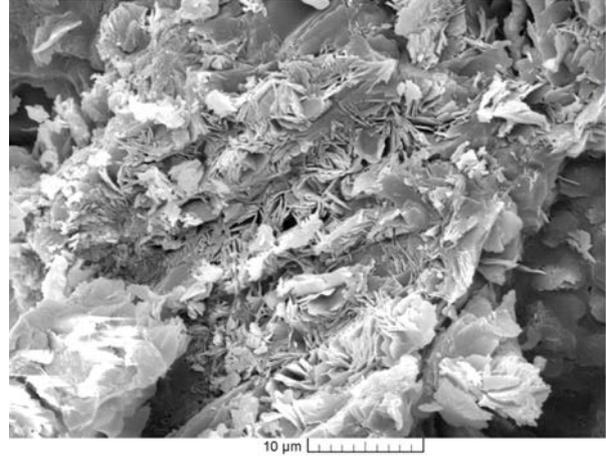


Abbildung 39: REM-Aufnahme der großflächig verteilten neuen Salzmineralphase

5.2.4.5 Visuelle Analyse der Gefügestabilisierung des Salzgrusversatzes

In Kapitel 4.3.1 wird ausgeführt, dass durch den beigefügten Salzbinde eine Salzmineralneubildung hervorgerufen wird, die zu einer Fixierung von Kornkontaktstellen führt. Eine vollständige Porenraumfüllung ist nicht erforderlich, sodass die Salzbindermenge minimiert wurde.

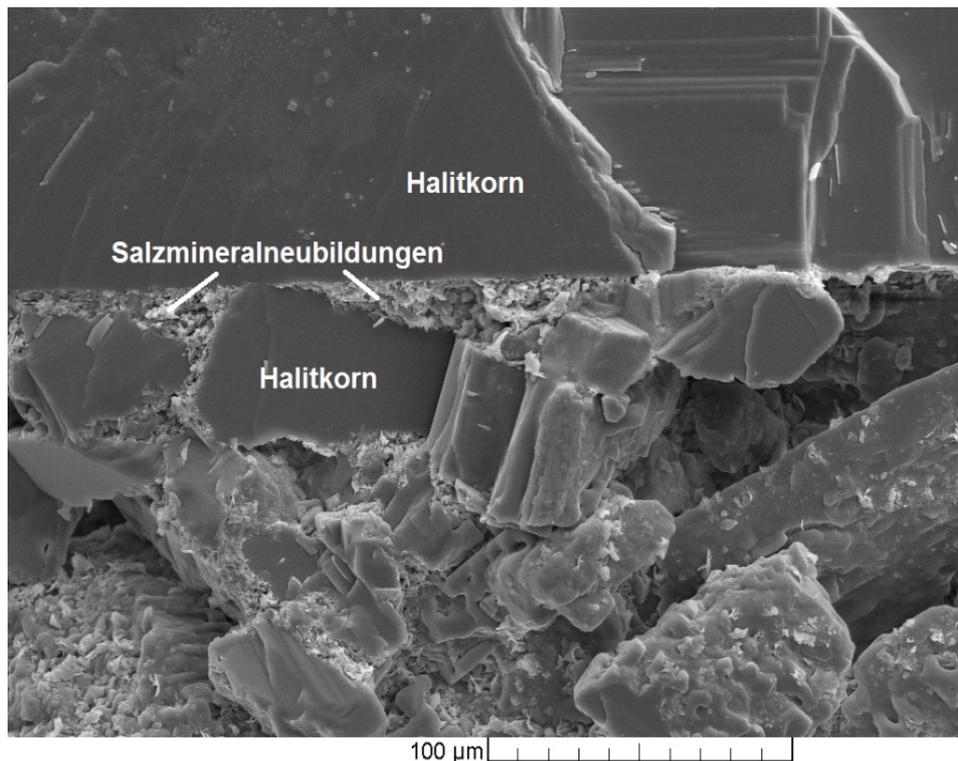


Abbildung 40: REM-Aufnahme der Gefügestabilisierung von Kornkontaktflächen im Versatzmaterial

Die Wirkungsweise des Salzbinders wurde visuell durch REM-Aufnahmen überprüft. Abbildung 40 stellt eine Aufnahme des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes nach 2 Jahren und 5 Monaten mit dem Fokus auf dem Salzgruskorngefüge dar. In Abbildung 40 sind Halitkörner mit entsprechenden Kontaktstellen, die durch Salzmineralneubildungen stabilisiert werden, zu erkennen. Wie Abbildung 36 zeigt, wurden die Salzmineralisationen an den Halitkornoberflächen gebildet und verbanden sich mit fortschreitender Zeit miteinander. Eine Gefügestabilisierung des Salzgruskorngefüges war die Folge. Eine vollständige Füllung des Porenraums zwischen dem Steinsalzgruskorngefüge ist in Abbildung 40 nicht zu erkennen.

Des Weiteren ist der Abbildung zu entnehmen, dass die Einzelkörner des Steinsalzgruses durch den verwendeten Salz binder nicht verändert wurden (Lösungerscheinungen). Eine Reaktion des Salzbinders mit dem Steinsalz fand nicht statt.

Die Probenpräparation erforderte das Herauslösen von Probenstücken aus dem Probenverbund. Dies führte zu einer mechanischen Belastung der zu untersuchenden Probe. Diese Belastung der neuen Salzmineralphasen durch eine Bewegung des Halitkorngerüstes zeigt Abbildung 41. Die Abbildung zeigt, dass aufgrund einer Probenbelastung eine Rissbildung in der flächenhaft verteilten

Salzmineralisation eingetreten ist. Eine Belastung des Halitkorngefüges bewirkte eine Belastung der neuen Salzmineralisationen. Es ist zu vermuten, dass die Übertragung von Kräften durch die Halitkörner auf die gefügestabilisierende Mineralisation stattfand. Um eine Kraftübertragung zu ermöglichen, wurde eine kraftschlüssige Verbindung der Halitkörner mit den neugebildeten Salzmineralisationen (Polyhalit) erforderlich. Dies kann durch die Abbildung 40 bestätigt werden.

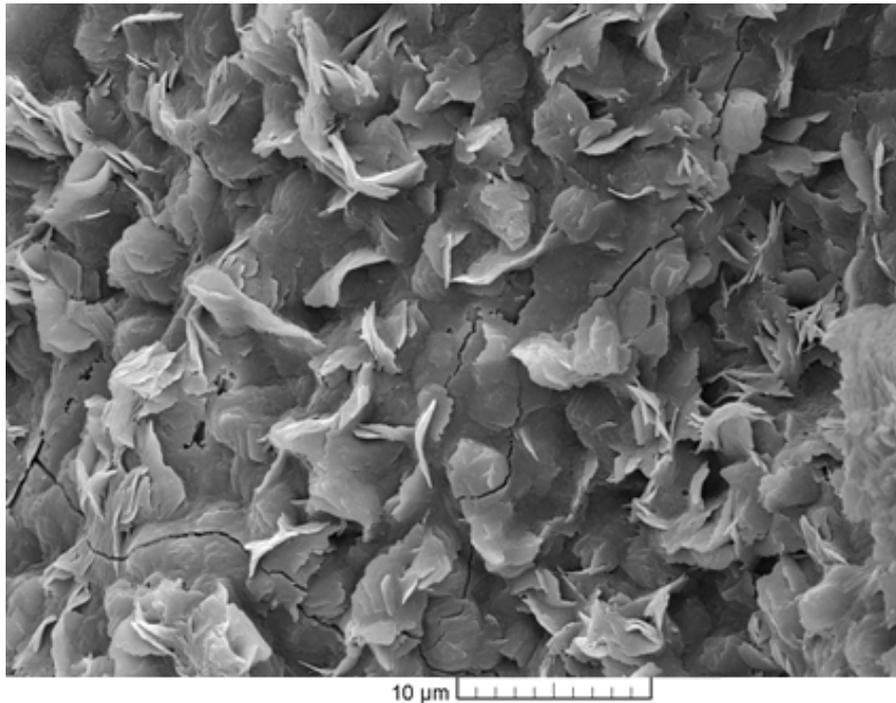
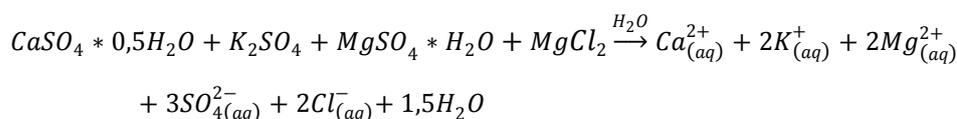


Abbildung 41: Rissbildung innerhalb der neu gebildeten Salzmineralphase aufgrund einer mechanische Belastung der Probe

5.2.4.6 Formulierung der zeitabhängigen Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozesse

Als Ergebnis der P-XRD-Analysen und der REM-Aufnahmen können die im gefügestabilisierten Salzgrusversatz ablaufenden Lösungs- und Mineralneubildungsprozesse formuliert werden. Die ablaufenden Mineralisationsprozesse setzen sich aus folgenden Phasen zusammen.

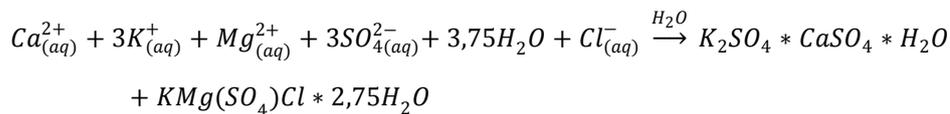
1. Lösungsphase



In der Lösungsphase gehen die festen Ausgangskomponenten des Salzbinders in Lösung. Entsprechend des Lösungsgleichgewichtes wird die in dem Salzbinde

befindliche saline Lösung mit den Ionen angereichert. Die Lösungsphase läuft bis zur vollständigen Lösung der Edukte ab und wird maßgeblich durch die Umgebungsbedingungen Temperatur und Druck beeinflusst.

2. Bildung der Zwischenphasen Syngenit und Kainit



Aus den in der Lösung befindlichen Ionen bilden sich durch Kristallisationsprozesse die Zwischenphasen Syngenit und Kainit. Diese Phase beginnt unmittelbar nach einer Anreicherung bzw. Sättigung der Lösung an den benötigten Ionen durch die Edukte und läuft bis zum Verbrauch der Ausgangskomponenten ab. Als Doppelsalz bildet sich Syngenit im System $\text{CaSO}_4 : \text{K} : \text{H}_2\text{O}$ unterhalb von 200 °C (bis ca. 180 °C – 190 °C). Bei steigenden Temperaturen nimmt die Bildung des Doppelsalzes Goergeyite zu. Da innerhalb der ersten Jahre keine Annäherung der Umgebungstemperatur bis an 180 °C zu erwarten ist, ist mit einer Verschiebung der Bildungskinetik aus dem Bereich des Syngenits heraus nicht zu rechnen. [Fre03]

3. Bildung der langzeitbeständigen Mineralphase Polyhalit

Aufgrund der komplexen Lösungs- und Mineralneubildungsmechanismen ist es an dieser Stelle nicht möglich eine exakte Reaktionsgleichung für die Salzmineralneubildungsphase des Polyhalits zu geben. Basierend auf den Ergebnissen der P-XRD-Analysen sowie der REM-Aufnahmen können die folgenden Annahmen getätigt werden: Die an den Oberflächen des Steinsalzes gebildeten Zwischenphasen Syngenit und Kainit wandeln sich in den Polyhalit um. Dies geschieht unter Anwesenheit der dazu benötigten Ionen in Lösung. Abbildung 42 stellt eine Vergrößerung der Kontaktfläche der Umwandlung der Zwischenphasen dar. Aus der Zwischenphase (unten im Bild) wurde die langzeitbeständige Salzmineralphase (oben im Bild) gebildet. Dies geschah unter Anwesenheit der wässrigen Lösung.

Die Polyhalitbildung im Versatzmaterial läuft über Wochen bis Monate im Versatzmaterial bei Raumtemperatur ab. Es ist zu vermuten, dass die Polyhalitbildung bei Raumtemperatur nur sehr gering im Labormaßstab stattfindet [Fre03]. Bei dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz wurde eine Polyhalitbildung bereits nach 3 Wochen ermittelt.

Das Pulverdiffraktogramm in Abbildung 33 stellt einen Übergangszustand dar, in dem alle drei Phasen zum gleichen Zeitpunkt abliefen. Abbildung 37 zeigt, dass nach $t > 2$ Jahren sowohl die Ausgangskomponenten als auch die Zwischenprodukte aufgebraucht waren. Das molare Verhältnis der zugegebenen Ausgangskomponentenmenge zueinander im Salzbinde hinsichtlich der Polyhalitbildung wurde bestätigt.

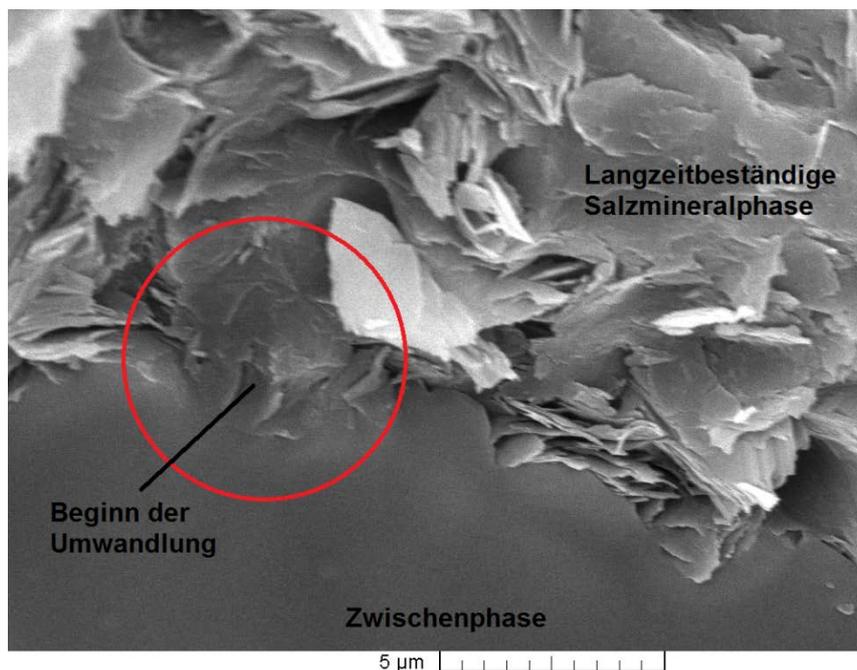


Abbildung 42: Umwandlung der Zwischenphase (unten) in die langzeitbeständige Salzmineralphase (oben) - bearbeitet

5.2.5 Fazit der Phasen- und Gefügeuntersuchungen

Aus den Ergebnissen der P-XRD-Analyse sowie den REM-Aufnahmen kann geschlossen werden, dass innerhalb des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials, bedingt durch die Salzbindezugabe entsprechende Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozesse abliefen. Diese Prozesse waren zeitabhängig und führten mit fortschreitender Zeit zu einem „Verwachsen“ des Halitkorngefüges durch die Bildung neuer Salzmineralphasen. Der Prozess der Gefügestabilisierung durch die Polyhalitbildung konnte bestätigt werden.

Die P-XRD-Analyse zeigte, dass als Endprodukt die Salzmineralphase Polyhalit gebildet wurde. Die Polyhalitbildung lief über die Bildung der Salzmineralphasen

Syngenit und Kainit sowie dem Verbrauch der Salzbinderkomponenten ab. Die Syngenit- und Kainitbildung konnte innerhalb der ersten Tage ($t < 10$ d) durch die Lösung der Salzbinderkomponenten und anschließende Mineralneubildung belegt werden. Innerhalb des ersten Monats ($t < 31$ d) konnte die Polyhalitbildung als Mineralneubildung der Zwischenphasen mit den in der Lösung befindlichen Ionen belegt werden. Nach einem Zeitraum von $t > 2$ Jahren wurden die Salzbinderkomponenten nahezu vollständig in die Mineralphase Polyhalit umgewandelt. Eine Bildung von Nebenmineralisationen, die nicht zu einer Polyhalitbildung führen, wurde nicht festgestellt. Anhand der P-XRD kann der generalisierte Phasenbestand des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes nach Tabelle 10 dargestellt werden.

Tabelle 10: Generalisierter zeitabhängiger Phasenbestand des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

| Probenalter [d] | Phasenbestand |
|----------------------------|--|
| < 3 | Halit, Calciumsulfathalbhydrat, Kaliumsulfat, Kieserit |
| > 10 | Halit, Calciumsulfathalbhydrat, Kaliumsulfat, Kieserit, Syngenit, Kainit |
| > 31 | Halit, Calciumsulfathalbhydrat, Kaliumsulfat, Kieserit, Syngenit, Kainit, Polyhalit |
| > 81 | Halit, Calciumsulfathalbhydrat, Kaliumsulfat, Kieserit, Syngenit, Kainit, Polyhalit |
| > 880 | Halit, Polyhalit (ggf. Calciumsulfathalbhydrat, Kaliumsulfat, Kieserit, Syngenit, Kainit) |

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass sich die Salzminerale aus dem Salzbinder an den Oberflächen der Halitkörner bilden. Ein „Verwachsen“ dieser Salzmineralneubildungen konnte an den Kontaktstellen beobachtet werden. Die REM-Aufnahmen zeigen des Weiteren die Umwandlung der Zwischenphasen in den

Polyhalit. Dabei wurde eine Schädigung im Sinne einer Auflösung der Verwachsungen an den Kornkontaktstellen nicht beobachtet. Der Polyhalit war flächenhaft über die Halitkornoberflächen verteilt. Dies bestätigt die homogene Verteilung des Salzbinders im Versatzmaterial.

Eine vollständige Porenraumfüllung hat nicht stattgefunden. Die Salzmineralneubildung wurde an den Oberflächen des Salzgruskorngemisches ermittelt.

5.3 Gesamtrezeptur des Salzbinders

Die Untersuchungen der unterschiedlichen Salzbindeerrezepturen bestätigen, dass sowohl eine gesättigte NaCl-Lösung als auch eine hochgesättigte MgCl₂-Lösung für die Verwendung im Forschungsvorhaben in Frage kommen. Aufgrund der frühzeitigen Bildung von Polyhalit im System K⁺ : Mg²⁺ : Ca²⁺ : MgCl₂-Lösung wurde sich für eine Verwendung dieser Lösung entschieden.

Generell wurde von einem minimierten Lösungsgehalt des Salzbinders ausgegangen, um die im Versatzmaterial befindliche Feuchtigkeit gering zu halten. Ein Mindestgehalt an MgCl₂-Lösung ist für die Salzmineralneubildung sowie für die Mischbarkeit von Salzgrus und Salzbinde notwendig. Anhand von Mischungsversuchen des Salzgruses mit dem Salzbinde wurde ein optimaler Lösungsgehalt von 25 Masse-% an der Gesamtmasse des Salzbinders ermittelt. Es ergibt sich somit die in Tabelle 11 dargestellte Gesamtrezeptur des Salzbinders.

Tabelle 11: Gesamtrezeptur des Salzbinders im Forschungsvorhaben GESAV

| Salzbindekomponente | Anteil [Masse-%] |
|--|------------------|
| CaSO ₄ ·0,5H ₂ O | 36,11 |
| K ₂ SO ₄ | 21,68 |
| MgSO ₄ ·H ₂ O | 17,21 |
| MgCl ₂ -Lösung (5 molal) | 25,00 |
| Summe | 100,00 |

Anhand der Einzelkomponenten kann die durchschnittliche Korndichte ρ_s des Salzbinders ermittelt werden. Hierfür wurden alle Einzelkomponenten mittels Gaspyknometer am Institut für Keramik Glas- und Baustofftechnik der TU Bergakademie Freiberg analysiert (siehe Anhang D). Als Ergebnis wird eine durchschnittliche Korndichte der Feststoffphase des Salzbinders mit $\rho_s = 2,63 \text{ g/cm}^3$ identifiziert.

5.4 Probenkörperherstellung

Die vorläufigen Rezepturansätze des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes setzen sich aus dem optimierten Salzgruskorngemisch (Kap. 4.2) und dem Salzbinder (Kap. 4.3) zusammen. Der Salzbindergehalt wird unter Beachtung der Vorhabensziele (Kap. 3.1) minimiert.

Als Fazit gelten für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz die in Tabelle 12 dargestellten Zusammensetzungen. Tabelle 12 zeigt, dass anhand der unterschiedlichen Korngemische zwei Rezepturansätze entwickelt wurden. Diese Rezepturansätze unterscheiden sich in der Kornverteilung. Da beide Rezepturansätze dieselbe Salzbinderzusammensetzung sowie –gehalt aufweisen, sind die Rezepturansätze im Chemismus identisch.

Die durchschnittliche Korndichte der Feststoffphase des Versatzmaterials (Salzgrus und Salzbinder) beträgt $2,26 \text{ g/cm}^3$. Hinzu kommt die Magnesiumchloridlösung mit einer Dichte von $1,35 \text{ g/cm}^3$. Der durchschnittliche Lösungsgehalt an fünf molaler MgCl_2 -Lösung beträgt 3,90 Masse-%. Der entsprechende Wassergehalt im gefügestabilisierten Salzgrusversatz beträgt 2,64 Masse-%.

Tabelle 12: Rezepturansätze für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz

| Gefügestabilisierter Salzgrusversatz | | | | |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|---|------------------|
| Salzgrus | | | Salzbinder | |
| 85 Masse-% | | | 15 Masse-% | |
| <i>Komponenten</i> | <i>Korngemisch 1</i> | <i>Korngemisch 2</i> | <i>Komponenten</i> | <i>[Masse-%]</i> |
| Überkorn | 29,00 | 23,20 | $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ | 36,11 |
| Band 6 | 27,00 | 21,60 | K_2SO_4 | 21,68 |
| Band 8 | 44,00 | 35,20 | $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 17,21 |
| Feinsalz | 0,00 | 20,00 | MgCl_2 -Lösung (5 molal) | 25,00 |

Für den vorgestellten gefügestabilisierten Salzgrusversatz wurde beim Deutschen Patent- und Markenamt ein Patent unter der Nummer 10 2015 005 288 erteilt.

Das Anmischen des Versatzmaterials erfolgte mittels Laborzwangsmischer für Betonbaustoffe am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg. Abbildung 43 zeigt den verwendeten Zwangsmischer. Dieser wird maßgeblich zum Anmischen von Betonproben verwendet. Für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz wurde diese Herstellungsweise adaptiert.



Abbildung 43: Zwangsmischer am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg

Zur vollständigen Benetzung aller Kornkontaktstellen im Salzgrusgefüge war es notwendig, den verwendeten Salzgrus vor der Zugabe der festen Salzbindekomponenten mit der Salzlösung zu benetzen. Dies ist auf die begrenzte Materialbewegung im Zwangsmischer zurückzuführen. Eine homogene Lösungsverteilung ist die Voraussetzung für eine gleichmäßige Salzmineralneubildung. Im Anschluss wurde die Feststoffphase des Salzbinders hinzugegeben.

Die Mischzeit wurde auf 5 Minuten begrenzt. Da die erste signifikante Phase der Salzmineralneubildung in Abhängigkeit von den Umgebungsparametern von Stunden bis Tagen nach dem Anmischen reicht, kann somit eine ausreichende Mischzeit ohne Beeinflussung der Mineralphasenneubildung eingestellt werden. Diese soll eine homogene Verteilung des Salzbinders im Salzgrus sowie eine vollständige Benetzung des Salzgruses gewährleisten.

Eine Erhöhung der Mischzeit wird, um eine signifikante Änderung der Kornverteilungskurve zu vermeiden, als nicht zielführend betrachtet. Durch den Mischvorgang wird das Korngefüge mechanisch belastet. Dabei unterscheiden sich unterschiedliche Mischvorgänge in der mechanischen Belastung.

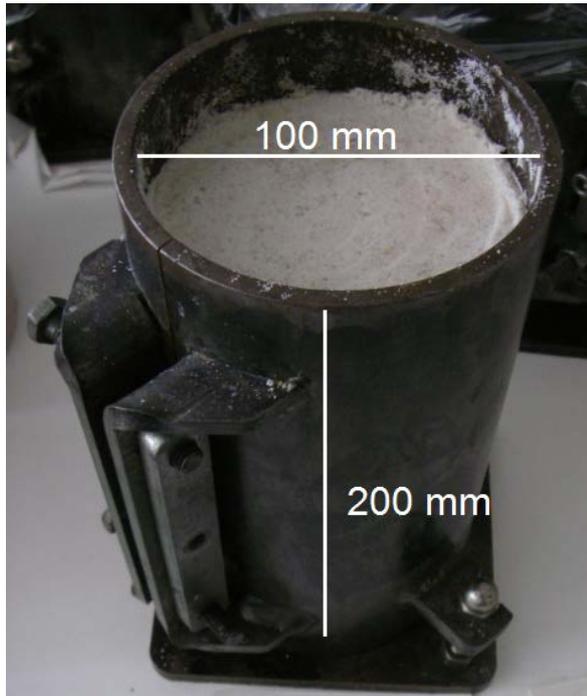


Abbildung 44: Probenform zur Herstellung von Versatzproben am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg

Zur Durchführung von labortechnischen Materialuntersuchungen des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes mussten Probenkörper hergestellt werden. Verwendet wurden Probenkörper aus der Baustoffprüfung für Betonbaustoffe mit einem Schlankheitsgrad von 1:2. Die Probenkörper weisen einen Durchmesser von $d = 100 \text{ mm}$ sowie eine Höhe von $h = 200 \text{ mm}$ auf. Entlang des Probenmantels ist ein Weitungsschlitz eingebracht, der durch Schraubverbindungen geöffnet und geschlossen werden kann. Dies ermöglicht einen zerstörungsfreien Probenausbau. Abbildung 44 zeigt einen der verwendeten Probenzylinder, während

des Einbaus einer Versatzprobe. Um das Material im Probenzylinder auf die entsprechenden Einbaudichten einzubauen, wurde dieses in mehreren Schichten verdichtet. Die Schichtdicke betrug ca. 4 bis 5 cm. Unterschiedliche Verdichtungsvarianten wurden im Rahmen der Versuche analysiert und mussten aufgrund ungleichmäßiger bzw. nicht geeigneter Verdichtung ausgeschlossen werden. Vor allem vibrierende Verfahren zeigten eine geringe Wirksamkeit. Als geeignet erwies sich der Probeneinbau mittels lokaler Verdichtung durch einen Stempel. Die erreichten Einbaudichten wurden an die durchzuführenden Laboruntersuchungen angepasst. Generell wurde sich, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, an Einbaudichten zwischen $1,5 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ orientiert.

Für die Durchführung von Langzeitkriechversuchen (Kapitel 7.3) war die Herstellung von zylindrischen Probenkörpern mit einer geänderten Abmessung notwendig. Die Änderung der Probenabmessung ist auf die verwendete Versuchsanlage zurückzuführen. Die oben aufgeführte Probengröße konnte nicht in die Versuchsanlage eingebaut werden. Aus diesem Grund war die Erstellung von Probenkörper mit den Abmessungen $d = 3,6 \text{ cm}$ und $h = 7,2 \text{ cm}$ notwendig. Hierfür wurden entsprechende zylindrische Probenkörper hergestellt und verwendet.

Nach dem Einbau des Versatzmaterials in die Probenformen wurden diese bei einer konstanten Umgebungstemperatur von $T = 25 \text{ °C}$ gelagert. Die Probenkörper wurden von der Umgebungsluft isoliert. Die Lagerungsdauer betrug durchschnittlich drei Wochen, um eine ausreichende Transportfestigkeit sicherzustellen. Diese wird durch die Salzmineralneubildung bewirkt. Die Salzmineralneubildung ist ein zeitabhängiger Prozess, der unmittelbar nach dem Anmischen des Versatzmaterials beginnt. Nach ca. drei Tagen ist die Salzmineralneubildung bereits so weit fortgeschritten, dass die Probenkörper eine Formstabilität aufweisen. Für einen zerstörungsfreien Transport wurde eine Zeitspanne von drei Wochen ermittelt. Transporterschütterungen werden nach drei Wochen von den Probenkörpern ohne Gefügeveränderung ausgehalten. Nach der Lagerung wurden die Probenkörper für eine Vergleichbarkeit untereinander zeitnah mit den entsprechenden Analysemethoden geprüft.

6 AP3 - Laborversuche zur Bestimmung von Festigkeit, Kriech- und Relaxationsverhalten, Permeabilität und Quellverhalten

6.1 Festigkeitsuntersuchungen

6.1.1 Grundlagen der Scherfestigkeitsuntersuchungen

Zur Beschreibung der Festigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials wird als Parameter die Scherfestigkeit im Sinne einer Kohäsion untersucht. Die Kohäsion beschreibt den Zusammenhalt eines Korngefüges ohne äußere Belastung. Der Zusammenhalt des Korngefüges basiert auf Haftkräften zwischen den Einzelkörnern.

Das Prinzip der Gefügestabilisierung von Salzgrusversatzmaterialien basiert auf einer Erhöhung der Haftkräfte zwischen den Steinsalzgruskörnern durch eine Mineralneubildung an den Kornkontaktflächen. Dieses äußert sich in einer Erhöhung der Kohäsion des Versatzmaterials. Aus diesem Grunde wurde sich dafür entschieden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Festigkeit im Rahmen von Scherfestigkeitsuntersuchungen zu analysieren.

Das Prinzip der Scherfestigkeitsuntersuchungen basiert auf der Scherbelastung eines Probenmaterials und der Ermittlung der notwendigen Scherkraft mit der Volumenverformung. Die Widerstandskraft des zu untersuchenden Materials wird als Schubwiderstand τ_{res} bezeichnet. Der Schubwiderstand setzt sich aus den Materialeigenschaften Kohäsion c , Reibungswinkel φ und Normalspannung σ_n zusammen (Formel 10 [Pop15]). Anhand dieser Materialeigenschaften kann der Bruchzustand im Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium beschrieben werden. Dieses erlaubt eine Aussage über die Festigkeit des untersuchten Versatzmaterials im belasteten und unbelasteten Zustand.

$$\tau_{res} = c + \sigma_n * \tan(\varphi) \quad (10)$$

τ_{res} = Schubwiderstand [N/mm²]

c = Kohäsion [N/mm²]

σ_n = Normalspannung [N/mm²]

φ = Reibungswinkel [°]

In Abbildung 45 ist das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium schematisch aufgetragen. In der Abbildung lässt sich die Schergerade eines Probenmaterials entnehmen, die vom Scherwiderstand sowie der Normalspannung abhängig ist.

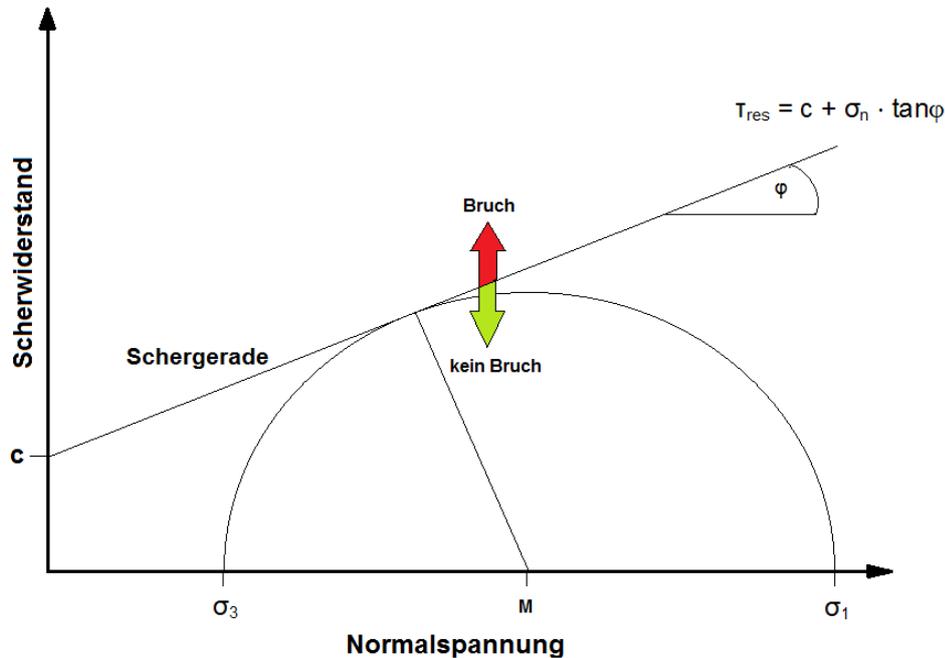


Abbildung 45: Darstellung des Mohr-Coulomb'schen Bruchkriteriums für Scherfestigkeitsuntersuchungen

Im Scherversuch wird unter Variation der Normalspannung die sogenannte Peakfestigkeit des Probenmaterials ermittelt. Die Peakfestigkeit beschreibt die maximale Versatzfestigkeit bei einer definierten Normalspannung bevor es zum Materialversagen kommt. Durch die Ermittlung der Peakfestigkeiten bei unterschiedlichen Normalspannungen ist es möglich eine Schergerade für das Versatzmaterial zu bestimmen. Anhand des Schnittpunktes der Schergeraden mit der Ordinatenachse, die eine Normalspannung von Null beschreibt, ist es möglich die Kohäsion des Versatzmaterials zu definieren.

Untersucht wurde die Scherfestigkeit mit einem MTS-Scher-Test-System (engl. MTS = Material Testing System) Model 816 am Institut für Gebirgsmechanik in Leipzig (IfG Leipzig). Das verwendete Gerät ist in Abbildung 46 schematisch dargestellt. [Pop15]

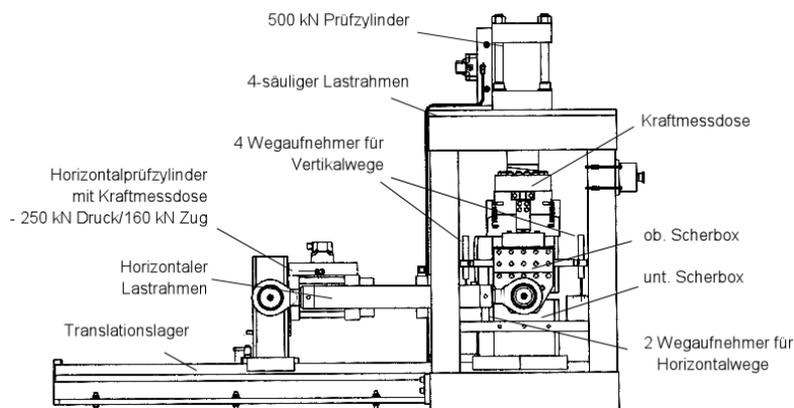


Abbildung 46: MTS-Scher-Test-System des Modells 816 [Pop15]

6.1.2 Durchführung von Scherversuchen

Bei der Durchführung von Scherversuchen ist die ausgeprägte Abhängigkeit der Festigkeitsparameter von diversen Faktoren ermittelt worden. Aufgrund dieser Faktoren wurde sich für eine Ausweitung der geplanten Scherfestigkeitsuntersuchungen entschieden. Die Scherfestigkeit wurde hinsichtlich des Einflusses

- der Einbaudichte des Versatzmaterials,
- dem Salzbinderanteil,
- der Salzgruszusammensetzung mit und ohne Feinsalzzugabe und
- dem Probenalter

untersucht. In Tabelle 13 sind die untersuchten Probenkörper mit der entsprechenden Zusammensetzung aufgeführt.

Tabelle 13: Auflistung der Probenkörper zur Untersuchung der Scherfestigkeit (übernommen aus [Pop15])

| Probenbezeichnung | Versuchsanzahl [-] | Dichte [g/cm ³] | Salzbinderanteil [%] | Feinkornanteil [%] | Probenalter [Wochen] |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| 538/5 | 2 | 1,54 | 20 | 0 | 6 |
| 538/11 | 2 | 1,53 | 10 | 0 | 6 |
| 538/14 | 2 | 1,60 | 15 | 20 | 6 |
| 538/23 | 1 | 1,60 | 15 | 0 | 52 |
| 538/24 | 1 | 1,60 | 15 | 0 | 52 |
| 538/25 | 1 | 1,53 | 15 | 0 | 6 |
| 538/26 | 2 | 1,61 | 15 | 0 | 6 |
| 538/27 | 2 | 1,69 | 15 | 0 | 6 |

Die zu untersuchenden Probenkörper wurden in den Scherkasten der Versuchsapparatur eingebaut („Scherbox“). Anschließend erfolgte eine Belastung der Probenkörper mit der entsprechenden Normalspannung σ_n (senkrecht zum Probenkörper) unter Einwirkung der Schubbeanspruchung (horizontal zum Probenkörper). Anhand der notwendigen Schubkraft wurde der Schubwiderstand des Probenkörpers in Abhängigkeit von der Normalbeanspruchung aufgezeichnet. Bei den Materialuntersuchungen wurden jeweils zwei Versuche mit unterschiedlicher Normalspannung durchgeführt, um die in Abbildung 47 dargestellte Schergerade zu erstellen. Die verwendeten Normalspannungen lagen zwischen 0,3 MPa und 1,5 MPa. Der Schnittpunkt der ermittelten Schergeraden mit der Ordinatenachse ergibt die Kohäsion und somit die Scherfestigkeit des Versatzmaterials. [Pop15]

Der Scherwinkel beschreibt den Zustand der inneren Reibung im Versatzmaterial. Der Scherwinkel wird maßgeblich durch Reibungskräfte innerhalb des Korngefüges beeinflusst. Hierbei spielt vor allem die Verzahnung von Körnern im Korngerüst eine übergeordnete Rolle. Der Scherwinkel ist, wie die Kohäsion, ein materialspezifischer Wert.

6.1.3 Versuchsergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen

6.1.3.1 Scherfestigkeit in Abhängigkeit von der Einbaudichte

Die Scherfestigkeit des Versatzmaterials wird durch die Einbaudichte aufgrund der Zunahme der Kornkontaktflächen bei zunehmender Einbaudichte beeinflusst. Diese Kornkontaktflächen zwischen den Halitkörnern werden durch die neugebildeten Salzmineralisationen stabilisiert. Es wird davon ausgegangen, dass ein Zusammenhang zwischen der Anzahl von Kornkontaktflächen und Versatzfestigkeit besteht.

In Abbildung 47 sind die ermittelten Versuchsergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen in Abhängigkeit von der Einbaudichte dargestellt.

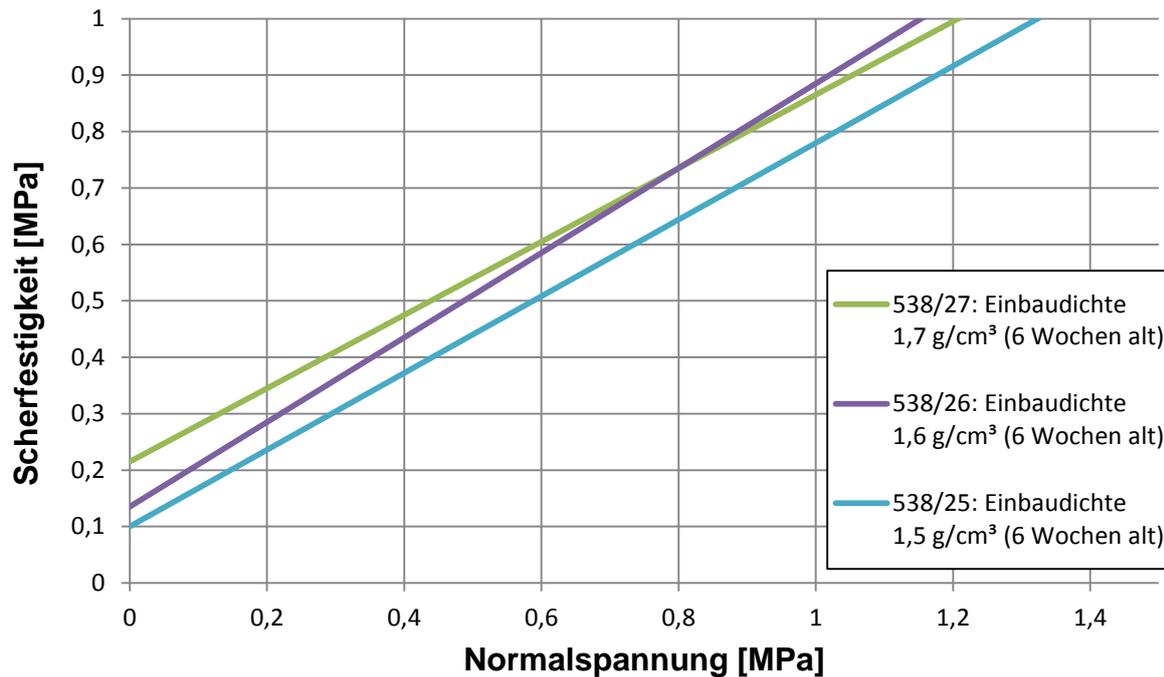


Abbildung 47: Überblick über die Scherfestigkeit der untersuchten gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben 538/25, 538/26 und 538/27 mit unterschiedlicher Einbaudichte nach [Pop15]

In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit einer Zunahme der Einbaudichte die Scherfestigkeit zunimmt. Eine Einbaudichte von 1,5 g/cm³ zeigte nach sechs Wochen eine Scherfestigkeit von ca. 0,10 MPa. Durch eine Erhöhung der Einbaudichte von 1,5 g/cm³ auf 1,7 g/cm³ ist die Zunahme der Scherfestigkeit auf ca. 0,22 g/cm³ zu erkennen. Dies stellt eine Verdopplung der Scherfestigkeit dar.

Es ist des Weiteren zu erkennen, dass die Schergeraden der Probenkörper mit einer Einbaudichte von 1,5 g/cm³ sowie 1,7 g/cm³ einen vergleichbaren Winkel der inneren Reibung von $\varphi = 33^\circ - 34^\circ$ aufweisen. Der Probenkörper mit einer Einbaudichte von 1,6 g/cm³ weist im Vergleich eine höhere Steigung von ca. $\varphi = 37^\circ$ auf. Dies stellt eine Erhöhung des Scherwinkels von ca. 3° dar. Diese Abweichung ist mit einem statistischen Einfluss zu begründen. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Erhöhung der Untersuchungen eine Angleichung der Winkel der Inneren Reibung auftritt. Darüber hinaus kann eine Schwankung der Schergerade durch eine Schwankung der Kornverteilung der verwendeten Korngemische auftreten. Diese Schwankungen treten vor allem bei der Kornfraktion Überkorn auf. Durch ein Absieben der Korngrößen $> 14,00 \mu\text{m}$ wurde der Einfluss dieser Schwankungen minimiert.

Nach [Höh98] weisen unterschiedliche naturtrockene Steinsalzgruse einen Reibungswinkel von $41^\circ < \varphi < 48^\circ$ auf. Dies zeigt, dass die gefügestabilisierten Salzgrusmaterialien über einen geringeren Reibungswinkel verfügen. Dies ist mit der zusätzlichen Salzbinder- und Lösungszugabe von insgesamt 15 Masse-% zu erklären.

Als Fazit kann gesagt werden, dass die Scherfestigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials mit einer zunehmenden Einbaudichte steigt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine hohe Einbaudichte hinsichtlich der Eigenstabilität des Versatzkörpers zu bevorzugen ist. Der Winkel der Inneren Reibung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials ist geringer als vergleichbare herkömmliche naturtrockene Salzgruskornmische.

6.1.3.2 Scherfestigkeit in Abhängigkeit vom Salzbindergehalt

Zur Analyse des Einflusses des Salzbindergehaltes wurden Probenkörper mit einem Probenalter von $t = 6$ Wochen mit unterschiedlichen Salzbindergehalten untersucht. Die Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen sind in Abbildung 48 dargestellt.

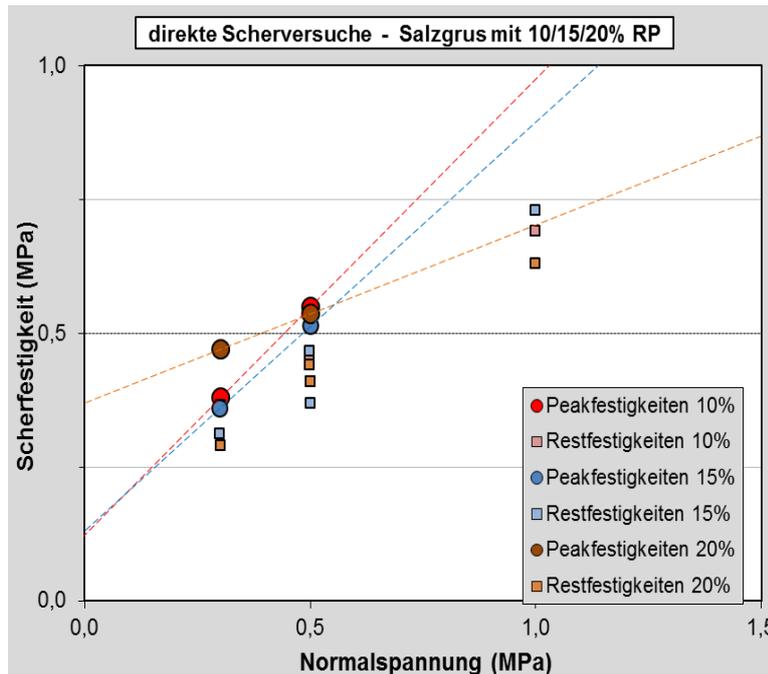


Abbildung 48: Abhängigkeit der Scherfestigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials in Abhängigkeit vom Salzbindergehalt (übernommen aus [Pop15])

Aus Abbildung 48 ist zu erkennen, dass der Einfluss des Salzbindergehalts sich mit der Normalspannung ändert. Während bei einer Normalspannung von 0,3 MPa die Spitzenfestigkeit von Probenkörpern mit 10, 15 und 20 Masse-% Salzbindergehalt deutlich zu unterscheiden waren, näherten diese sich bei einer Normalspannung von 0,5 MPa an. Es konnte keine eindeutige Korrelation zwischen Salzbindermenge und Versatzfestigkeit nachgewiesen werden.

Anhand der Versuchsergebnisse kann festgestellt werden, dass eine generelle Zunahme der Kohäsion mit steigendem Salzbindergehalt vorliegt. Diese Zunahme korreliert jedoch nicht mit dem Salzbindergehalt. Des Weiteren ist festzustellen, dass der Winkel der inneren Reibung mit zunehmendem Salzbindergehalt abnimmt. Die Abnahme ist zwischen 10 Masse-% Salzbinde und 15 Masse-% Salzbinde gering während bei einer Salzbindezugabe von 20 Masse-% eine signifikante Abnahme des Winkels der inneren Reibung vorliegt.

6.1.3.3 Einfluss des Probenalters auf die Scherfestigkeit

Mit zunehmenden Probenalter ist eine Zunahme der Scherfestigkeit zu erwarten. Dies ist mit einer fortschreitenden Salzmineralisationsneubildung an den Kornkontaktflächen zu erklären. Der Einfluss des Probenalters auf die Scherfestigkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials wurde durch die Untersuchung von sechs Wochen alten Probenkörpern sowie 52 Wochen alten Probenkörpern im Vergleich durchgeführt. Abbildung 49 stellt die Versuchsergebnisse dar.

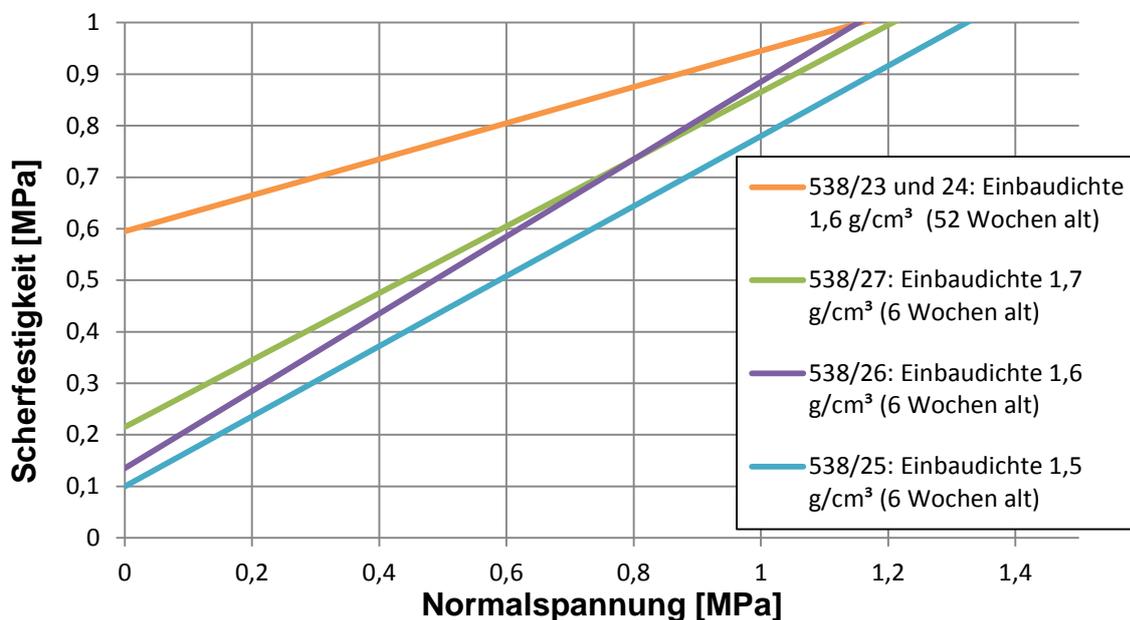


Abbildung 49: Vergleich der Scherfestigkeiten von Probenkörpern nach $t = 6$ Wochen und einem Jahr nach [Pop15]

Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Scherfestigkeit mit zunehmenden Probenalter zunimmt. Es sind die Scherfestigkeitsuntersuchungen von Probenkörpern des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials mit Korngemisch 1 sowie einem Probenalter von sechs Wochen im Vergleich zu einem Probenkörper mit Korngemisch 1 sowie einer vergleichbaren Einbaudichte von $1,6 \text{ g/cm}^3$ mit einem Probenalter von 52 Wochen dargestellt. Dabei zeigt sich eine Zunahme der Kohäsion von ca. $0,13 \text{ MPa}$ nach sechs Wochen auf ca. $0,60 \text{ MPa}$ nach 52 Wochen. Die bei der P-XRD-Analyse festgestellte Salzmineralneubildung konnte durch die Scherfestigkeitsuntersuchungen bestätigt werden. Die Umwandlung der Frühfestigkeit basierend auf der Syngenit- und Kainitbildung zur Langzeitfestigkeit durch die Polyhalitbildung konnte mit den Scherfestigkeitsuntersuchungen belegt werden.

Da die Festigkeitszunahme an die Salzmineralneubildung durch den Salz binder gekoppelt ist, endet diese, wenn die Salzmineralneubildung bzw. die Polyhalitbildung abgeschlossen ist. Eine Entwicklung der Versatzfestigkeit, die höher als das umgebende saline Gebirge ist, kann aus diesem Grund ausgeschlossen werden.

Der Reibungswinkel nahm bei zunehmendem Probenalter auf ca. $\varphi = 19^\circ$ ab. Dies ist mit der Umhüllung der gebrochenen Salzgruskörnung durch den Salz binder und in der Konsequenz mit den Salzmineralneubildungen zu erklären. Der Einfluss der Verzahnung von Salzgruskörnern miteinander wird verringert. Die verwendeten Feststoffphasen des Salz binders werden durch die Lösungsvorgänge aufgebraucht, sodass eine Verschiebung der Kornverteilung auftritt. Dies hat einen Einfluss auf die Schergerade.

Als Fazit der Untersuchungen des Einflusses des Probenalters kann gesagt werden, dass durch die fortschreitende Salzmineralneubildung und -umbildung eine Zunahme der Scherfestigkeit vorliegt. Dabei ist nach ca. einem Jahr eine Verdreifachung der Scherfestigkeit im Vergleich zu 6 Wochen zu erwarten. Aufgrund der Salzmineralbildungen zwischen dem Halitkorngefüge ist eine Abnahme des Winkels der Inneren Reibung zu erwarten.

6.1.3.4 Einfluss der spezifischen Salzgrusoberfläche auf die Scherfestigkeit

Durch eine Erhöhung der spezifischen Oberfläche des Salzgruskorn gemisches wird eine Zunahme der Scherfestigkeit aufgrund der Zunahme von Kornkontaktflächen zwischen den Halitkorngefüge erwartet. Die Erhöhung der spezifischen Oberfläche wird durch eine Verwendung des Korn gemisches 2 durchgeführt. Bei dem Korn gemisch 2 wird eine Feinsalzzugabe mit 20 Masse-% durchgeführt. Dabei werden die Ergebnisse der Scherfestigkeitsuntersuchungen des Korn gemisches 2 nach sechs Wochen mit den Ergebnissen der Scherfestigkeitsuntersuchungen mit dem Korn gemisch 1 im vergleichbaren Probenalter verglichen. Die Ergebnisse werden anschließend interpretiert.

Die Versuchsergebnisse sind in Abbildung 50 dargestellt.

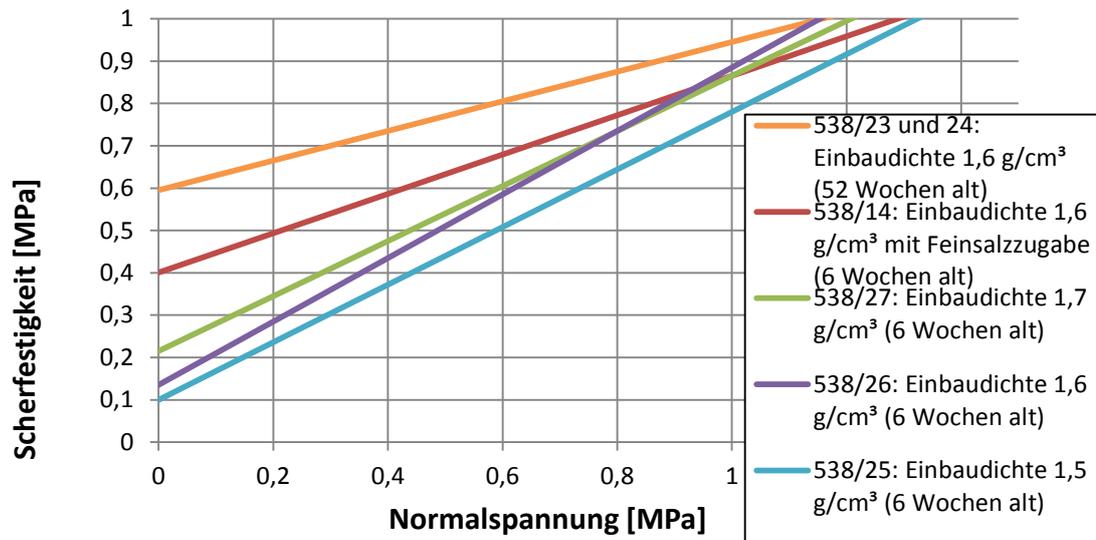


Abbildung 50: Einfluss der spezifischen Oberfläche auf die Scherfestigkeit von gefügestabilisiertem Salzgrusversatz nach [Pop15]

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, nimmt die Anzahl der stabilisierenden Kornkontaktflächen durch eine höhere spezifische Oberfläche zu. Nach sechs Wochen betrug die Kohäsion des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes mit einer Feinsalzzugabe 0,4 MPa. Dieses ist eine Verdoppelung im Vergleich zu Probenmaterial ohne Feinsalzzugabe mit einer vergleichbaren Einbaudichte. Sowohl die untersuchten Proben mit Feinsalzzugabe als auch die Proben ohne Feinsalzzugabe wurden bei einem vergleichbaren Probenalter untersucht.

Die Erhöhung des Feinkornanteils ging mit einer Verringerung des Reibungswinkels auf ca. $\varphi = 25^\circ$ einher. Dies ist mit der Abnahme an Verzahnungen durch die Auffüllung des Porenraums mit Feinkorn zu erklären.

Bei den Proben mit Feinsalzzugabe wird weiterhin eine Erhöhung der Festigkeit über die Zeit, wie bei den untersuchten Probenmaterialien ohne Feinsalzzugabe erwartet. Es ist davon auszugehen, dass nach einem Jahr eine Mindestfestigkeit vorliegt, die dem Wertebereich der Probenkörper ohne Feinsalzzugabe entspricht. Dies ist mit den Ergebnissen der P-XRD-Analyse zu begründen. Diese zeigte, dass eine vollständige Umwandlung der Zwischenphasen in die langzeitbeständige Mineralphase Polyhalit erfolgt. Somit wird jede Kornkontaktfläche, die durch den Salz binder benetzt wurde, durch den Polyhalit stabilisiert. Dies lässt vermuten, dass Probenkörper mit Feinsalzzugabe über eine höhere Endfestigkeit verfügen als Probenkörper ohne Feinsalzzugabe. Aufgrund der höheren Festigkeit ist hinsichtlich einer früher wirkenden Versatzfestigkeit die Zugabe von Feinsalz zu empfehlen.

Abschließend kann anhand der Scherfestigkeitsversuche eine optimale Rezeptur mit dem Korngemisch 2 sowie 15 Masse-% Salzbindergehalt vorgeschlagen werden.

6.2 Porositäts-Permeabilitätsbeziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

6.2.1 Grundlagen der Gasporosität und -permeabilität

6.2.1.1 Gasporosität

Poren stellen gas- oder flüssigkeitsgefüllte Hohlräume innerhalb eines Feststoffkörpers dar. Die Porosität spielt unter anderem eine zentrale Rolle bei der Charakterisierung der hydraulischen Eigenschaften von Böden und Gesteinen. Fluide können in einem offenporigen Medium innerhalb des Porenraums fließen. Hierfür müssen die entsprechenden Porenräume miteinander verbunden sein. Die Porosität errechnet sich nach Formel 11 [Bol121]:

$$n = \frac{V - V_k}{V} \quad (11)$$

n = Porosität [-]

V = Gesamtvolumen des Probenkörpers [m³]

V_k = Volumen der Festsubstanz [m³]

Bei der Messung der Porosität anhand einer Durchströmung mit einem Gas wird die gaszugängliche Porosität ermittelt. Die Analyse der gaszugänglichen Porosität beruht auf dem Gesetz von Boyle-Mariotte (Formel 12 [Pop15]), das den Zusammenhang zwischen den Volumen eines Gases bei Druckänderungen beschreibt.

$$v_a * p_a = v_b * p_b \quad (12)$$

v_a = Volumen im Zustand a [m³]

p_a = Druck im Zustand a [Pa]

v_b = Volumen im Zustand b [m³]

p_b = Druck in Zustand b [Pa]

Ist der Zustand (Volumen und Druck) eines Gases im Zustand a bekannt, kann durch Ermittlung des Drucks im Zustand b das zugehörige Volumen im Zustand b errechnet werden. Dies ermöglicht einen Rückschluss auf die Porosität n .

Zur Untersuchung der gaszugänglichen Porosität n des Versatzmaterials wurde ein Gas-Porosimeter verwendet. Die Untersuchungen wurden am Institut für Gebirgsmechanik in Leipzig durchgeführt. Das Funktionsprinzip des Porosimeters basiert auf dem genannten Gesetz von Boyle-Mariotte. Das Porosimeter besteht maßgeblich aus einem gasdicht-verschließbaren Drucktopf, in dem die zu untersuchenden Proben eingebaut wurden. Dieser Drucktopf weist ein bekanntes Referenzvolumen auf, das der Abmessung der in Kapitel 5 beschriebenen Probenkörper entspricht. Am Drucktopf sind zwei Druckspeicher angeschlossen. [Pop15]

Nach dem Einbau und luftdichten Verschluss der Probe in den Drucktopf, wurde der Drucktopf bis zur Druckkonstanz mit einem entsprechenden Druck p_a beaufschlagt. Nach Erreichen der Druckkonstanz wurde der Druckspeicher geöffnet und die im Drucktopf befindliche Druckluft strömte in einen der Speicher ein. Durch die Zuhilfenahme der bekannten Parameter Volumen (Drucktopf, Probe, Druckspeicher und Leitung) und dem Ausgangs- (p_a) und Enddruck (p_b) konnten die Porenvolumen in cm^3 errechnet werden. [Pop15]

6.2.1.2 Gaspermeabilität

Die Permeabilität k beschreibt die Durchlässigkeit für Fluide bzw. die hydraulische Leitfähigkeit eines porösen Materials. Fluide können in einem porösen Material durch miteinander verbundene Porenräume strömen. Die Durchflussmenge pro Zeiteinheit wird dabei nicht nur durch das spezifische Porenvolumen beeinflusst sondern ebenfalls durch die Porengröße, -form und die Vernetzung der Porenräume untereinander. Aus diesem Grund kann die Permeabilität von Gesteinen trotz gleicher Porosität variieren.

Die Messung der Permeabilität erfolgte mittels einer Messung der Durchflussrate q unter definierten Druckbedingungen. Anhand dieses Versuchsaufbaus konnte die Permeabilität nach Formel 13 ermittelt werden [Pop15]:

$$k = \frac{2 * p_0 * q_0 * \eta * l}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (13)$$

k = Permeabilität (m^2)

l = Länge der Probe (m)

- A = Querschnittsfläche (m²)
- η = dynamische Viskosität (Pa·s)
- q₀ = Flussrate unter Normaldruck (m³/s)
- p₀ = Druck bei Gasdurchflussmessung (N/m²)
- p₁ = Druck primärseitig (N/m²)
- p₂ = Druck sekundärseitig (N/m²)

Aufgrund des breiten Permeabilitätsbereiches, das während der Materialuntersuchungen im Labormaßstab ermittelt wurde, mussten zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet werden. Die Verwendung der entsprechenden Versuchsausrüstung ist von der zu erwartenden Permeabilität abhängig:

Permeabilität < 10⁻¹⁴ m²

Für Permeabilitäten < 10⁻¹⁴ m² wurde eine triaxial belastete Druckzelle verwendet. An der Ober- und Unterseite der zylindrischen Probe wurden an eine Druckleitung eingespannte Sinterplatten angeordnet, die eine gleichmäßige Durchströmung der Probe mit Stickstoff (N₂) gewährleisten. Die Messung der Gasdurchflussrate erfolgte bei dem Versuchsaufbau mittels Massendurchflussregler. Die verwendeten Durchflussregler begrenzten den messbaren Permeabilitätsbereich auf ≤ 10⁻¹⁴ m² und ≥ 10⁻²⁰ m². [Pop15]

Permeabilität > 10⁻¹⁴ m²

Da eine triaxiale Einspannung der Probenkörper mit $k > 10^{-14}$ m² aufgrund der geringen Injektionsdrücke nicht notwendig wurde, ist ein Versuchsaufbau mit Probenhalter und primärseitigem Durchflussregler sowie U-Rohr verwendet worden. Der zu untersuchende Probenkörper wurde einseitig mit einem Gasdruck beaufschlagt und der sich einstellende Staudruck anhand des U-Rohrs ermittelt. [Pop15]

Die Untersuchungen der Porosität und Permeabilität wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz GESAV-Phase 1“ am Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in einem unveröffentlichten vorläufigen Abschlussbericht „Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)“ zusammengefasst.

Die dort genannten Ergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit tiefergehend und im Kontext miteinander betrachtet.

6.2.2 Versuchsdurchführung

Ziel der Ermittlung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung im Einbauzustand war die Feststellung der hydraulischen Leitfähigkeit unmittelbar nach dem Einbau des Versatzmaterials unter Tage in Abhängigkeit von der Einbaudichte. Bei der Definition des Einbauzustandes wurde von einer Einbaudichte zwischen $1,5 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ ausgegangen. Die unterschiedlichen Einbaudichten resultieren aus der Abhängigkeit der Einbaudichte vom verwendeten Einbauverfahren. Da dies für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz zum Zeitpunkt der Berichterstellung und der labortechnischen Materialuntersuchungen nicht abschließend geklärt war, wurde sich für die Untersuchung des genannten Wertebereichs entschieden.

Es wurden Probekörper mit einer Variation der Einbaudichte sowie des Feinsalzanteils untersucht, um mögliche Einflussfaktoren auf die Porosität und Permeabilität festzustellen. Bei der Variation der Einbaudichte wurden Probekörper mit einer möglichst hohen Variation der Einbaudichte im Wertebereich von $1,5 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ produziert.

Neben der Variation des Feinsalzanteils sowie der Einbaudichte wurden auch Untersuchungen des Einflusses des Salzbindergehaltes auf die Versatzporosität und –permeabilität untersucht. In Tabelle 14 sind die untersuchten Probekörper mit der entsprechenden Zusammensetzung aufgeführt.

Die Probekörper wurden nach der ersten Festigkeitszunahme dem Institut für Gebirgsmechanik zugestellt, da eine Probenanalyse vorher aufgrund der fehlenden Probenstabilität nicht zielführend gewesen wäre. Das Probenalter zum Zeitpunkt der Analysen betrug ca. einen Monat. Wie im Rahmen der Phasen- und Gefügeuntersuchungen gezeigt wurde, ist innerhalb dieses Zeitraums die erste Festigkeitszunahme durch Salzmineralneubildungen abgelaufen, sodass von einem stabilen Salzgruskorngefüge gesprochen werden kann.

Tabelle 14: Auflistung der gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben für die Porositäts- und Permeabilitätsuntersuchungen (nach [Pop15])

| ohne Feinsalzzugabe | | | mit Feinsalzzugabe | | |
|---------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|
| Probenbezeichnung | Dichte [g/cm^3] | Salzbindergehalt [%] | Probenbezeichnung | Dichte [g/cm^3] | Salzbindergehalt [%] |
| | | | | | |

| | | | | | |
|--------|------|-------|--------|------|-------|
| 538/1 | 1,69 | 15,00 | 538/13 | 1,67 | 15,00 |
| 538/2 | 1,68 | 15,00 | 538/14 | 1,60 | 15,00 |
| 538/3 | 1,56 | 15,00 | 538/15 | 1,59 | 20,00 |
| 538/4 | 1,60 | 15,00 | 538/16 | 1,58 | 10,00 |
| 538/5 | 1,54 | 20,00 | 538/17 | 1,53 | 15,00 |
| 538/6 | 1,55 | 20,00 | 538/18 | 1,53 | 15,00 |
| 538/7 | 1,55 | 15,00 | 538/19 | 1,53 | 15,00 |
| 538/8 | 1,58 | 15,00 | 538/20 | 1,52 | 15,00 |
| 538/9 | 1,56 | 12,50 | 538/21 | 1,57 | 15,00 |
| 538/10 | 1,57 | 12,50 | 538/22 | 1,58 | 15,00 |
| 538/11 | 1,53 | 10,00 | | | |
| 538/12 | 1,54 | 10,00 | | | |

6.2.3 Ergebnisse der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung

6.2.3.1 Einbaudichte und Porenanteil

Beim Einbau des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes werden in Abhängigkeit von der verwendeten Einbauenergie unterschiedliche Einbaudichten erreicht. Die Anfangsporosität ist ebenfalls von der jeweiligen Einbaudichte abhängig. Die Einbaudichte variiert zwischen der lockersten und dichtesten Lagerung.

Die Einbaudichte ρ eines Materials errechnet sich nach Formel 14:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (14)$$

ρ = Einbaudichte [kg/m³]

m = Masse [kg]

V = Volumen [m³]

Anhand der Einbaudichten lässt sich der Porenanteil n des Versatzmaterials errechnen. Dies ergibt bei Verwendung der geringstmöglichen und höchstmöglichen Einbaudichte den korrelierenden Porenanteil. Die Berechnungsgrundlagen werden der Bodenmechanik entnommen. Bei bekanntem Wassergehalt, Einbaudichte und Korndichte des Versatzmaterials errechnet sich der Porenanteil n nach Formel 15 [Bol121].

$$n = 1 - \left(\frac{\rho}{(1 + w) * \rho_s} \right) \quad (15)$$

n = Porenanteil [-]

ρ = Einbaudichte [kg/m^3]

w = Wassergehalt [-]

ρ_s = Korndichte [kg/m^3]

Dabei ist der Wassergehalt w zu beachten, da in dem Versatzmaterial eine fünf molale MgCl_2 -Lösung vorliegt. Der Gesamtlösungsgehalt wird als Wassergehalt angenommen. Dies ist exakt betrachtet nicht vollkommen korrekt, da in der Bodenmechanik der Wassergehalt durch die vollkommene Trocknung des Materials bestimmt wird. Beim Trocknen des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes verdunstet das Wasser in der salinaren Lösung und aufgrund der daraus resultierenden Übersättigung der Lösung findet eine Auskristallisation der gelösten Salze statt und einer Änderung des Porenraums. Da allerdings durch die Rezeptur der exakte Lösungsgehalt eingestellt wird und daher bekannt ist, kann dieser hier als Wassergehalt w definiert werden.

Tabelle 15 stellt die entsprechenden Ergebnisse des Porenanteils bei der geringsten sowie bei der höchsten Einbaudichte dar.

Tabelle 15: Ober- und Untergrenze des Porenanteils des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes in Abhängigkeit von der Einbaudichte

| Einbaudichte [kg/m^3] | Porenanteil [-] |
|----------------------------------|-----------------|
| 1,30 | 0,44 |
| 1,68 | 0,28 |

Abbildung 51 stellt die nach Formel 15 rechnerisch ermittelte Dichte-Porositäts-Beziehung des Versatzmaterials dar. Wie Abbildung 51 zu entnehmen ist, nimmt die Porosität mit zunehmender Einbaudichte linear ab. Diese theoretisch ermittelte Dichte-Porositäts-Beziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes beruht allein auf den Korndichten der Ausgangsmaterialien. Zum Einbau des Versatzmaterials mit einer Porosität $n < 30\%$ ist eine Einbaudichte von $\rho > 1,64 \text{ g/cm}^3$ notwendig. Herkömmliche Salzgrusversatzmaterialien werden mit einer Anfangsporosität von $n > 35\%$ eingebracht [Krö09]. Dieses setzt bei dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz eine theoretische Einbaudichte von $\rho < 1,52 \text{ g/cm}^3$ voraus.

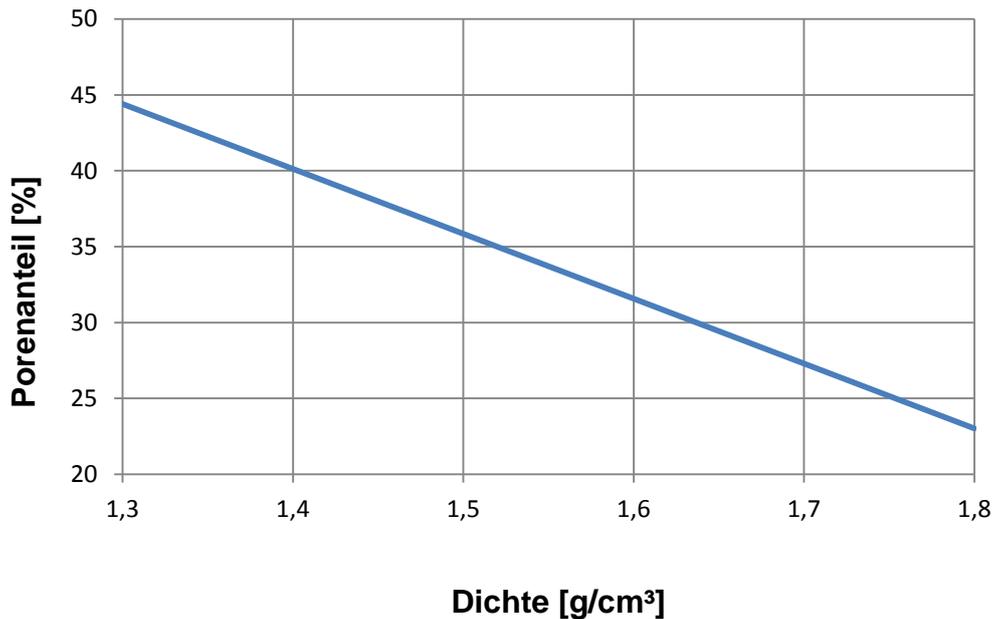


Abbildung 51: Theoretisch ermittelte Dichte-Porositäts-Beziehung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

6.2.3.2 Dichte-Porositätsbeziehung

Die Ermittlung der Dichte-Porositätsbeziehung wurde mittels Gas-Porosimeter durchgeführt. Bei den Untersuchungen wird die Porosität in Abhängigkeit von der Probenkörperdichte gemessen. Wie in Abbildung 52 zu erkennen ist, weisen die gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben mit und ohne Feinkorn einen linearen Zusammenhang zwischen Einbaudichte und Porosität auf.

In Kapitel 6.2.3.1 wurde die Porosität in Abhängigkeit von der Einbaudichte anhand der verwendeten Ausgangsstoffe nach Formel 15 ermittelt. Es ist zu erkennen, dass die theoretisch ermittelten Porositäten bei definierten Dichten von den praktisch gemessenen Werten abweichen. Die experimentell ermittelten Porositäten weisen einen geringeren Wert auf, als die rechnerisch ermittelten Porositäten für Einbaudichten $> 1,3 \text{ g/cm}^3$. Eine Einbauporosität von 35 % wird bereits bei einer Einbaudichte $< 1,45 \text{ g/cm}^3$ erreicht.

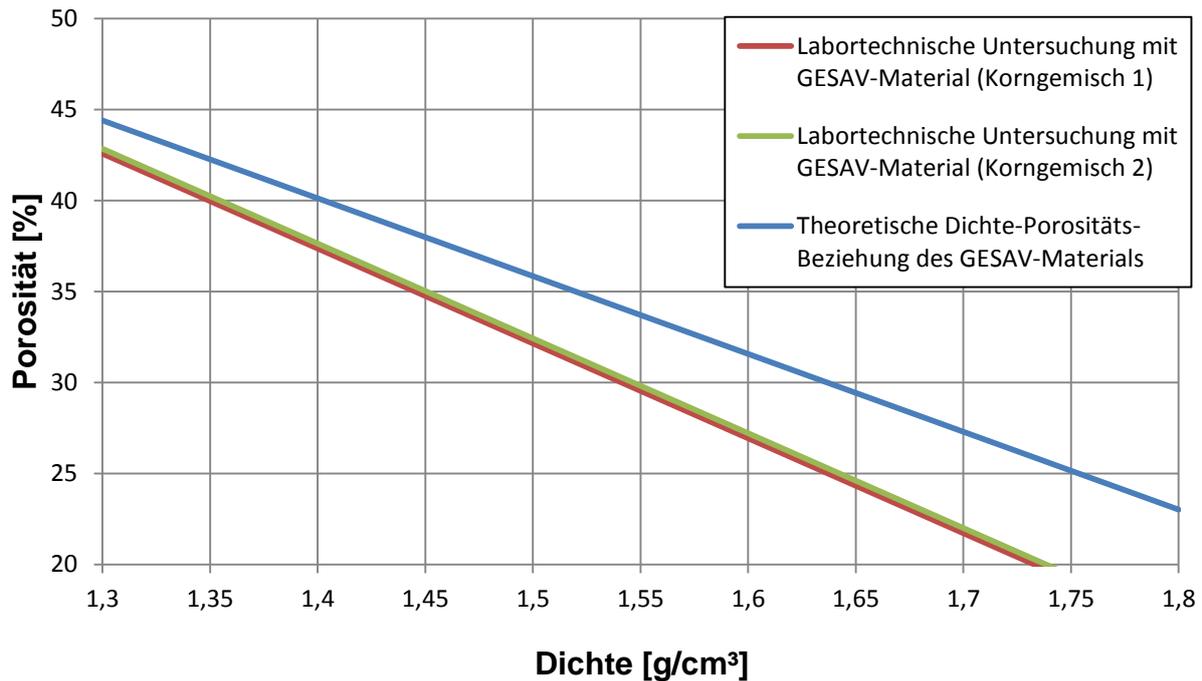


Abbildung 52: Labortechnisch ermittelte Porositäts-Dichte-Beziehung der in Tabelle 17 dargestellten Probenkörper im Vergleich mit der theoretisch ermittelten Dichte-Porositäts-Beziehung von gefügestabilisierten Salzgrusversatz [Pop15] - bearbeitet

Diese Abweichung des Ist-Zustands vom Soll-Zustand der Dichte-Porositäts-Beziehung ist auf den Einfluss der Salzmineralneubildung zurückzuführen. Wie bereits erwähnt, wurde bei dieser Porositätsmessung die gaszugängliche Porosität gemessen. Diese Porosität entspricht nicht notwendiger Weise der realen Porosität, da gegebenenfalls abgeschlossene Porenräume nicht für einen Fluidzutritt zur Verfügung stehen. Aufgrund der Salzmineralneubildung an den Kontaktflächen der Halitkörner können weitere Porenräume verschlossen werden. Diese verschlossenen Porenräume werden durch die Messmethodik nicht erfasst, da diese nicht für hydraulische Prozesse zur Verfügung stehen. Der Wert der gemessenen gaszugänglichen Porosität ist dementsprechend geringer als die reale Porosität des Probenkörpers. Wie in Abbildung 38 zu erkennen ist, bilden sich die neuen Salzmineralisationen flächenhaft und ein Verschluss von Poren zwischen Salzgruskörnern ist nicht auszuschließen. Darüber hinaus können Poren mit geringerem Volumen durch die Salzmineralneubildung schneller verschlossen werden als dies bei großen Poren der Fall ist.

Die höhere Abnahme der Porosität bei der experimentell ermittelten Porositäts-Einbaudichte-Beziehung im Vergleich zu der theoretischen Berechnung ist mit der Abnahme der Porengröße und der dichteren Packung der Halitkörner aneinander zu begründen. Ein Verschluss dieser Porenräume durch die neugebildeten Salzminerale

konnte schneller stattfinden, da die Volumen der zu verschließenden Zutrittsräume abnehmen.

Es ist zu beachten, dass bei der rechnerisch ermittelten Porosität der Wassergehalt aus dem Lösungsgehalt ermittelt wurde. Dies ist bereits ein kritisch zu berücksichtigender Faktor, da ein Unterschied zwischen der real gemessenen und rechnerisch ermittelten Dichte-Porositätsbeziehung besteht. Der Einfluss des Fehlers auf die ermittelten Werte wird jedoch als gering erachtet.

Aus den Ergebnissen der Dichte-Porositätsuntersuchungen kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die hydraulisch wirksame Porosität aufgrund der Salzmineralneubildung zusätzlich zur Abnahme des Porenanteils durch die Kompaktion verringert wird. Von Bedeutung für die Wirksamkeit des Versatzmaterials ist hierbei, dass eine Verfüllung der Porenräume nicht stattfindet, sondern der Verschluss der Zugänge zu den Porenräumen durch die Mineralneubildung. Die hydraulisch nutzbare Porosität wird somit durch die Mineralneubildung verringert. Dieses ist eine vorteilhafte Materialeigenschaft, die den Bau von Versatzkörpern unter Tage ermöglicht, die nicht nur durch die Versatzkompaktion sondern auch durch eine zeitabhängige Mineralneubildung eine Porositätsabnahme aufweisen.

Zu untersuchen war weiterhin, ob durch eine Kompaktion des Versatzmaterials diese hydraulische Isolation von Poren durch die Mineralneubildung bestehen bleibt oder die Zerstörung der neugebildeten Salzmineralisation zu einer Öffnung der Porenräume führt. Dieses wurde während der Kompaktions- und Kriechversuche untersucht und in Kapitel 6.3 vorgestellt.

Anhand der Einbaudichte ist eine definierte Porosität aufgrund des linearen Verhältnisses von Dichte und Porosität im Einbauzustand bestimmbar. Die Porosität von erstellten Versatzkörpern kann durch die Ermittlung der Einbaudichte definiert werden.

6.2.3.2 Porositäts-Permeabilitätsbeziehung

Die labortechnisch ermittelte Porositäts-Permeabilitätsbeziehung des Probenmaterials ist in Abbildung 53 dargestellt. Die blauen Rauten stellen die untersuchten gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben mit dem Korngemisch 1 und die roten Quadrate die Proben mit dem Korngemisch 2 dar. Die farblosen

Symbole stellen bereits untersuchte Salzgrusversatzmaterialien dar (siehe Legende).
 [Pop15]

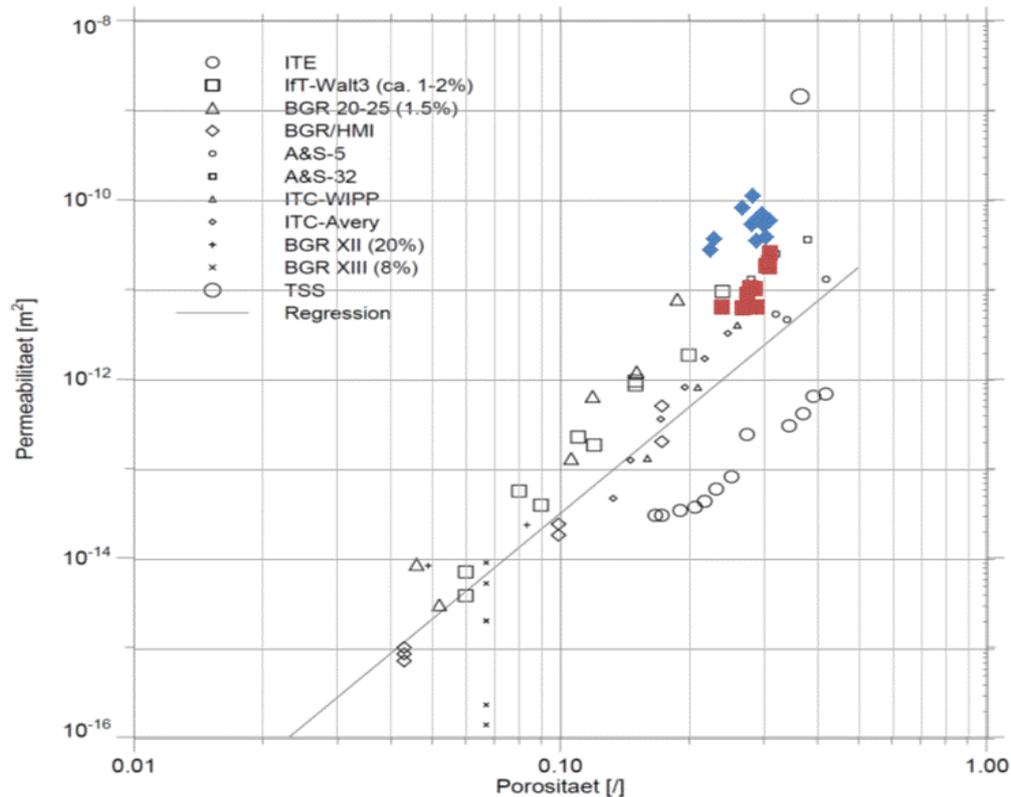


Abbildung 53: Darstellung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung von gefügestabilisierten Salzgrusversatz mit und ohne Feinsalzzugabe (übernommen aus [Pop15])

Abbildung 53 ist zu entnehmen, dass der Salzgrusversatz ohne Feinsalzzugabe (blau) im oberen Wertebereich der bekannten Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen liegt während das Versatzmaterial mit Feinsalzzugabe (rot) eine deutliche Verringerung der Permeabilität bei gleicher Porosität aufweist. Dieses Materialverhalten ist auf die Verringerung der durchschnittlichen Porengröße bei gleicher Porosität zurückzuführen.

Abbildung 53 zeigt darüber hinaus, dass durch eine Erhöhung des Feinkornanteils (< 1,0 mm) um 20 Masse-% die Permeabilität verringert wird. Trotz der Feinsalzzugabe liegt der Verlauf der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung weiterhin im oberen Wertebereich der bekannten Salzgruskornmischungen. Dieses ist mit einer geringeren Porenraumfüllung durch die fehlenden Korngrößen in der Kornverteilung des optimierten Salzgruskornmischungen zu begründen. Intermittierende Kornmischungen verfügen über fehlende Korngrößen, die für eine optimale Porenfüllung in einem idealen Kornmischungen notwendig sind.

Die Streubreite der Porositäts- und Permeabilitätswerte für das Korngemisch mit Feinsalz ist als geringer zu bezeichnen als für das Korngemisch ohne Feinsalz. Dies ist auf die statistisch gleichbleibende Korngröße der Feinsalzfraktion zurückzuführen, die im Vergleich zu den starken Schwankungen des Überkorns durch die Zugabe eine ausgleichende Wirkung auf die statistische Gleichförmigkeit des Korngemisches hat. Prozentual wird die Menge an Überkorn im Korngemisch 2 verringert.

6.3 Untersuchung des Kompaktions- und Kriechverhaltens

6.3.1 Grundlagen des Kompaktions- und Kriechverhaltens

Ein Ziel von Verfüllmaßnahmen in einem untertägigen Endlager im Salinar ist, die Wiederherstellung der Dichtwirkung der verfüllten Hohlräume im ewG. Dieses wird durch die Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit der verwendeten Versatzmaterialien erreicht. Aufgrund der äußeren Belastung kompaktiert das Korngefüge des Salzgrusversatzes. Durch die Prozesse Kornumorientierung, Korndeformation und Kornbruch findet eine Verringerung der Porosität und Permeabilität statt. Diese Materialparameter nähern sich über lange Zeiträume wieder denen des ungestörten salinaren Gebirges an. [Krö09]

Die Kompaktion sowie die daraus folgende Abnahme der Porosität und Permeabilität von Salzgrus sind maßgeblich von den folgenden Faktoren abhängig: [Krö09] [Stü11]

- Kornverteilung
- Feuchtigkeitsgehalt
- Belastungsregime
- Temperatur

Die isostatischen Kompaktionsversuche wurden durchgeführt, um eine Aussage über das Verformungsverhalten des Versatzmaterials unter Druckbelastung zu ermöglichen. Hinsichtlich der Gebirgsstabilisierung ist die Volumenveränderung bei einer frühzeitigen Belastung von Interesse. Darüber hinaus wurde die Porositätsabnahme mit fortschreitender Versatzkompaktion analysiert.

Durch Langzeitkompaktionsversuche wurde des Kriechverhaltens des Versatzmaterials unter konstanter Belastung über die Zeit untersucht. Im Unterschied zu den isostatischen Kompaktionsuntersuchungen stand bei diesen Untersuchungen das Langzeitverhalten des Versatzmaterials im Vordergrund, um eine möglichst realitätsnahe Kompaktion des Versatzmaterials durch das Aufkriechen des

umgebenden salinaren Gebirges zu simulieren. Dies ist im Labormaßstab aufgrund der teilweise sehr geringen Konvergenzraten in situ nur bedingt möglich.

Die Untersuchungen des Kompaktions- und Kriechverhaltens wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz GESAV-Phase 1“ am Institut für Gebirgsmechanik GmbH in Leipzig durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im unveröffentlichten vorläufigen Abschlussbericht „Ermittlung von mechanischen Parametern an gefügestabilisiertem Salzgrusversatz (GESAV)“ zusammengefasst. Die dort genannten Ergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit tiefergehend und im Zusammenhang miteinander betrachtet.

6.3.2 Isostatische Kompaktionsversuche

6.3.2.1 Versuchsaufbau

Zur Durchführung des isostatischen Kompaktionsversuchs wurde der in Abbildung 54 [Pop15] dargestellte Versuchsaufbau verwendet. Bei diesem Versuchsaufbau wurde neben dem Kompaktionsverhalten auch die Abnahme der Porosität und der Permeabilität ermittelt. Die Kompaktion wird in Abhängigkeit von der Porositäts- und Permeabilitätsabnahme aufgetragen.

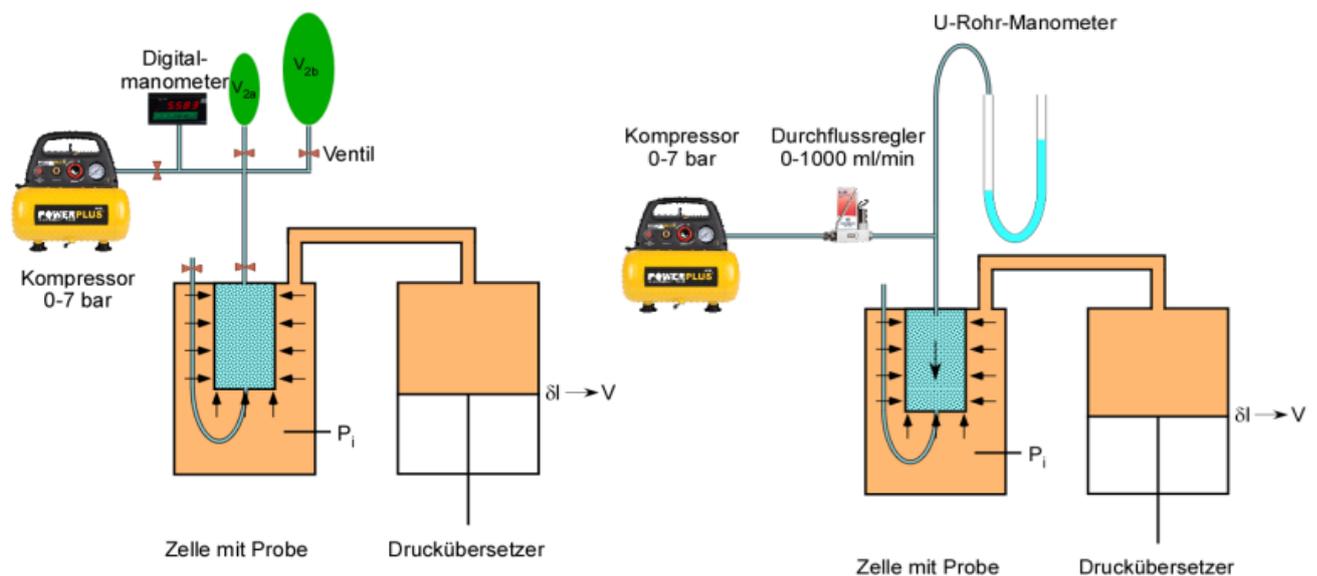


Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Ermittlung des isostatischen Kompaktionsversuchs mit Permeabilitätsmessung (links) und Porositätsmessung (rechts) - übernommen aus [Pop15]

Die Versuchsanlage bestand aus einem Druckübersetzer zur Erzeugung der entsprechenden Belastungsdrücke in der angeschlossenen Probenkammer, der mit einem undurchlässigen Gummimantel abgedichteten Probe, einem Kompressor zur

Durchströmung der kompaktierenden Probe sowie einem Durchflussregler zur Einstellung der Durchflussrate. Zu diesem Grundaufbau der Versuchsanordnung wurden zusätzliche Änderungen für die Messung der Porosität und der Permeabilität notwendig. [Pop15]

Die Proben wurden nach dem Einbau durch eine kontinuierliche Druckerhöhung (Druckrampe) mit bis zu 20 MPa belastet. Aufgrund der Kompaktion fanden eine Volumenverformung sowie eine Abnahme der Porosität statt. Diese Effekte wurden messtechnisch erfasst und in Abhängigkeit zueinander dargestellt. Während der Kompaktion der Probe wurde diese mit einem Messfluid durchströmt. Die Messung des Fluiddrucks sowie des Volumenstroms erlaubt Rückschlüsse auf die Permeabilität und Porosität des Probenmaterials. [Pop15]

6.3.2.2 Versuchsdurchführung

Im isostatischen Kompaktionsversuch wurden vier voneinander unabhängige Probenkörper analysiert. Die Zusammensetzung der Probenkörper ist in Tabelle 16 dargestellt. Die Probenbezeichnung wird [Pop15] entnommen.

Tabelle 16: Zusammensetzung der verwendete Probenkörper im isostatischen Kompaktionsversuch (nach [Pop15])

| Probenbezeichnung | Feinkornanteil [Masse-%] | Salzbindergehalt [Masse-%] | Einbaudichte [g/cm ³] |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 538: Salzgrus | 0 | 0 | 1,30 |
| 538 - GESAV | 0 | 10 | 1,61 |
| 538/7 - GESAV 1 | 0 | 15 | 1,55 |
| 538/22 - GESAV 2 | 20 | 15 | 1,58 |

Zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Versatzkompaktion wurden unterschiedliche Zusammensetzungen des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes mit reinem Salzgrus verglichen. Aufgrund der Abhängigkeit des Kompaktionsverhaltens von dem Flüssigkeitsgehalt im Salzgrus, wurde sich neben den in Kapitel 4 genannten Rezepturansätzen mit 15 Masse-% Salzbinder für eine Verringerung des Salzbindergehaltes auf 10 Masse-% entschieden.

Bei der Probenherstellung wurde versucht eine Einbaudichte der gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben von 1,6 g/cm³ zu erreichen. Tabelle 16 ist zu entnehmen, dass dieses mit einer Abweichung von ca. 0,05 g/cm³ umgesetzt wurde. Die

Abweichung konnte einen Einfluss auf den Schnittpunkt der Druck-Volumenverformungs-Kurve mit der Ordinatenachse haben. Der Kurvenverlauf wurde durch den Einbaudichtenunterschied nicht unmittelbar beeinflusst.

Darüber hinaus wurde die Porositäts- und Permeabilitätsabnahme während der Versatzkompaktion ermittelt. Dies ist für eine Beschreibung des hydraulischen Kompaktionsverhaltens von Bedeutung. Somit kann eine Aussage über die Dichteigenschaften des Versatzmaterials getätigt werden.

Die Belastung wurde durch eine „Druckrampe“ unmittelbar auf einen Maximaldruck von 20 MPa erhöht. Die Druckerhöhung lief im Zeitraum von 300 Minuten ab. Durch diese Druckbelastung begann das Probenmaterial zu kompaktieren. Hierbei sind die Volumenverformungen der Probenmaterialien als Merkmal für den Versatzwiderstand zu berücksichtigen. Zu Beginn hohe Verformungen deuten auf einen geringeren Versatzwiderstand hin, da bereits bei geringem Druck eine Bewegung des Korngefüges stattfindet. Ab 20 MPa wurde die Belastung konstant gehalten. Durch visko-plastische Verformungsvorgänge findet ein Abbau der in das Probenmaterial eingebrachten Spannung statt. Als Ergebnis werden die erreichten Endporositäten der unterschiedlichen Probenmaterialien unter Berücksichtigung der Gesamtdeformation miteinander verglichen.

6.3.2.3 Versuchsergebnisse

In Abbildung 55 sind die Ergebnisse der Druckerhöhung (Druckrampe) im isostatischen Kompaktionsversuch dargestellt. Aufgetragen ist der Zusammenhang zwischen Volumenverformung der Probenkörper und Druckerhöhung auf den Maximaldruck von 20 MPa.

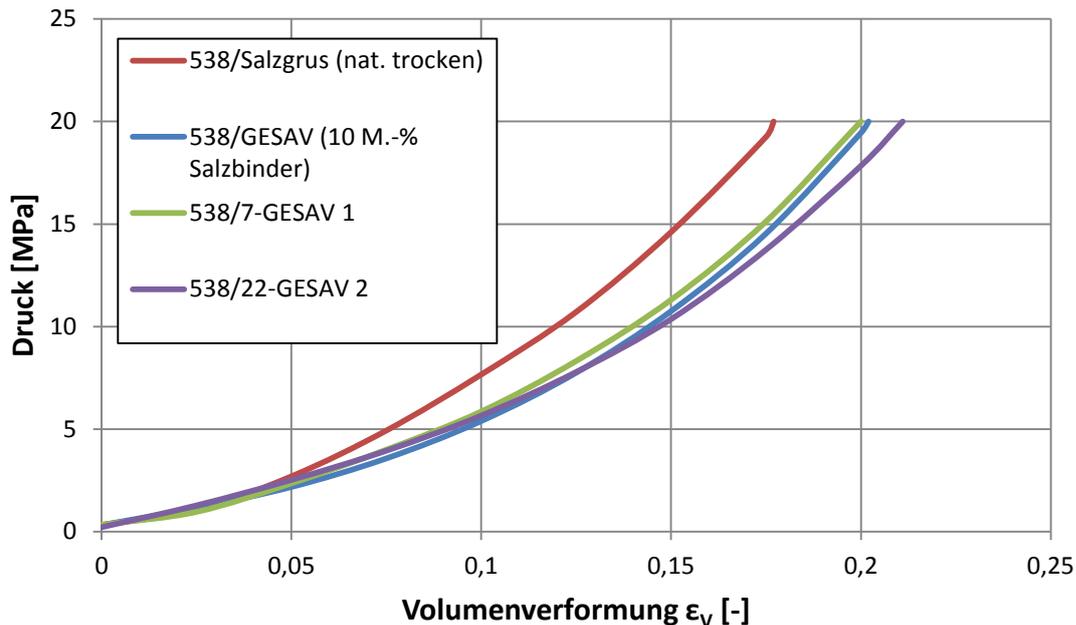


Abbildung 55: Darstellung der Volumenverformung innerhalb der Druckrampe im isostatischen Kompaktionsversuch bis zum Erreichen von 20 MPa nach [Pop15]

Abbildung 55 ist zu entnehmen, dass reiner Salzgrusversatz ohne Salz binder eine, im Vergleich zu den untersuchten gefügestabilisierten Salzgrusversatzproben, geringere Volumenverformung bis zum Erreichen des Belastungsmaximums von 20 MPa aufweist. Dies korreliert mit den im Forschungsvorhaben REPOPERM [Krö09] ermittelten Versuchsergebnissen. Nach [Krö09] und [Stü11] führt eine Feuchtigkeitserhöhung im Salzgrusversatz zu einer Abnahme des Versatzwiderstands und Erhöhung der Gesamtdeformation. Anhand der Ergebnisse in Abbildung 55 kann angenommen werden, dass nach einer ausreichend hohen Deformation die gefügestabilisierende Wirkungsweise der neugebildeten Salzmineralisationen zerstört wurde. Anschließend trat hinsichtlich der Kompaktierbarkeit ein Materialverhalten ein, das mit dem von herkömmlichem Salzgrus zu vergleichen ist.

Die Volumenverformungen der untersuchten GESAV-Proben 538/7 – GESAV 1 (15 Masse-% Salz bindergehalt) sowie 538 - GESAV (10 Masse-% Salz bindergehalt) wiesen vergleichbare Werte auf. Dies lässt die Vermutung zu, dass der unterschiedliche Salz bindergehalt von fünf Masse-% einen geringen Einfluss auf die Gesamtverformung der Probenkörper ausübte. In Abbildung 55 ist zu erkennen, dass die Volumenverformung des Korngemisches 1 geringer war als im Vergleich zum Korngemisch 2. Dieses Verhalten ist auf den fehlenden Feinkornanteil im Korngemisch zurückzuführen. Eine Korndeformation ist unter Belastung bei geringen Korngrößen eher zu erwarten als bei größeren Korndurchmessern.

Wie in [Pop15] aufgezeigt wurde, war im Gegensatz zu der Gesamtdeformation bei genauerer Betrachtung des Anfangsbereichs von $\varepsilon_v = 0,00$ bis 0,05 ein höherer Versatzwiderstand bei der GESAV-Probe 538/22 – GESAV 2 (20 Masse-% Feinsalz und 15 Masse-% Salzbinder) vorhanden. Abbildung 56 stellt eine Vergrößerung des Anfangsbereichs dar. Dieses spiegelt die höhere Versatzfestigkeit der Probenkörper mit dem Korngemisch 2 wieder. Der aufzuwendende Druck bis zum Erreichen der Volumenverformungen von $\varepsilon_v = 0,04$ war bei dem gefügestabilisierten Salzgrus mit dem Korngemisch 2 am höchsten.

Nach dem Überschreiten von $\varepsilon_v = 0,04$ stieg der benötigte Druck zum Erreichen einer Volumenverformung bei den gefügestabilisierten Salzgrusprobe im Vergleich zum herkömmlichen Salzgrus am geringsten an. Dies belegt eine vorteilhafte Kompaktierbarkeit des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes. Dies gilt insbesondere für Probenmaterial mit einem hohen Feinsalzgehalt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass im Bereich von $\varepsilon_v = 0,00$ bis 0,06 ein linearer Anstieg der Volumenverformung in Abhängigkeit vom Druck für die Probe 538/22 – GESAV 2 vorlag.

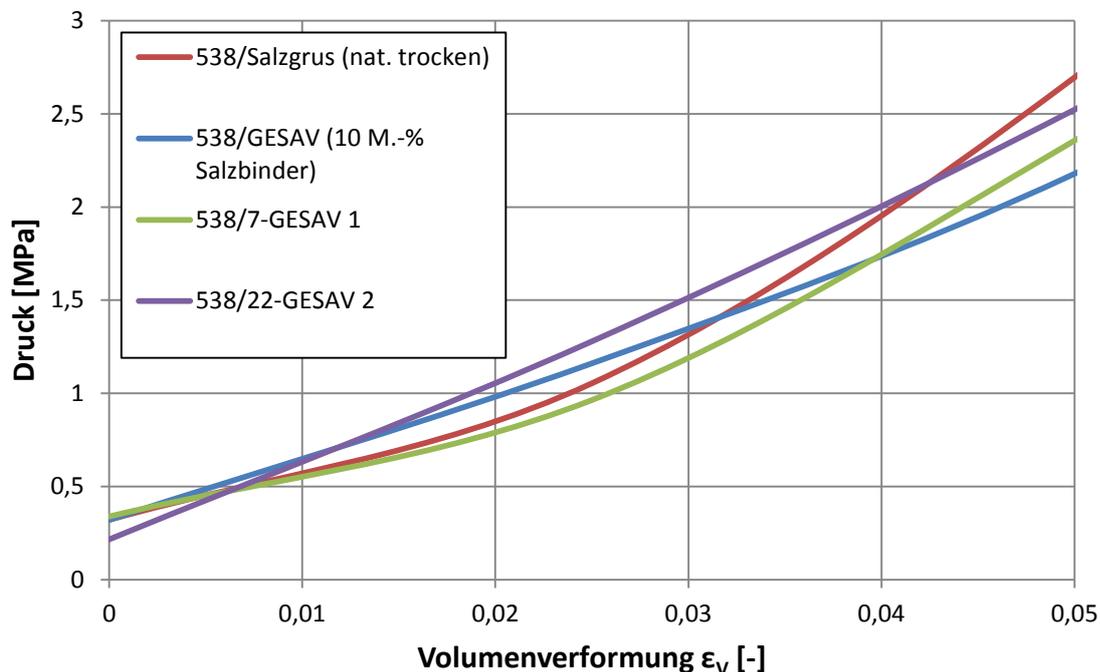


Abbildung 56: Vergrößerung des Anfangsbereichs des isostatischen Kompaktionsversuchs nach [Pop15]

Die in Abbildung 56 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass mit dem durch Feinkorn ergänzten gefügestabilisierte Probenmaterial eine frühere Gebirgsstabilisierung zu erreichen ist. Zu Beginn war die Lastaufnahmefähigkeit für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz mit Feinsalzzugabe höher als im Vergleich zu herkömmlichen

Salzgrus. Die in den Versuchen ermittelte Volumenverformung der gefügestabilisierten Salzgrusproben war ausgeprägter als im Vergleich mit herkömmlichem Salzgrus.

Abbildung 57 stellt die druckbedingte Abnahme der Porosität der im isostatischen Kompaktionsversuch untersuchten Probenkörper dar. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Kompaktion des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials, unabhängig von der exakten Rezeptur, eine optimierte Abnahme der Porosität aufwies. Dabei wies vor allem die Rezeptur mit dem Korngemisch 1 und 15 Masse-% Salz binder die höchste Porositätsabnahme während der Druckrampe auf. Bei einer konstanten Belastung zeigte der Rezepturansatz mit Korngemisch 2 (höherer Feinsalzgehalt) sowie 15 Masse-% Salz binder eine höhere Abnahmerate der Porosität. Diese Rezeptur erreichte darüber hinaus in den durchgeführten isostatischen Kompaktionsversuchen die geringste Endporosität von ca. 4,0 %. [Pop15]

Der naturtrockene Salzgrusversatz wies eine vergleichbare Druck-Porositätsbeziehung auf wie der gefügestabilisierte Salzgrusversatz mit dem Rezepturansatz Korngemisch 1 und 10 Masse-% Salz binder. Dies ist auf die geringere Anzahl neugebildeter Salzmineralisationen zurückzuführen.

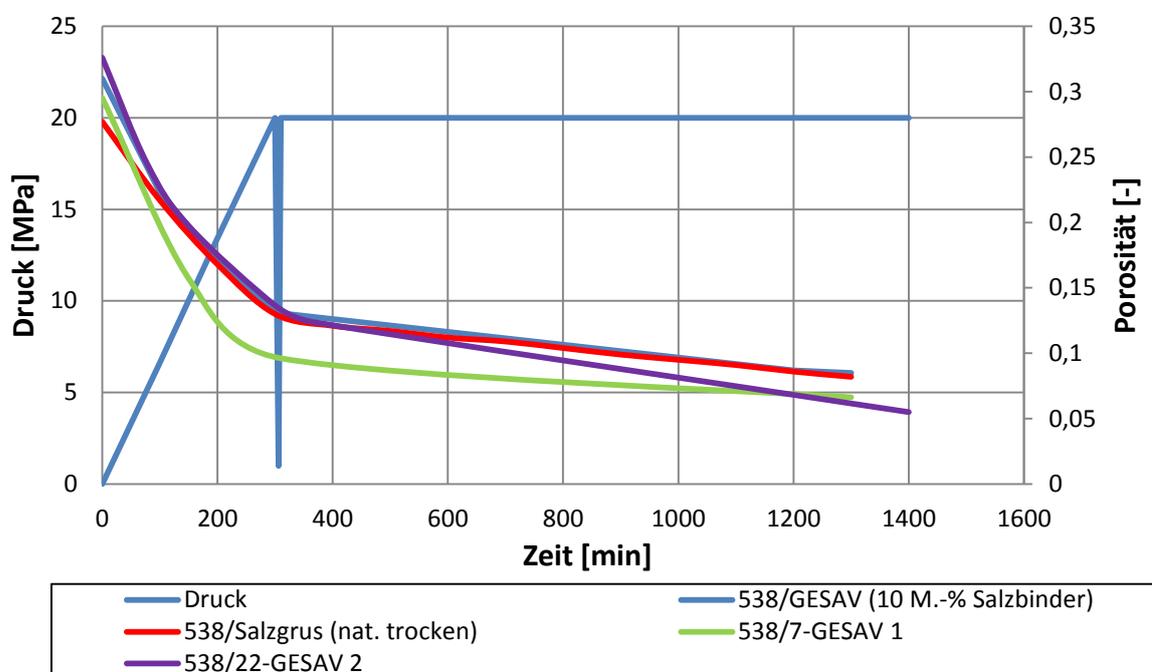


Abbildung 57: Porositätsabnahme des Probenmaterials während der isostatischen Kompaktion [Pop15] - bearbeitet

Anhand der Ergebnisse aus Abbildung 57 kann festgestellt werden, dass aufgrund der äußeren Belastung eine beschleunigte Abnahme der Porosität bei dem

gefügestabilisierten Salzgrusversatz auftrat als im Vergleich zu herkömmlichen Salzgrusversatz. Dies setzte eine ausreichende Salzbindermenge im gefügestabilisierten Salzgrusversatz von > 10 Masse-% voraus.

Während der Volumenverformung wurde die Permeabilität der untersuchten Probenmaterialien 538/7 – GESAV 1 und 538/22 – GESAV 2 gemessen. Abbildung 58 stellt die ermittelte Permeabilitätsänderung grafisch dar. [Pop15]

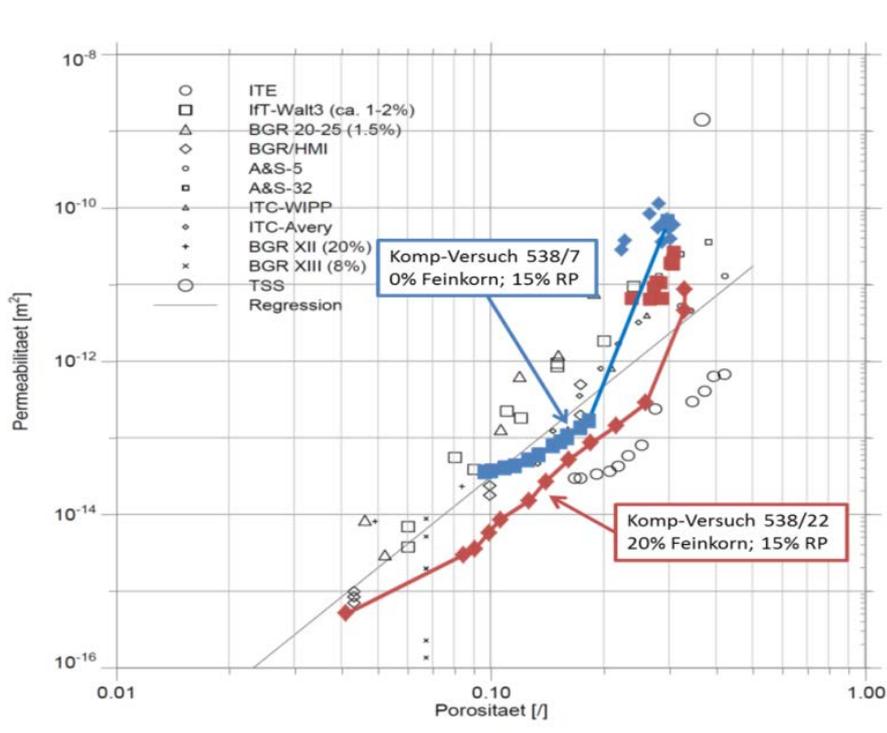


Abbildung 58: Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung während der Kompaktion von gefügestabilisierten Salzgrusversatz - übernommen aus [Pop15]

Wie in Kapitel 6.1 aufgezeigt wurde, lag die Permeabilität von gefügestabilisierten Salzgrusversatz mit einer Einbaudichte von $\rho < 1,7 \text{ g/cm}^3$ im oberen Wertebereich der bekannten Salzgruskornmische. Durch eine Kompaktion und der damit einhergehenden Porositätsabnahme wurde die Permeabilität des Versatzmaterials signifikant verringert. Abbildung 58 ist zu entnehmen, dass die Permeabilitätsabnahme zu Beginn einer Kompaktion im Vergleich zu bekannten Salzgruskornmischen signifikant abnimmt. Dabei zeichnete sich der gefügestabilisierte Salzgrusversatz mit dem Kornmisch 2 durch eine im Vergleich zu bekannten Salzgrusversatzmaterialien hohe Permeabilitätsverringeringung aus. Dieses Materialverhalten ist vor allem durch die Abnahme der Porengröße durch den zusätzlichen Feinkornanteil im Kornmisch zurückzuführen.

Ein Erklärungsansatz für die signifikante Permeabilitätsabnahme des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im Vergleich zu herkömmlichen Salzgruskorngemischen ist der Verschluss von Porenräumen durch Salzmineralneubildungen. Wie in den REM-Aufnahmen zu erkennen ist, bildeten sich Salzmineralneubildungen auf den Halitkornoberflächen aus und wuchsen mit benachbarten Salzmineralneubildungen zusammen. Durch dieses Zusammenwachsen wurden Porenräume für einen Fluidzutritt verschlossen. Es ist davon auszugehen, dass diese Abschirmung der Poren von Fluidbewegungen auch bei einer anschließenden Kompaktion erhalten blieb. Trotz der Salzmineralzerstörung bedingt durch die äußere Belastung verbleiben die neugebildeten Salzmineralphasen am Bildungsort und verringern so die hydraulische Leitfähigkeit.

Dieses Materialverhalten wirkt sich positiv auf die Verringerung der Permeabilität von verfüllten Hohlraumquerschnitten aus. Eine frühzeitige Verringerung der Permeabilität der verfüllten Hohlräume ist durch die Verwendung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes möglich. Die Verwendung des Korngemisches 2 hinsichtlich einer frühzeitigen hydraulischen Dichtwirkung ist anhand der Ergebnisse zu empfehlen.

Zu diskutieren ist der Einfluss der Zweiphasenströmung bei der Messung der Permeabilität bei geringen Porositäten. Durch das Durchströmen von Porenräumen innerhalb eines Korngemisches mittels Stickstoff werden darin potentiell enthaltene Flüssigkeiten bewegt. Dies hat einen Einfluss auf die gemessene Gaspermeabilität zur Folge. Um diesen Zweiphasenfluss zu unterbinden, sollte mit einer gesättigten Lösung gemessen werden. Wie in [Krö09] aufgezeigt und in [Wie12] diskutiert, fallen die für das Messfluid Lauge ermittelten Permeabilitäten im Regelfall geringer aus als für Gas auch bei geringen Porositäten. Eine Vermutung ist, dass eine Verwendung des Messfluids Lauge die ermittelten Werte der Permeabilität für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz weiter verringern. Für eine endgültige Aussage zu dieser Problematik ist eine Permeabilitätsanalyse mittels Lösung zu empfehlen.

6.3.3 Triaxialer Langzeitkriechversuch

6.3.3.1 Versuchsaufbau

Aufgrund der in realen Bedingungen eines Endlagers langsam ablaufenden Konvergenz des Salinars und der dementsprechend langsam fortschreitenden

Belastung des Versatzmaterials, wurden Langzeitkompaktionsversuch über einen Zeitraum von 90 Tagen durchgeführt.

Zur Untersuchung des Langzeitkriechverhaltens von gefügestabilisierten Salzgrusversatz wurde die in Abbildung 59 dargestellte Versuchsanordnung verwendet. Zur exakten Messung der Werte wurden LEO Manometer des Herstellers Keller verwendet. [Pop15]

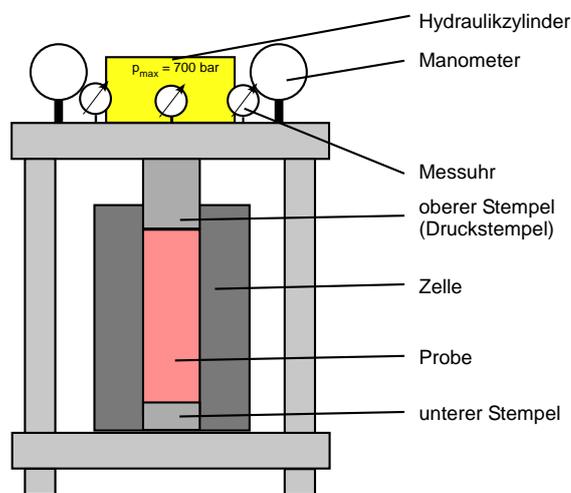


Abbildung 59: Versuchsaufbau zur Durchführung des triaxialen Langzeitkriechversuchs - übernommen aus [Pop15]

Der zu untersuchende Probenkörper wurde in die Versuchszelle der Versuchsanordnung eingebaut. Anschließend fand eine triaxiale Belastung des Probenkörpers statt, die mit einer Kompaktion einherging. Die vertikale Längenänderung wurde durch drei um 120° versetzte Messwertaufnehmer erfasst und anhand der Annahme, dass die Volumenkompaktion mit der dreifachen Längsdehnung übereinstimmt, wurde die Volumendeformation in Abhängigkeit von der Belastung ermittelt. Diese Annahme resultierte aus der gleichen triaxialen Belastung ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) des Versatzmaterials. [Pop15]

Die zu untersuchenden Probenkörper wurden mittels einer Druckrampe belastet. An die Druckrampe schloss ein mehrstufiges Belastungsregime an. Bei diesem wurden Druckniveaus über einen Zeitraum von 15 d bis 20 d gehalten. Anschließend wurde der Druck auf das nächsthöhere Niveau angehoben und für den genannten Zeitraum gehalten. Es ist davon ausgegangen worden, dass innerhalb der einzelnen Druckphasen das Versatzmaterial kompaktiert. Zu Beginn der einzelnen Druckphasen wurde eine hohe Kompaktionsrate erwartet, die aufgrund der viskoplastischen Materialeigenschaften mit fortschreitender Zeit abnimmt.

Während der Versuchsdauer wurde die Längenänderung des Versatzmaterials gemessen. Diese Volumenänderung wird über den Versuchszeitraum und Druckbelastungen aufgetragen.

6.3.3.2 Versuchsdurchführung

Im triaxialen Langzeitkriechversuch wurden vier Proben untersucht. Die Zusammensetzungen der Proben sind in Tabelle 17 dargestellt. Die Probenbezeichnungen wurden [Pop15] entnommen.

Tabelle 17: Verwendete Probenkörper im triaxialen Langzeitkriechversuch (nach [Pop15])

| Probenbezeichnung | Feinkornanteil [Masse-%] | Salzbindergehalt [Masse-%] | Einbaudichte [g/cm ³] |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| 538/TCC1 | 20 | 20 | 1,56 |
| 538/TCC2 | 20 | 20 | 1,55 |
| 538/TCC4 | 20 | 15 | 1,56 |
| 538/TCC5 | 20 | 15 | 1,59 |

Aufgrund der in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Untersuchungsergebnisse wurde die Versatzrezeptur mit 20 Masse-% Feinsalz verwendet. Zur Untersuchung des Salzbindergehaltes wurden die GESAV-Rezepturen mit 15 Masse-% sowie 20 Masse-% Salzbinder fokussiert. Es sollte der Einfluss eines erhöhten Flüssigkeitsgehaltes im Salzgrusmaterial herausgestellt werden, da wie in [Krö09] herausgestellt wurde, eine Erhöhung des Flüssigkeitsgehaltes zu einer beschleunigten Kompaktion von Salzgrusversatzmaterialien führt. Dieses wurde durch eine Erhöhung des Salzbindergehaltes umgesetzt.

6.3.3.3 Versuchsergebnisse

Die Untersuchung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im triaxialen Langzeitkriechversuch ist in Abbildung 60 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Proben mit unterschiedlichem Salzbindergehalt in ihrem Kompaktions- und Kriechverhalten unterscheiden.

Aus Abbildung 60 ist zu entnehmen, dass gefügestabilisierte Salzgrusproben mit 20 Masse-% Salzbindergehalt einer sofortigen Kompaktion unterlagen. Die Volumenverformung war durch eine Abnahme der Porosität gekennzeichnet. Die Porositätsabnahme trat unmittelbar nach Belastungsbeginn ein. Dies kann mit dem

Einfluss der salinaren Lösung im Korngefüge erklärt werden. Durch die Zugabe von 20 Masse-% Salzbinder betrug der Lösungsgehalt des Versatzmaterials ca. 5,3 Masse-%. Im Vergleich hierzu betrug der Lösungsgehalt bei einer Zugabe von 15 Masse-% Salzbinder ca. 3,9 Masse-%. Dies verdeutlicht den in [Krö09] aufgezeigten Einfluss des Lösungsgehaltes auf das Kriech- und Kompaktionsverhalten von Steinsalz. Zwar wurden durch den Salzbinder gefügestabilisierende Salzmineralisationen gebildet, jedoch bildete die Lösungsmenge gleichzeitig einen Flüssigkeitsfilm an den Salzoberflächen, der die Reibungskräfte verringert. Durch den erhöhten Salzbindergehalt konnten keine zusätzlichen Kornkontaktflächen benetzt werden.

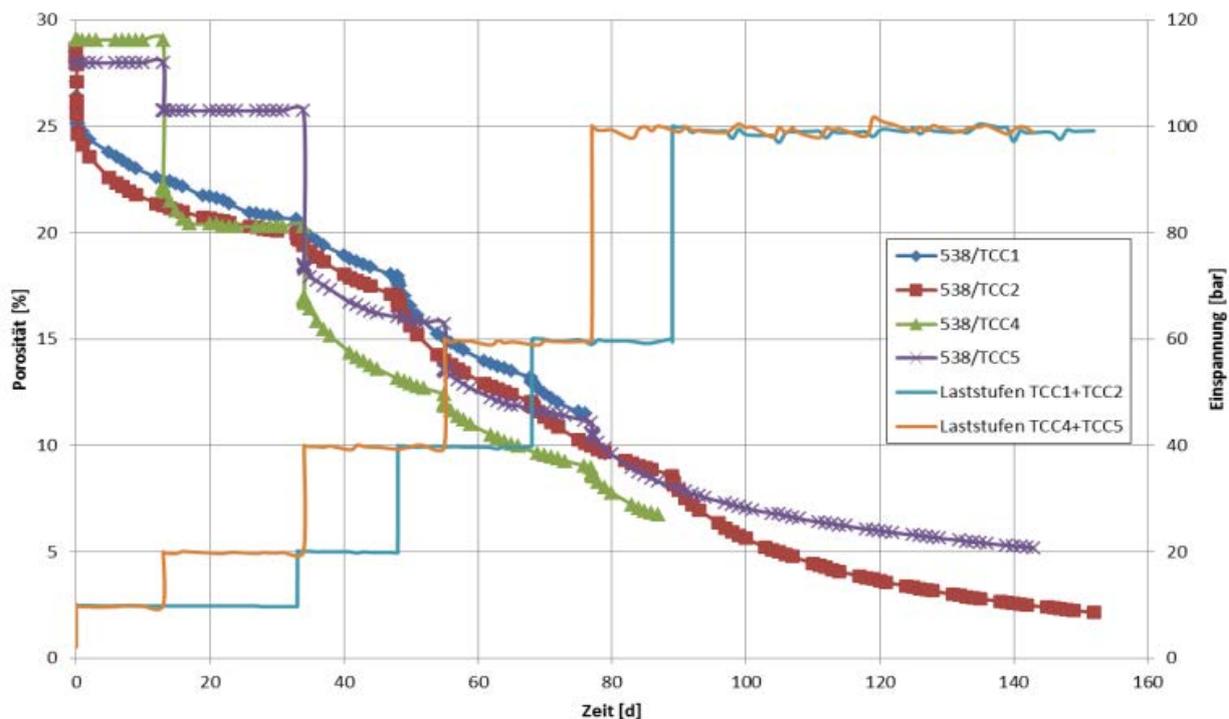


Abbildung 60: Kompaktions- und Kriechverhalten von gefügestabilisierten Salzgrusproben mit unterschiedlichen Salzbindergehalt - übernommen aus [Pop15]

Im Vergleich zu den Probenkörpern mit 20 Masse-% Salzbindergehalt, zeigten die untersuchten gefügestabilisierten Salzgrusproben mit 15 Masse-% Salzbindergehalt eine verzögerte Porositätsabnahme nach Belastungsbeginn. Die Porosität der Proben 538/TCC4 und 538/TCC5 blieb sowohl bei der ersten Laststufe von 10 bar (1,0 MPa) und auch bei der zweiten Laststufe von 20 bar (2,0 MPa) in einem engen Wertebereich über die konstante Belastungszeit. Bei der zweiten Laststufenerhöhung (von 1,0 MPa auf 2,0 MPa) zeigten die Proben ein unmittelbares Kompaktieren und hielten anschließend eine konstante Porosität. Die Probe 538/TCC4 kompaktierte stärker als die Vergleichsprobe 538/TCC5, zeigte aber ein vergleichbares Materialverhalten hinsichtlich der Bildung eines konstanten Porositätsbereichs. Nach

der dritten Lasterhöhung im triaxialen Langzeitkriechversuch auf 30 bar (3,0 MPa) glichen sich die Probenkörper mit 15 Masse-% Salzbindergehalt dem Materialverhalten der Probenkörper mit 20 Masse-% Salzbindergehalt an.

Ein Interpretationsansatz dieses Materialverhaltens ist die Zerstörung von gefügestabilisierenden Salzmineralbrücken im Salzgrusgefüge. Bei Eintritt einer triaxialen Langzeitbelastung $< 1,0$ MPa findet keine unmittelbare Zerstörung der neuen Salzmineralisationen statt.

Die erreichten Porositäten in den durchgeführten Langzeitkriechversuchen näherten sich bzw. unterschritten die Porosität von 5 %. Es wird erkenntlich, dass ein vorteilhaftes Kriechverhalten vorliegt, dass geringe Porositäten ermöglicht.

6.4 Quellverhalten

Die Untersuchungen hinsichtlich des Quellverhaltens von gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterial wurden zugunsten der weiterführenden Scherfestigkeitsuntersuchungen verschoben. Es können hierbei jedoch Annahmen hinsichtlich des Quellverhaltens aufbauend auf den verwendeten Ausgangsmaterialien des Versatzmaterials getätigt werden.

Ein Quellverhalten von Materialien basiert auf der Volumenänderung von Materialien durch die Änderung des in der Kristallstruktur enthaltenen Wassergehaltes. Aus diesem Grund können die im gefügestabilisierten Salzgrusversatz enthaltenen salinaren Komponenten hinsichtlich ihrer Eigenschaften zur Auf- und Abgabe von Kristallwasser analysiert werden.

Steinsalz (NaCl) verfügt nicht über die Fähigkeit Kristallwasser aufzunehmen. Eine Änderung des langfristigen Versatzvolumens aufgrund von Quellen ist somit bei dieser Versatzkomponente auszuschließen.

Da die verwendeten Salzbinderkomponenten nicht zu einer Ausfüllung des Porenraums innerhalb des Steinsalzgruses führen, würde selbst bei einem Quellverhalten von verwendeten Salzbinderkomponenten erst der vorhandene Porenraum ausgefüllt sodass eine Volumenänderung des Gesamtverbundes nicht zu erwarten ist.

Die verwendeten Salzbinderkomponenten Kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) sowie Calciumsulfathalhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) verfügen über die Möglichkeit weiteres

Kristallwasser in Form einer Hydratation aufzunehmen. Eine Kristallwasseraufnahme aus der verwendeten fünf molalen $MgCl_2$ -Lösung ist unter den thermodynamischen Bedingungen in einem HAW-Endlager im Salinar nicht zu erwarten. Bei einer Änderung der thermodynamischen Rahmenbedingungen (Erhöhung der Umgebungstemperatur bzw. Druck) könnte es jedoch zu einer Dehydrierung vor allem des Halbhydrates zu Anhydrit kommen. Dies ist im Einbauzustand jedoch nicht zu erwarten. Da die Ausgangskomponenten innerhalb von Wochen – Monaten in Lösung gehen und zur Kristallisation neuer Salzmineralisationen führt, ist ein Quellverhalten dieser Komponenten nicht zu erwarten.

Auch die Zwischenmineralisationen Syngenit und Kainit unterliegen innerhalb von Monaten einer Mineralumwandlung in Polyhalit. Die Salzmineralisation Polyhalit ist ein in maritimen Evaporitlagerstätten langzeitbeständiges Salzmineral, sodass ein Quellverhalten ausgeschlossen werden kann.

6.5 Zusätzliches Arbeitspaket: Aussaigerversuch

6.5.1 Versuchsaufbau

Zur Generierung homogener Materialeigenschaften über den vollständig versetzten Querschnitt ist eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung von Bedeutung. Darüber hinaus ist die Bildung eines lösungsgesättigten Bereichs zwischen Gebirge und Versatzkörper durch das gravitative Absinken der flüssigen Versatzkomponente zu vermeiden. Dieser lösungsgesättigte Bereich könnte im Störfall als Transportweg für Radionuklide dienen. Der Versuchsaufbau orientierte sich an dem in [Mis16] entwickelten Aussaigerversuch und wurde für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz adaptiert. Der Versuch wurde in [Sch16] beschrieben.

Zur Analyse der hydraulischen Stabilität wurde der gefügestabilisierte Salzgrusversatz angemischt und in eine Säule von $h = 5,0$ m eingebaut. Wie in Kapitel 3.2.4 aufgezeigt, kann durch den Druck, resultierend aus dem Eigengewicht des Versatzmaterials, eine Volumenverformung durch die Umorientierung des Korngefüges hervorgerufen werden. Diese Volumenverformung geht mit der Änderung des Porenraums einher. Die Änderung des Porenraums kann Fließbewegungen der flüssigen Phase hervorrufen. Unterstützt wurde diese potentielle Fließbewegung durch das Eigengewicht der Lösung. Nach einem definierten Zeitraum von einem Monat wurde die Feuchtigkeitsverteilung in der Versatzsäule bestimmt.

Der Versuchszeitraum wurde basierend auf den Ergebnissen der P-XRD ausgewählt. Innerhalb dieses Zeitraums wurde die Polyhalitbildung erwartet. Die Festigkeitszunahme durch die Syngenit- und Kainitbildung war nach einem Monat bereits abgelaufen, sodass von einer weiteren Bewegung des Korngefüges nicht auszugehen war. Sollten Setzungen auftreten, würden diese innerhalb dieses Zeitraums stattfinden.

Der Versuch fand im Technikum des Instituts für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg statt. Verwendet wurde eine Säule mit einer Höhe von $h = 5,0$ m aus Hartplastikrohren. Diese Rohre haben gegenüber Stahlrohren den Vorteil, dass eine Korrosion der Rohroberfläche ausgeschlossen werden konnte und die Wandreibung zwischen Rohr und Versatz nicht zusätzlich erhöht wurde. Die verwendeten Rohre werden unter anderem im Straßenbau für unterirdische Entwässerungskanäle verwendet und verfügen über eine entsprechende Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten. Die Säule bestand aus fünf Rohren mit einer Länge von je 1,0 m sowie einer 1,0 m mächtigen Säule mit Betonfuß. Die realisierbare Versatzhöhe betrug 4,8 m. Die Rohre waren fest an einem Stahlträger befestigt. Am oberen Ende des Betonfußes war ein Auslauf eingebaut, der mit einem Flüssigkeitsbehälter $V = 15 \text{ dm}^3$ verbunden war. Dieser Behälter wurde auf einer Waage platziert, die kontinuierlich das aktuelle Behältergewicht aufzeichnete. Der Behälter war darüber hinaus mit einem Schlauchsystem mit den PFT-Rohren am oberen Ende verbunden. Anhand dieses Schlauches wurde ein Druckausgleich ermöglicht sowie die Verfälschung der Messwerte durch eine Verdunstung von Flüssigkeit unterbunden. Dies gewährleistete die Funktionsfähigkeit des geschlossenen Systems. Um ein Austreten von Feststoffen zu verhindern, wurde eine Kiesschicht mit einem durchflussfähigen Fließmaterial über den Ausfluss eingebaut. Abbildung 61 stellt den Versuchsaufbau schematisch dar.

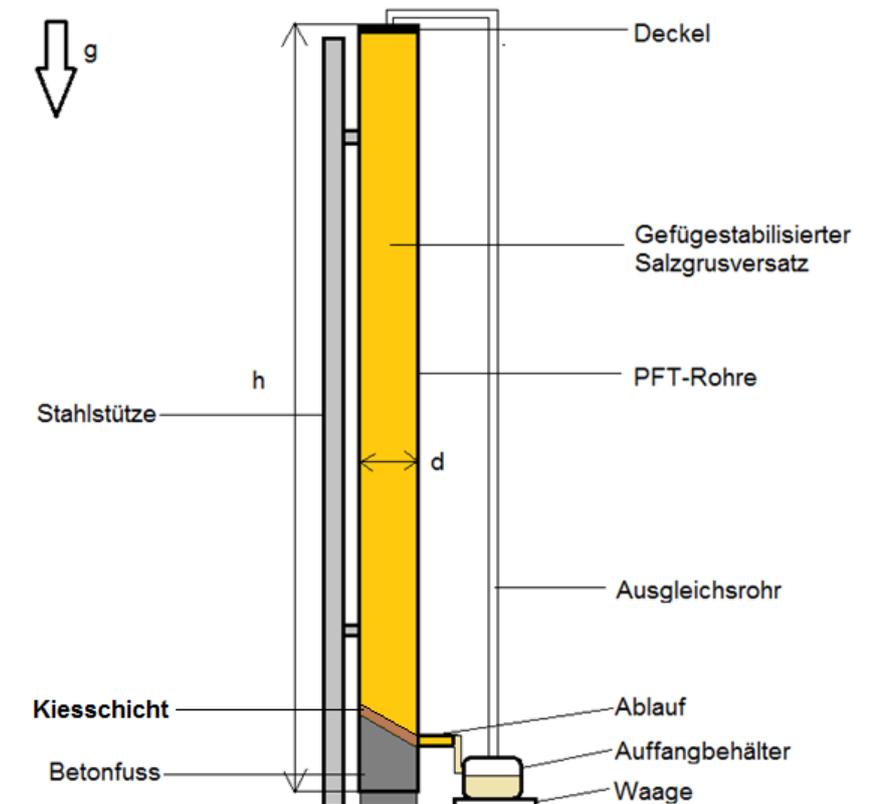


Abbildung 61: Skizze des Versuchsaufbaus zur Überprüfung der hydraulischen Stabilität (nicht maßstabsgetreu) nach [Mis16]

Potentiell austretende Fluide aus dem Versatzmaterial fließen, bedingt durch die Schwerkraft, nach unten. Durch den Auslauf am unteren Ende der Säule traten die Fluide in den Auffangbehälter ein. Eine Zunahme des Laugeninhalts im Behälter wurde durch die Gewichtszunahme messtechnisch erfasst. Anhand der Gewichtszunahme konnte auf die in den Behälter eingetretene Laugenmenge zurückgeschlossen werden.

Der Einfluss der Schwerkraft kann eine inhomogene Verteilung von fließfähigen Fluiden innerhalb des Versatzmaterials bedingen. Eine entsprechend inhomogene Verteilung wurde durch die Probenentnahme in unterschiedlichen vertikalen und horizontalen Positionen der Versatzsäule überprüft. Die entnommenen Proben wurden durch Erhitzung getrocknet. Anhand des Gewichtsunterschiedes vor und nach der Wiegung wurde der entsprechende Wassergehalt der untersuchten Probe ermittelt.

6.5.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurden potentielle Toträume im Versuchsaufbau, die aus dem Material austretende Fluide durch Kapillarkräfte binden können, durch das Einbringen von $MgCl_2$ - Lösung verfüllt. Die hinzugegebene Fluidmenge, sowie die wieder in den Behälter ausgetretene Fluidmenge wurden messtechnisch ermittelt. Die Öffnung des Auslaufes wurde nach dem Ende des Ausfließens der hinzugegebenen Lösung in die Kiesschicht verschlossen. Anschließend erfolgte der lockere Einbau des Versatzmaterials. Nach dem vollständigen Aufbau der Versatzsäule wurde der Deckel mit Schlauchverbindung zum Behälter eingebaut.

Das Probenmaterial wurde mittels eines herkömmlichen Mixers für Betonbaustoffe angemischt. Um den Einfluss des Mixers zu untersuchen, wurden vor und nach dem Mischvorgang Salzgrusproben entnommen und die Kornverteilungen miteinander verglichen.

Hinsichtlich der Einbaudichte wurde sich für eine konservative Problemlösung entschieden. Die Einbaudichte wurde gering gehalten, um eine hohe Beweglichkeit des Versatzmaterials vor der Gefügestabilisierung zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde das Versatzmaterial während des Einbaus nicht zusätzlich verdichtet. Darüber hinaus ermöglichte eine geringe Einbaudichte aufgrund der Porenraumgröße ausreichende Fließwege, sodass eine bewegliche Lösung darin fließen konnte.

Durch das Öffnen des Ablaufes konnten Fluide, die aus dem Versatzmaterial in die Filterschicht eintraten, in den Auffangbehälter abfließen. Durch die kontinuierliche Messwertaufnahme des Behältergewichtes kann eine Aussage zur hydraulischen Versatzstabilität über die Zeit getätigt werden. Aufgrund der vorhergehenden P-XRD-Analysen wurde die Versuchsdauer auf einen Monat festgelegt. In diesem Zeitraum fand eine der Hauptphasenumwandlungen statt.

Unmittelbar nach Ablauf der Versuchsdauer, wurde durch Bohrungen entsprechendes Probenmaterial aus der Versatzsäule entnommen. Es wurden drei vertikale Ebenen mit je drei Probeentnahmebohrungen, die jeweils in einem Winkel von 120° angeordnet waren, als Probenahmeebenen ausgewählt. Die Probenmaterialien wurden aus einer Tiefe von ca. 5 cm entnommen, um eine Beeinflussung durch die Rohrwandung auszuschließen. Abbildung 62 stellt das verwendete Entnahmeschema bildlich dar.

Die entnommenen Versatzproben wurden gewogen und anschließend für 24 Stunden in einem Trockenschrank bei 120 °C getrocknet. Nach der Trocknung erfolgten die zweite Wägung und die Ermittlung des Wassergehaltes. Anhand des Wassergehaltes wurde ein Rückschluss auf den Lösungsgehalt (fünf molale MgCl₂-Lösung) gezogen.

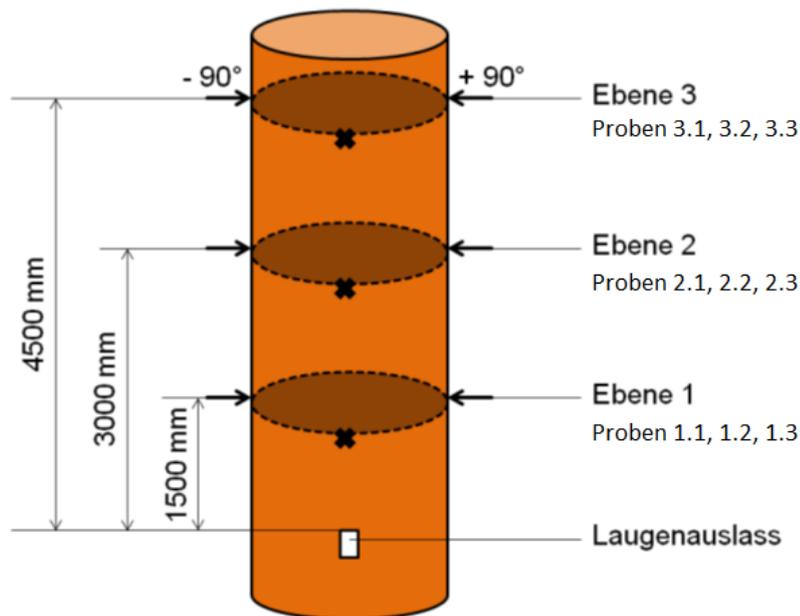


Abbildung 62: Entnahmeschema (nicht maßstabgetreu) der Versatzproben zur Ermittlung des Wassergehaltes (übernommen aus [Sch16])

6.5.3 Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Auswertung der messtechnischen Überwachung des Auffangbehältergewichtes ergibt, dass keine Freisetzung von Lösungen aus der Versatzsäule stattgefunden hat. Dies bedeutet, dass sich im Laufe der Salzmineralneubildung keine lösungsgesättigte und fließfähige Schicht im Sohlenbereich des Versatzkörpers im Übergangsbereich zum Gebirge bildet, also keine großräumigen Aussaigervorgänge nachgewiesen werden konnten.

Die Verteilung des Fluids im Versatzmaterial wurde nach einem Monat mittels der entnommenen Probenkörper untersucht. Tabelle 18 stellt die ermittelten Feuchtigkeitsgehalte sowie die daraus korrelierten Lösungsgehalte dar. Der

Lösungsgehalt wurde aus dem ermittelten Wassergehalt mit der entsprechenden Stoffmengenkonzentration der fünf molalen $MgCl_2$ -Lösung ermittelt. [Sch16]

Tabelle 18: Wassergehalte der gefügestabilisierten Salzgrusversatzsäule nach einem Monat (übernommen aus [Sch16])

| Probenbezeichnung | Wassergehalt w [Masse-%] | Gehalt an $MgCl_2$ -Lösung [Masse-%] |
|----------------------------|-----------------------------|---|
| 1.1 | 2,8 | 4,14 |
| 1.2 | 2,62 | 3,87 |
| 1.3 | 2,91 | 4,30 |
| Ebene 1: Mittelwert | 2,78 +/- 0,01 | 4,10 +/- 0,03 |
| 2.1 | 2,67 | 3,93 |
| 2.2 | 2,59 | 3,82 |
| 2.3 | 2,35 | 3,47 |
| Ebene 2: Mittelwert | 2,54 +/- 0,02 | 3,74 +/- 0,04 |
| 3.1 | 2,46 | 3,63 |
| 3.2 | 2,38 | 3,52 |
| 3.3 | 2,54 | 3,74 |
| Ebene 3: Mittelwert | 2,46 +/- < 0,01 | 3,63 +/- 0,01 |

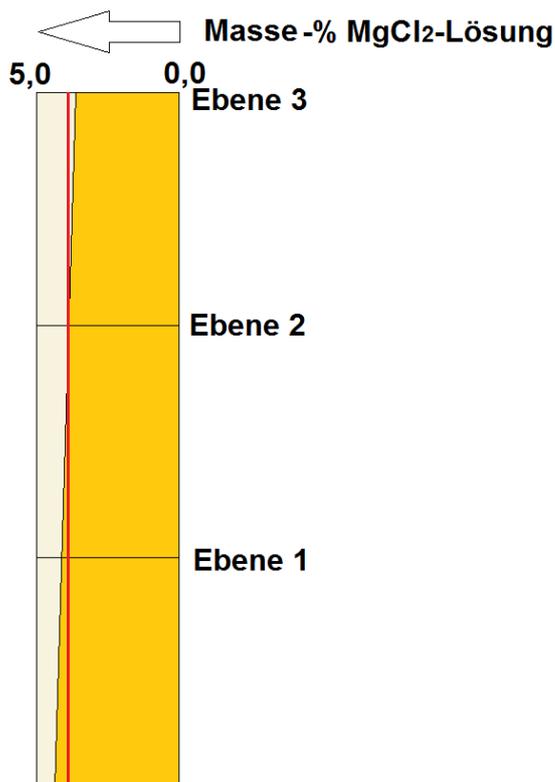
Unmittelbar nach dem Anmischen des Versatzmaterials beträgt der durchschnittliche Lösungsgehalt an $MgCl_2$ - Lösung (5 mol/kg_{Wasser}) 3,9 Masse-%. Die entsprechende Aufschlüsselung der Rezeptur ist in Kapitel 4.4 dargestellt. Der durchschnittliche Lösungsgehalt in der untersten Messebene 1 der Versatzsäule (Abbildung 40, S. 82) betrug 4,1 Masse-%. Der geringste Lösungsgehalt wurde in der dritten und höchsten Messebene ermittelt. Hieraus lässt sich eine tendenzielle Abnahme des Lösungsgehaltes in der Versatzsäule erkennen.

Der durchschnittliche Feuchtigkeitsgehalt der untersten Messebene war mit einem Lösungsgehalt von 4,1 Masse-% am höchsten. Dies kann aus der zusätzlichen Aufnahme der salinaren Lösung aus dem Vlies und der Kiesschicht durch Kapillarkräfte resultieren. Zur Vermeidung von Toträumen wurde das Vlies vollständig mit der salinaren Lösung getränkt und nur die gravitativ fließfähige Lösung anschließend abgezogen. Lösung, die durch Kapillarkräfte im Versatzmaterial aus dem Vlies aufsteigt, kann nicht ausgeschlossen werden.

In der mittleren Messebene wurde ein durchschnittlicher Lösungsgehalt von ca. 3,7 Masse-% ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass von den drei genommenen Proben zwei Proben Lösungsgehalte von 3,9 Masse-% und 3,8 Masse-% aufwiesen.

Diese Lösungsgehalte nährten sich dem ursprünglichen Lösungsgehalt an. Die dritte Probe wies mit 3,5 Masse-% den geringsten Lösungsgehalt in dem Versuchsaufbau auf. Dies kann durch eine inhomogene Verteilung der Korngrößen innerhalb der Versatzsäule beeinflusst werden. Durch eine hohe Anzahl von Größtkörnern kann der Lösungsgehalt in der Messung beeinflusst werden.

Die oberste Messebene wies einen durchschnittlichen Laugengehalt von 3,6 Masse-% auf. Dies war der durchschnittlich geringste gemessene Laugengehalt in dem Versuchsaufbau. Prozentual war der durchschnittliche Laugengehalt um 6,9 % geringer als in dem Ausgangsgemisch. Dies kann aus einer Fließbewegung der Lösung oder aus einer inhomogenen Versatzprobe resultieren. Darüber hinaus kann die Bildung einer Dampfphase in dem Deckelbereich der Versatzröhre und in dem angeschlossenen Schlauchsystem nicht ausgeschlossen werden. Dieses kann den messbaren Wassergehalt in der Versatzprobe verringern.



3,9 Massen-% MgCl₂-Lösung

Abbildung 63: Schematische Darstellung der Versuchsergebnisse

Insgesamt kann gesagt werden, dass eine eindeutige Fließbewegung der fünf molalen MgCl₂-Lösung im Versatzmaterial nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Es kann festgestellt werden, dass keine Lösung freigesetzt wurde und aus dem Versatzmaterial ausfloss. Abbildung 63 zeigt, dass der Lösungsgehalt von unten nach oben abnahm. Dabei verringerte sich die Rate der Lösungsabnahme nach oben hin. Aufgrund der experimentell ermittelten Werte kann davon ausgegangen werden, dass auch bei einer höheren Versatzsäule (> 4,5 m) der Lösungsgehalt im oberen Bereich nicht soweit verringert wird, dass

eine negative Beeinflussung der Salzmineralneubildung eintritt bzw. Lösung im unteren Bereichen der Versatzkörper austritt.

Innerhalb der Ebenen wurden deutliche Schwankungen der Lösungsgehalte erkennbar. Es kann angenommen werden, dass das Korngemisch aufgrund des Einbaus (Fallhöhe des Materials < 0,5 m) ein inhomogenes Kornband aufwies. Aus diesem Grund könnte sich eine inhomogene Porenverteilung eingestellt haben, die zu ungleich verteilten Kapillarkräften im Versatzmaterial führte. Darüber hinaus ist die in der entnommenen Probe enthaltene Salzbindermenge entscheidend, da dieses zu einer Beeinflussung des Lösungsgehaltes in den Proben führt. Da zu dem Zeitpunkt der Berichterstellung die Einbauversuche in situ bzw. großtechnische Mischversuche noch nicht durchgeführt wurden, ist ein Einfluss des verwendeten Mixers nicht auszuschließen. Die zur Kontrolle des Mischvorgangs entnommenen Proben vor und nach dem Mischen, zeigten eine geringe Beeinflussung der Kornverteilung durch die mechanische Beeinflussung.

5.5.6 Fazit der Untersuchungen des Einbauverhaltens

Die Untersuchungen des Einbauverhaltens des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials wurden durchgeführt, um zu beurteilen, ob eine generelle Eignung zum Einbau des Versatzmaterials unter Tage vorliegt und geeignete Probenkörper für die labortechnischen Materialuntersuchungen herstellbar sind. Die Untersuchungen bestätigen, dass mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterial erfolgreich Versatzkörper erstellt werden können. Geeignete Probenkörper für die labortechnischen Materialuntersuchungen können erstellt werden.

Die Untersuchung der schüttgutmechanischen Versatzeigenschaften zeigte, dass Versatzkörper mit einer Einbaudichte zwischen $0,9 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ zu erwarten sind. Dies bedeutet, dass Probenkörper mit Einbaudichten in vergleichbaren Wertebereichen im labortechnischen Maßstab untersucht werden. Aufgrund des hohen Schüttwinkels von 40° - 45° ist ein höherer Eintrag der Verdichtungsenergie beim Einbau des Versatzmaterials unter Tage in die Kopfböschung des Versatzkörpers zu erwarten. Bei der Verwendung geeigneter Versatztechnologien mit entsprechend hohen Verdichtungsenergien, können Versatzkörper mit hohen Einbaudichten erreicht werden.

Die Verdichtbarkeitsuntersuchung zeigte, dass Einbaudichten von $> 1,7 \text{ g/cm}^3$ nur mit einem hohen Eintrag an Verdichtungsenergie und einer hohen mechanischen Belastung des Korngefüges zu erreichen sind. Es ist nicht zu erwarten, dass trotz des vorteilhaften Schüttwinkels des Versatzmaterials, auch bei einer nachträglichen

Verdichtung des Versatzmaterials unter Tage, Einbaudichten im Wertebereich von $> 1,7 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden in den labortechnischen Materialuntersuchungen Probenkörper mit einer Einbaudichte von $< 1,7 \text{ g/cm}^3$ zu untersuchen. Dieses gewährleistet eine realitätsnahe Materialuntersuchung. Da erkannt wurde, dass bei Einbaudichten $< 1,45 \text{ g/cm}^3$ keine ausreichend frühzeitige Gefügestabilisierung zu erreichen ist, beträgt die geringste labortechnisch untersuchte Einbaudichte $1,5 \text{ g/cm}^3$.

Auch bei hohen Verdichtungen des Versatzmaterials ist ein Auspressen von Lösung aus dem Versatzmaterial nicht zu erwarten. Dies bestätigt die Annahme von zu untersuchenden Einbaudichten in den labortechnischen Materialuntersuchungen von bis zu $1,7 \text{ g/cm}^3$. Auch ein späteres Auspressen der Lösung im Zuge der Versatzkompaktion durch die Gebirgskonvergenzen ist nicht zu erwarten.

Am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau können geeignete Probenkörper zur labortechnischen Materialuntersuchung hergestellt werden. Die in diesem Kapitel ermittelten Rahmenbedingungen (Einbaudichte und Verdichtbarkeit) können eingehalten bzw. erreicht werden.

Wie in Abbildung 23 dargestellt, steigt die Sättigungszahl in Abhängigkeit von der Einbaudichte exponentiell an. Der Wert von $S_r = 1$ wird bei einer Einbaudichte von $\rho = 2,19 \text{ g/cm}^3$ bis $2,20 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Die dichteste Lagerung des Salzgruskorngemisches liegt im Wertebereich von $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$ bis $1,62 \text{ g/cm}^3$. In diesem Wertebereich beträgt die Sättigungszahl nach Abbildung 22 ca. $S_r = 0,12$ bis $0,14$. Ein Auspressen der Lösung findet somit auch bei der dichtesten Lagerung nicht statt. Versatzdichten von Steinsalzgrus $\rho > 2,16$ werden nach langen geologischen Zeiträumen erreicht [Krö09]. Der gefügestabilisierte Salzgrusversatz mit einer theoretischen Porosität von $n = 0,00$ verfügt über eine Dichte von $\rho = 2,25 \text{ g/cm}^3$. Diese Materialdichte ist aufgrund der spezifischen Korndichten der einzelnen Bestandteile höher, als die Korndichte des verwendeten Steinsalzes ($\rho_{\text{Salzgrus}} = 2,20 \text{ g/cm}^3$). Das Auspressen der Lösung kann erst ab dem Erreichen der Dichte von Steinsalz auftreten. Zu diesem Zeitpunkt sind potentielle Fließwege in Form von Makro- und Mikrorissen verschlossen und die Permeabilität entspricht der von ungestörtem Steinsalz. Aufgrund der Dichtwirkung wird das in dem Versatzmaterial enthaltene Fluid im Steinsalz eingeschlossen. Die genannten Annahmen gelten für den angenommenen Lösungsgehalt von 3,9 Massen-% sowie einer gleichbleibenden Lösungsverteilung im Versatzmaterial.

Als natürliches Analogon sind innerhalb maritimer Evaporitlagerstätten Lösungseinschlüsse allgegenwärtig. Nach [Her07] können diese Lösungen in primär

gebundene Lösungen und Metamorphoselösungen unterschieden werden. Die primär gebundene Lösung entstammt aus dem Verdampfen von Meerwasser und dem Auskristallisieren der darin gelösten Salze. Reste des Meerwassers wurden während der Auskristallisierung der Salze in die geologischen Schichten mit eingebunden. Die Metamorphoselösung trat zu einem späteren Zeitpunkt durch tektonische Ereignisse aus dem Deckgebirge bzw. aus der Entwässerung von kristallwasserhaltigen Mineralisationen in die Salzlagerstätten ein. [Her07]

Der Einschluss von Lösungen in maritimen Evaporitlagerstätten zeigt, dass Lösungen, die innerhalb der Lagerstätte befindlich sind, über lange geologische Zeiträume eingeschlossen werden können.

Die in dem Versatzmaterial vorhandene wässrige Lösung ist während des Versatzeinbaus stabil und führt nicht zu einer Freisetzung von Lösung durch gravitative Fließbewegungen. Auch eine über die Versatzsäule ungleichmäßige Lösungsverteilung, die zu einer negativen Beeinflussung der Mineralneubildung führen kann, konnte nicht ermittelt werden.

7 AP4 und AP5- Untersuchung des Materialverhaltens im Einbauzustand sowie Untersuchung der alternativen Versatztechnologie

7.1 Bodenmechanische Beschreibung des Einbauverhaltens von gefügestabilisierten Salzgrusversatz

7.1.1 Definition des Einbauverhaltens

Das Einbauverhalten eines Versatzmaterials beschreibt die Eigenschaften eines Materials während des Einbringens unter Tage. Die Materialeigenschaften zu diesem Zeitpunkt haben einen direkten Einfluss auf den erreichbaren Verfüllungsfortschritt sowie auf die Qualität der Versatzbauwerke nach der Gefügestabilisierung.

Aufgrund von Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozessen in dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz nach dem Einbringen ist von einer Änderung der Materialeigenschaften über die Zeit auszugehen. Die Materialeigenschaften im Einbauzustand sind von den Materialeigenschaften nach dem Ablauf von Lösungs- und Salzmineralneubildungsprozessen zu unterscheiden.

Eine Zielstellung des neuartigen Versatzmaterials ist der technisch einfache Versatzeinbau unter Tage. Aus diesem Grund werden die Materialeigenschaften des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im Einbauzustand ermittelt. Hierfür werden die in Kapitel 4 genannten Rezepturen hinsichtlich der folgenden Materialeigenschaften analysiert:

Schüttgutmechanische Eigenschaften (Schüttwinkel, lockerste und dichteste Lagerung)

- Einbaudichte
- Porosität
- Verdichtbarkeit
- Auspressbarkeit von Lösung

Anhand der oben genannten Parameter kann eine Aussage hinsichtlich des allgemeinen Einbauverhaltens getroffen werden. Eine Betrachtung der Einflüsse von Einbautechnologien beispielsweise Druckluft, Beschleunigung und mechanische Beanspruchung auf das Versatzmaterial findet nicht statt. Dieses muss durch Versuche in situ überprüft werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen des Einbauverhaltens werden verwendet, um die Eigenschaften der im labortechnischen Maßstab zu untersuchenden

Probenkörper zu ermitteln. Dies ist vor allem hinsichtlich der Einbaudichte sowie der Verdichtbarkeit von Bedeutung.

7.1.2 Schüttgutmechanische Eigenschaften

Die lockerste und dichteste Lagerung sowie der Schüttwinkel beschreiben die für den Einbau des Versatzmaterials wichtigen Materialeigenschaften. Diese Eigenschaften wurden, wie in Kapitel 4.2 für das optimierte Salzgruskornmisch erläutern, analog für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz ermittelt. Die Ergebnisse können mit denen des naturtrockenen Referenzsalzgruses verglichen werden. Dies ermöglicht eine Aussage über Abweichungen von Salzgrustypischen Eigenschaften im Einbauzustand.

Tabelle 19 stellt die ermittelten Parameter von gefügestabilisierten Salzgrusversatz im Vergleich zu herkömmlichen Salzgrusversatz (Referenzsalzgrus) im Einbauzustand ($t = 0$ Tage) dar.

Tabelle 19: Vergleich von gefügestabilisierten Salzgrusversatz im Einbauzustand ($t = 0$) im Vergleich zu herkömmlichen Salzgrusversatz (Referenzsalzgrus)

| Materialeigenschaft | GESAV $t = 0$ (Korngemisch 1) | GESAV $t = 0$ (Korngemisch 2) | Referenz- salzgrus | Einheit |
|---------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Schüttwinkel | 38,1 | 41,5 | 29,6 | [°] |
| Lockerste Lagerung | 0,98 | 0,90 | 1,36 | [g/cm ³] |
| Dichteste Lagerung | 1,62 | 1,60 | 1,70 | [g/cm ³] |

Wie aus Tabelle 19 erkenntlich wird, verfügt der gefügestabilisierte Salzgrusversatz durch die Salzbinderzugabe über einen deutlich höheren Schüttwinkel. Dieses ist positiv für einen optimalen Einbau, da der Abstand zwischen Versatzmaterial auf der Sohle und an der Firste geringer wird. Dies ermöglicht einen steileren Einbau des Versatzmaterials an der Böschung des Versatzkörpers und verringert den Abstand zwischen Versatztechnologie und Versatzstoß. Der Aufprallwinkel des Versatzmaterials auf den Stoß wird ebenfalls optimiert. Dies verbessert die Verdichtung des Versatzkörpers durch das auftreffende Versatzmaterial und verringert die Bildung von Blasschatten.

Die geringstmögliche Dichte des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes liegt zwischen 0,90 g/cm³ und 0,98 g/cm³. Diese ist signifikant geringer als die des Referenzsalzgruses mit 1,36 g/cm³. Dies ist auf die scheinbare Kohäsion des Versatzmaterials durch die Lösungszugabe zurückzuführen. Während der labortechnischen Materialuntersuchungen wurde erkannt, dass bei Einbaudichten

$\rho < 1,45 \text{ g/cm}^3$ keine geeignete Gefügestabilisierung des Versatzmaterials innerhalb eines Zeitraums von einem Monat stattfindet.

Die dichteste Lagerung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes liegt zwischen $1,60 \text{ g/cm}^3$ und $1,62 \text{ g/cm}^3$. Im Vergleich zum Referenzsalzgrus, das über eine dichteste Lagerung von $1,70 \text{ g/cm}^3$ verfügt, wurde eine geringere maximale Versatzdichte erreicht. Durch die Zugabe des Salzbinders wurde die Kornverteilung des Versatzmaterials verschoben, sodass eine Änderung der Lagerungsdichte stattgefunden hat. Die verwendeten Salzgruskorgemische verfügen, wie das Referenzsalzgrus, über höhere Lagerungsdichten. Hierbei muss beachtet werden, dass diese Werte allein keine Aussage über die zum Erreichen der dichtesten Lagerung notwendige Verdichtungsenergie ermöglichen.

7.1.4 Verdichtbarkeit

Analog zu der Verdichtbarkeitsuntersuchung der Salzgruskorgemische wurden die gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterialien hinsichtlich der Verdichtbarkeit im Einbauzustand untersucht. Ziel war das Erreichen einer hohen Einbaudichte mit geringem Energieaufwand. Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Verdichtbarkeitsuntersuchungen des gefügestabilisierten Salzgrusversatzmaterials. Aufgetragen ist ebenfalls die dichteste Lagerung der untersuchten Materialien:

Tabelle 20: Untersuchungsergebnisse der Verdichtbarkeitsuntersuchung des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes im Einbauzustand im Vergleich zum Referenzsalzgrus

| Materialeigenschaft | GESAV t = 0 (Korgemisch 1) | GESAV t = 0 (Korgemisch 2) | Referenz- salzgrus | Einheit |
|--|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Dichteste Lagerung | 1,62 | 1,60 | 1,70 | [g/cm ³] |
| Verdichtungsenergie zum Erreichen bis der dichtesten Lagerung | 0,29 | 0,27 | 0,88 | [MNm/m ³] |

Wie aus Tabelle 20 zu entnehmen ist, ist die benötigte Verdichtungsenergie zum Erreichen der dichtesten Lagerung im Vergleich zu den trockenen Salzgruskorgemischen signifikant verringert worden. Die Verdichtungsenergien sind weiterhin höher als die des Referenzsalzgruses, haben sich dem des Referenzsalzgruses jedoch angenähert. Diese Verringerung der Verdichtungsenergien ist auf den Feuchtigkeitseintrag in das Versatzmaterial durch den Salz binder zurückzuführen. Bereits geringe Feuchtigkeitsgehalte (< 1,0 Masse-%) führen zu einer signifikanten Abnahme des Versatzwiderstands [Krö09]. Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz

(Korngemisch 1) Einbaudichten von bis zu 1,62 g/cm³ zu erreichen sind. Dies hängt vor allem von der verwendeten Versatztechnologie ab. Dieses muss durch eine noch ausstehende In situ-Phase untersucht werden.

7.1.5 Auspressbarkeit von Lösung

Die im Versatzmaterial vorhandene Lösungsmenge ist in den entsprechenden Porenräumen bzw. an den Oberflächen des Korngemisches verteilt. Ein Auspressen der Lösung aus dem Versatzmaterial findet statt, sobald das Porenvolumen geringer wird als das in dem Versatzmaterial vorhandene Lösungsvolumen.

Die Sättigungszahl S_r beschreibt das Verhältnis des flüssigkeitsgefüllten Porenraums zur Gesamtporosität. Beträgt die Sättigungszahl den Wert $S_r = 1$ ist jeglicher Porenraum im Versatzmaterial mit Flüssigkeit gefüllt. Eine weitere Kompaktion dieses Versatzmaterials läuft mit Auspressen des entsprechenden Porenfluids ab. Die Sättigungszahl berechnet sich nach Formel 16 [Bol121]:

$$S_r = \frac{n_w}{n} \quad (16)$$

- S_r = Sättigungszahl [-]
- n = Gesamtporosität [-]
- n_w = Flüssigkeitsgefüllter Porenraum [-]

Der flüssigkeitsgefüllte Porenraum n_w wird nach Formel 17 berechnet [Bol121].

$$n_w = \frac{\rho_d}{\rho_L} * w \quad (17)$$

- n_w = Flüssigkeitsgefüllter Porenraum [-]
- ρ_L = Dichte der Lösung [g/cm³]
- ρ_d = Trockeneinbaudichte [g/cm³]
- w = Wassergehalt [-]

Unter Verwendung der Trockeneinbaudichte ρ_d , die sich nach Formel 18 ermittelt, kann anschließend die Sättigungszahl errechnet werden [Bol121]:

$$\rho_d = (1 - n) * \rho_s \quad (18)$$

- ρ_d = Trockeneinbaudichte [g/cm³]
- n = Gesamtporosität [-]
- ρ_s = Korndichte [kg/m³]

Der Porenanteil in Formel 18 wird durch Formel 15 substituiert und anschließend in Formel 17 eingesetzt. Der flüssigkeitsgefüllte Porenraum kann so in Formel 16 ersetzt werden. Die Sättigungszahl errechnet sich somit nach Formel 20:

$$S_r = \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{\rho}{(1+w) * \rho_s}\right)\right) * \rho_s * w}{\rho_L * \left(1 - \frac{\rho}{(1+w) * \rho_s}\right)} \quad (19)$$

- S_r = Sättigungszahl [-]
 ρ = Einbaudichte [kg/m³]
 ρ_s = Korndichte [kg/m³]
 w = Wassergehalt [-]
 ρ_L = Dichte der Lösung [g/cm³]

Wie aus Formel 19 ersichtlich wird, hängt die Sättigungszahl von der Einbaudichte ab. Eine Änderung der Einbaudichte führt zu einer Veränderung des Porenanteils und ist in der Konsequenz für das Auspressen der in den Porenräumen befindlichen Lösung ausschlaggebend. Abbildung 64 stellt die Sättigungszahl in Abhängigkeit von der Einbaudichte dar.

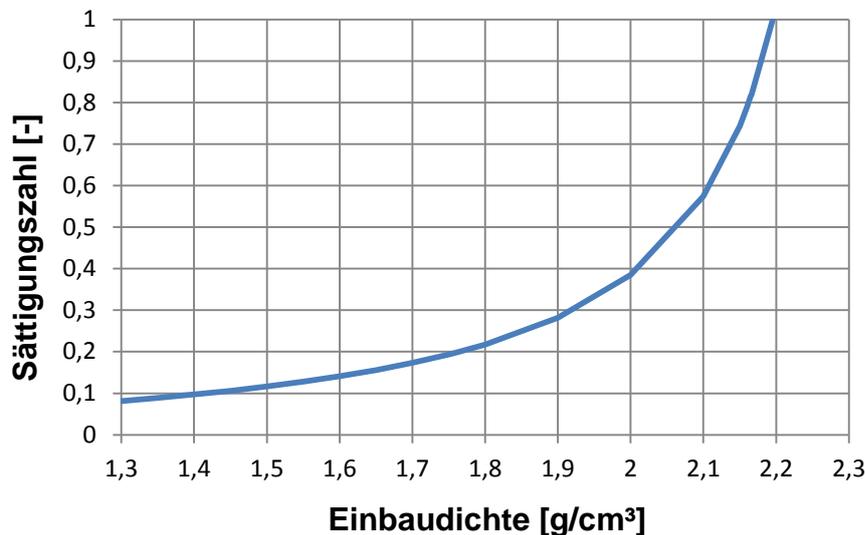


Abbildung 64: Abhängigkeit der Sättigungszahl von der Einbaudichte des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes

Es ist zu erkennen, dass ein Auspressen von Lösung erst ab einer Sättigungszahl von 1 und somit bei einer Einbaudichte von ca. 2,2 g/cm³ erfolgt.

7.2 Einrichtung und Justierung der genutzten Schleudertechnologie

7.2.1 Grundlagen der Schleuderversatztechnologie

Die Schleuderversatztechnologie gehört zu den mechanischen Versatztechnologien und basiert auf dem Prinzip der mechanischen Beschleunigung des Versatzmaterials durch schnellrotierende Drehteller oder durch Förderbänder. Bei dieser Versatztechnologie wird das Versatzmaterial in Grubenbaue eingeschleudert. Ein Beispiel für diese Versatztechnologie ist eine mobile Schleuderversatzmaschine in (Abbildung 65). Diese kann zum Beispiel eine modifizierte Maschine für die Schneeberäumung (Schneefräse) oder eine Transporteinheit mit Bandschleuderanlage sein.



Abbildung 65: Schneefräse in der Untertage-Verwertung Hattorf-Wintershall [Hom16]

Der Vorteil dieser Versatztechnologie ist der technisch einfache Einbau des Versatzmaterials unter Tage sowie die Möglichkeit zum Einbau von hohen Versatzvolumina pro Zeiteinheit.

Als Nachteil muss bei dieser Versatztechnologie die Neigung zur Kornseparation durch die Wurfgeschwindigkeit sowie dem spezifischen Luftwiderstand angesehen werden. Darüber hinaus kann es unter Tage zu einer erhöhten Salzstaubbildung kommen. Die erreichbaren Einbaudichten sind vom Versatzmaterial, der Wurfgeschwindigkeit sowie der Strahlbündelung abhängig. Wie in der Abbildung 65 zu erkennen ist, kommt es beim Einbau des Schleuderversatzes zum Auffächern des Versatzstrahles. Dies muss als problematisch hinsichtlich optimaler Einbaudichten erachtet und in In situ-Versuchen beachtet werden.

7.2.2 Die geplante Schleuderversatztechnologie für In situ-Versuche

Es ist geplant für die In situ-Phase des Forschungsvorhabens die Schleuderversatztechnologie als herkömmliche Versatztechnologie zu adaptieren.

Hierfür ist geplant, die in der Untertagedeponie (UTD) Sondershausen vorhandene Schleuderversatzmaschine zu verwenden.

In der UTD Sondershausen werden Abfälle in untertägig aufgefahrenen Kammern im Steinsalzgebirge eingelagert. Dabei werden die Abfälle in entsprechenden Abfallgebinden in die Hohlräume eingelagert und diese anschließend mit Schleuderversatz verfüllt. Hierfür wird eine konstruktive angepasste Schneefräse des Typs Supra 3000 UT der Firma SCHMIDT Winterdienst- und Kommunaltechnik GmbH verwendet. Die entsprechende Schneefräse ist in Abbildung 66 dargestellt. [Fir07]



Abbildung 66: Schneefräse Supra 3000 UT der Firma Schmidt Winterdienst- und Kommunaltechnik GmbH auf dem Bergwerk Sondershausen [Foto: Toni Schmidt]

Die vorhandene Schneefräse besteht aus den Komponenten Trägerfahrzeug sowie der Räumkomponente. Die Abmessung der Schleudermaschine beträgt 6,2 m X 2,9 m X 2,2 m (LxHxB) sowie einem Gewicht von 8,3 t – 9,8 t je nach Ausführung. Die Abbildung 67 stellt den schematischen Aufbau der Schleuderversatzmaschine dar. [Fir07] [Sch16]

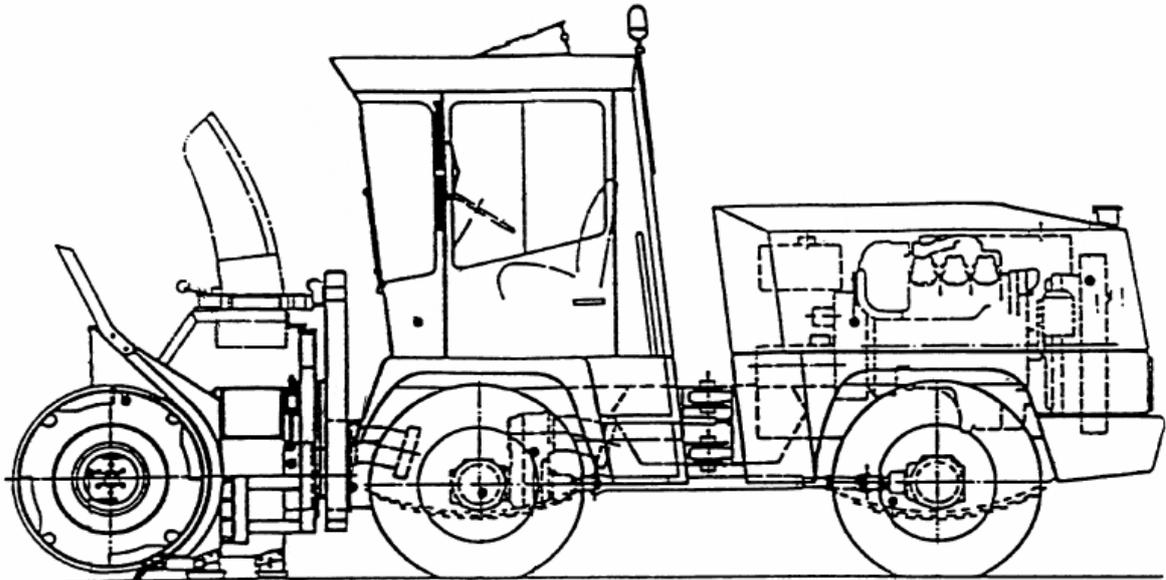


Abbildung 67: Schematische Darstellung der untertägigen Versatzschleudermaschine nach [Fir07] - bearbeitet von [Sch16]

Aufgrund der Knicklenkung, die einen minimalen Wendekreis von 10,5 m ermöglicht, eignet sich die Schneefräse auch für den Einsatz in untertägigen Streckenauffahrungen und ermöglicht so eine ausreichende Mobilität. Der Dieselmotor der Firma Mercedes Benz verfügt über eine Leistung von 340 PS bei einer Drehzahl von 1900 min^{-1} . Die Schleuderversatzmaschine ist in der Lage Material aufzunehmen und einzuschleudern bis zu einer Neigung von 23° und einer Steigung von 45° . [Fir07] [Sch16]

Die Räumkomponente besteht aus der Fräswalze zur Aufnahme des Versatzmaterials, dem Schleuderrad, zur Materialbeschleunigung, sowie der Austrageinheit. Die Fräswalze arbeitet nach dem Prinzip der Archimedischen Schraube und verfügt über einen Durchmesser von 1,0 m. [Fir07] [Sch16]

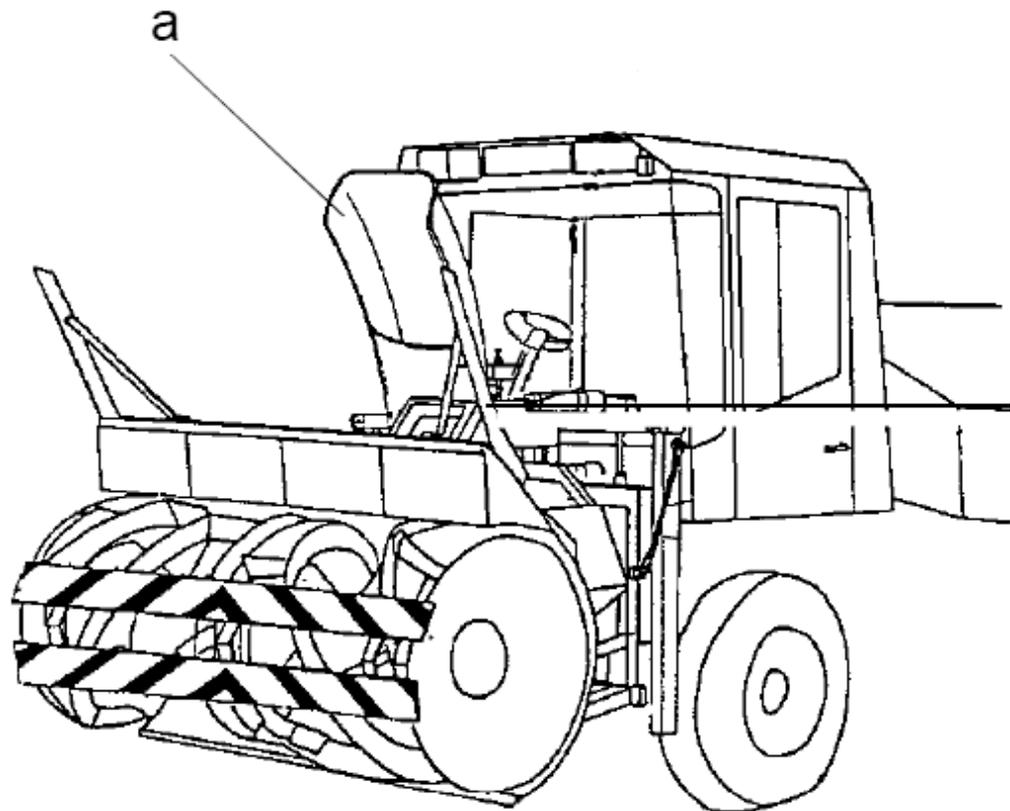


Abbildung 68: Schematischer Aufbau der Räumkomponente nach [Fir07] - bearbeitet von [Sch16]

Das Schleuderrad, das zur Beschleunigung des Versatzmaterials dient, ist mittig hinter der Fräswalze verbaut. Der Durchmesser des Schleuderrads beträgt 940 mm. Durch die Drehbewegung wird das Versatzmaterial nach oben hin beschleunigt und durch die Austrageinheit (in Abbildung 68 mit „a“ gekennzeichnet) gezielt ausgetragen. Die zu verwirklichende Wurfweite des Versatzmaterials kann zwischen ca. 5,0 m und 40,0 m variiert werden. [Fir07] [Sch16]

7.2.3 Arbeitsweise und Einfluss der Versatzschleudermaschine auf Salzgruskorngemische

Vor Beginn der Planung der Vorversuche mit der Schleuderversatzmaschine wurde eine Befahrung und Besichtigung der Maschine durch das Institut für Bergbau und Spezialtiefbau durchgeführt. Hierbei wurde die Arbeitsweise der Maschine untersucht sowie die mit Hilfe dieser Versatztechnologie erstellten Versatzkörper besichtigt.

In der UTD der Grube Sondershausen wird Steinsalzgrus mit einer Natriumchloridlösung angefeuchtet und eingebaut. Durch die Feuchtigkeitszugabe soll das Einbauverhalten bzgl. der Einbaudichte und Verdichtbarkeit verbessert

werden. Mit Hilfe dieses Versatzmaterial werden die Hohlräume zwischen der Kammern und den eingebauten Abfallgebände verfüllt.

Die Arbeitsweise der Schleuderversatzmaschine in der UTD Sondershausen besteht aus folgenden Arbeitsschritten. Zu Beginn wird das einzubringende Versatzmaterial vor die entsprechend zu verfüllende Kammer auf die Sohle geschüttet. Dabei wird das Versatzmaterial locker geschüttet. Der Abstand zu den Abfällen bzw. dem Versatzstoß variiert im Bereich von 5 m – 10 m. Die Versatzschleudermaschine wird hinter dem Versatzgut positioniert und fährt mit Drehung der Fräswalze sowie angetriebenen Schleuderrad in das Versatzgut ein. Durch die Fräswalze wird das Versatzgut zu dem Schleuderrad transportiert, von diesem aufgenommen und beschleunigt und anschließend durch die Austrageinheit in die Kammer eingeschleudert.

Diese Arbeitsweise der Versatztechnologie hat zur Folge, dass bei einer Anwendung dieser Technologie das entsprechende Versatzmaterial in ausreichenden Mengen angemischt werden muss ehe es durch die Schleuderversatzmaschine eingebaut werden kann. Dieses stellt entsprechende Anforderungen an die Mischtechnologie unter Tage.

Die untertägig errichteten Versatzbauwerke konnten in Augenschein genommen werden. Die Abbildung 69 stellt einen entsprechenden Arbeitsort der Versatzschleudermaschine dar. Im Vordergrund ist das einzubringende Versatzmaterial während im Hintergrund der erstellte Versatzkörper zu erkennen ist.



Abbildung 69: Exemplarischer Arbeitsort der Schleuderversatzmaschine in der UTD Sondershausen [Foto: Toni Schmidt]

Bei einer genaueren Betrachtung der erstellten Versatzkörper wurde festgestellt, dass durch die vorhandene Schleuderversatzmaschine unmittelbar nach dem Versatzeinbringen ein hoher Verfüllungsgrad erreicht werden kann. Das eingebrachte Versatzmaterial konnte bis unmittelbar an die Firste eingebracht werden. Das Ausbilden eines Blasschattens bzw. eines Firstspaltes unmittelbar nach dem Einbau an der Versatzfront wurde nicht beobachtet. Dies spricht für die Anwendung dieser Versatztechnologie, da ein hoher Verfüllungsgrad erreicht werden kann.

Es wurde jedoch erkannt, dass mit zunehmender Standdauer der Versatzkörper die Bildung eines Firstspaltes auftritt. Die Abbildung 70 stellt diesen Umstand dar. Im Regelbetrieb der UTD Sondershausen wird nach der Erstverfüllung dieser Firstspalt mit einer Nachverfüllung vollständig verschlossen.

Im Forschungsvorhaben GESAV ist die Zielstellung einer Vollverfüllung ohne eine notwendige Nachverfüllung der Hohlräume. Da beim gefügestabilisierten Salzgrusversatz davon ausgegangen wird, dass sich das Versatzmaterial nach dem Einbringen mit einer entsprechenden Einbaudichte nicht setzt, ist eine Vollverfüllung nach dem Einbringen ausreichend. Eine im Nachhinein auftretende Setzung des Versatzkörpers muss durch eine ausreichende Einbaudichte vermieden werden.



Abbildung 70: Ausbildung eines Firstspaltes nach der Erstverfüllung von Kammern mit angefeuchtetem Salzgrusversatz [Foto: Toni Schmidt]

Des Weiteren wurde erkannt, dass durch das Schleudern des Salzgrusversatzmaterials eine Separation des Korngemisches auftritt (Abbildung 71). Vor allem zeigte sich eine Separation von großen Korndurchmessern an der Sohle des Versatzkörpers, während durch die eingetragene Feuchtigkeit eine Agglomeration des Feinkorns im oberen Bereich des Versatzkörpers auftritt. Es kann vermutet werden, dass die anschließende Setzung des Versatzkörpers auf der Separation des Korngemisches während des Einbaus basiert.



Abbildung 71: Arbeit der Schleuderversatzmaschine unter Tage [Foto: Toni Schmidt]

7.2.4 Durchführung von In situ-Versuchen

7.2.4.1 Versuchsbeschreibung und -aufbau

Nach der Besichtigung der Versatzschleudermaschine in der UTD des Bergwerks Sondershausen, wurde eine entsprechender In situ-Versuch mit dem Korngemisch des Forschungsvorhabens „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz“ geplant und durchgeführt. Ziel der In situ-Untersuchungen war, die Kornseparation des optimierten Salzgruskorngemisches (Abweichung der Korngrößenverteilung vor dem Einbau und nach dem Einbau) sowie die möglichen Einbaudichten festzustellen.

Die Vorversuche mit der Schleudertechnologie wurden in einer Kammer in der UTD des Bergwerks Sondershausen durchgeführt. Hierfür wurden vom Bergwerk Sondershausen die benötigte Maschinenteknologie, Personal sowie Versatzmaterialien zur Verfügung gestellt.

Es wurde das optimierte Korngemisch 2 verwendet, um die Separation des Feinsalzgehaltes von den grobkörnigen Kornfraktionen (vor allem Überkorn und Band 6) festzustellen. Um die Feuchtigkeit des Salzgruses durch die Salzbinderzugabe umzusetzen, wurde der optimierten Kornverteilung eine gesättigte NaCl-Lösung von 3,75 Masse-% hinzugegeben. Es wurde sich aufgrund der hohen Verfügbarkeit sowie der im Vergleich zu einer fünf molalen $MgCl_2$ -Lösung konservativen Materialeigenschaften hinsichtlich der Versuchsergebnisse entschieden.

Die Planung des Vorversuchs sah vor, das optimierte Salzgruskorngemisch (ca. 2 t Versatzmaterial) mittels der Schleuderversatzmaschine in eine Kammer einzubauen und während des Versuches in unterschiedlichen Höhen die Kornfraktion aufzufangen und nachträglich im Labor zu analysieren.

Darüber hinaus sollte durch die Anordnung von Plattendruckmesssensoren die Einbauenergie der Schleudertechnologie aufgenommen und mittels der Analyse der Einbaudichte in Korrelation gesetzt werden. Hierfür sollten die Plattendruckmesssensoren direkt und indirekt bestrahlt werden.

7.2.4.2 Versuchsdurchführung

Unter Berücksichtigung der Arbeitsweise der Schleudertechnologie wurde geplant, dass die einzubauenden Versatzmassen vorab mittels eines entsprechenden Mischers unter Tage angemischt werden. Das angemischte Versatzmaterial sollte

anschließend auf der Sohle vor dem Versuchsort ausgebreitet, um dieses mittels der Schleudertechnologie einzubauen.

Als geeigneten Mischer wurde ein Baumischer in Form eines Zwangsmischers der Firma TS-Bau ausgeliehen. Der Mischer ist in Abbildung 72 dargestellt.



Abbildung 72: Verwendeter Zwangsmischer für untertägige In-situ-Versuche in der Grube Sondershausen [Sch16]

Das Mischvolumen des Zwangsmischers beträgt 300 dm^3 . Um die 2 t Versatzmaterial anzumischen, wurde dementsprechend mit einer durchschnittlichen Mischungsmenge von 250 dm^3 und einer Schüttdichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$ von einer Anzahl an ca. 6 Mischungen ausgegangen. Die benötigte Zeit, um diese Mischungen herzustellen wurde gemessen.

Die Kornfraktionen (Überkorn, Band 6, Band 8 und Feinsalz) sowie die Lösung standen in separaten Füllungen unmittelbar neben dem Zwangsmischer. Mit Hilfe einer Bodenwaage wurde die exakte Befüllung des Mischers sichergestellt. Die einzelnen Kornfraktionen wurden mittels Baueimer aus den Behältern entnommen, abgewogen und in den Zwangsmischer eingebracht. So konnte sichergestellt werden, dass eine exakte Erstellung des optimierten Korngemisches 2 vorliegt. Nach einer Mischzeit von 5 min. wurde das Material aus dem Mischer ausgetragen und eine Probe entnommen für die labortechnische Überprüfung der Kornfraktionen vor dem Einbringen.

Nachdem 3 t des optimierten Korngemisches 2 erstellt wurden, wurde der Zwangsmischer beiseite geräumt und die Schleuderversatzmaschine hinter das Versatzmaterial gefahren. Vor dem Einbringen des Versatzmaterials wurde mithilfe von herkömmlichem Salzgrus eine Versatzböschung im Versuchsort aufgebaut, auf dem die Probenbehälter sowie die Plattendruckmesssensoren aufgebaut wurden. In Abbildung 73 sind die entsprechenden Plattendruckmesssensoren dargestellt.



Abbildung 73: Verwendete Plattendruckmesssensoren aus [Sch16]

Die Messsensoren wurden mittels Messsignalwandler und Verteiler an einen Computer unter Tage angeschlossen, um die Messsignale aufzuzeichnen. Diese sind in Abbildung 74 dargestellt.



Abbildung 74: Messsignalwandler (links) und Verteiler (rechts) während des In-situ-Versuchs [Sch16]

Die Abbildung 75 stellt den Versuchsort unmittelbar vor dem Versuchsbeginn dar. Es sind im Vordergrund die Schleudermaschine und das aufgehäufte Versatzmaterial sowie im Hintergrund die Salzgrusböschung mit Probenbehälter dargestellt.



Abbildung 75: Untertägiger Versuchsort vor Versuchsbeginn [Sch16]

Aufgrund einer Stromschwankung im untertägigen Stromnetz unmittelbar vor dem Versuchsbeginn mussten die Plattendruckmesssensoren ausgebaut werden, da eine entsprechende Sicherung im Messsignalwandler und –aufnehmer beschädigt wurden. Der Schaden konnte über Tage einfach behoben werden jedoch nicht unter Tage zum Versuchszeitpunkt.

Es wurde sich aus diesem Grund entschieden den Versuch ohne Plattendruckmesssensor durchzuführen und die Einbaudichte sowie die Korngrößenverteilung vor und nach dem Versuch aufzunehmen.

Hierzu wurden die Probenbehälter wie folgt eingebaut (Abbildung 76). Die Probenrohre 2 und 3 dienen der Aufnahme von Versatzmaterial durch das Einschleudern mittels der Versatzschleudermaschine. Dabei wird das Probenrohr 2 direkt befüllt während 3 und 4 indirekt befüllt werden. Bei der direkten Befüllung wird mittels der Schleuderstrahlmaschine in das Rohr hereingeschleudert während bei der indirekten Befüllung zwischen die Rohre geschleudert wird, um nicht den Kernstrahl zu erhalten.

Das Probenrohr 5 dient der Aufnahme von herunterrollenden Salzgruskörnungen. Dieses soll der Bestimmung der Separation an der Versatzböschung dienen.



Abbildung 76: Verteilung der Probenkörper im Versatzkörper zur Aufnahme des Versatzmaterials durch die Versatzschleuder [Sch16]

7.2.4.3 Versuchsergebnisse

Zu Beginn werden die Ergebnisse der Korngrößenverteilungen dargestellt. Diese sind in der Abbildung 77 dargestellt.

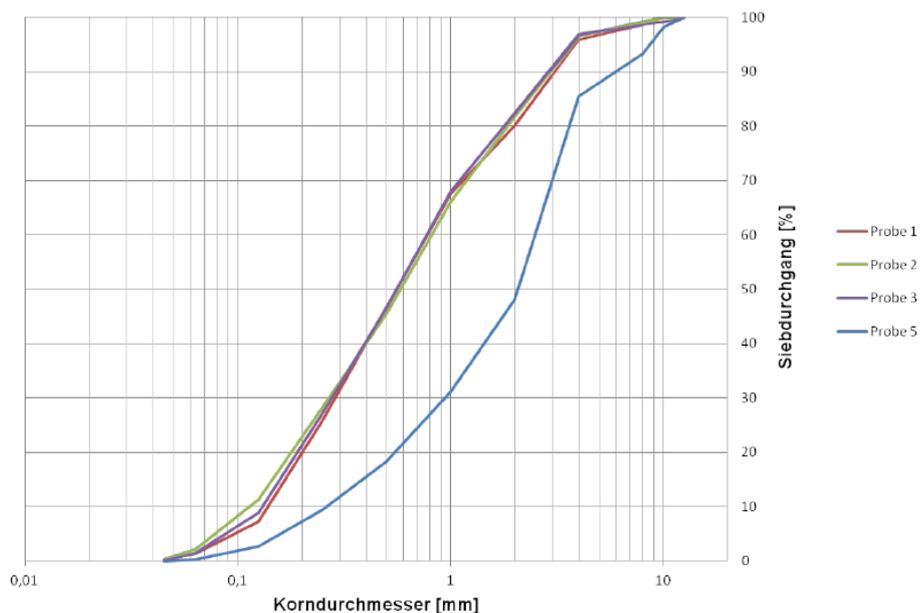


Abbildung 77: Korngrößenverteilung vor dem Einbauversuch (Probe 1) sowie nach dem Versuch (Proben 2 - 5); Anordnung nach Abbildung 76 [Sch16]

Wie aus Abbildung 77 entnommen werden kann, verfügt das Versatzmaterial nach dem Versuch (Proben 2 – 4) über eine vergleichbare Korngrößenverteilung wie vor dem Versuch (Probe 1). Dies zeigt, dass durch die Schleuderversatzmaschine eine geringe Materialbelastung sowie eine vernachlässigbare Kornzertrümmerung erfolgen. Die Probe 5 stellt den Sammelbehälter für die hinunterfallenden bzw. abrollenden Körnungen dar. Es lässt sich eindeutig zeigen, dass vor allem Überkorn und Band 6 zu einer Separation an der Versatzböschung neigen. Somit unterliegt das angefeuchtete optimierte Korngemisch 2 einer sehr geringen Separation durch die Schleudermaschine bzw. dem Schleudern selbst, sondern aufgrund der geringen Haftung zwischen den frischen Versatzmaterial sowie aufgrund des steilen Böschungswinkels.

Die Probenbehälter 1 – 3 wurden ebenfalls hinsichtlich ihrer Einbaudichte ermittelt. Folgende Ergebnisse wurden ermittelt [Sch16]:

- Probenrohr 2: $\rho = 1361 \text{ kg/m}^3$
- Probenrohr 3: $\rho = 1244 \text{ kg/m}^3$
- Probenrohr 4: $\rho = 1262 \text{ kg/m}^3$

Anhand der Einbaudichtenergebnisse kann festgestellt werden, dass durch eine direkte Befüllung mittels Kernstrahls der Versatzschleudermaschine die Versatzrohre mit einer Einbaudichte zwischen $1,3 \text{ t/m}^3$ und $1,4 \text{ t/m}^3$ befüllt werden können. Der Randbereich des Versatzstrahls ermöglicht eine deutlich geringere Einbaudichte zwischen $1,2 \text{ t/m}^3$ und $1,3 \text{ t/m}^3$. Diese Ergebnisse bestätigen die Erwartungen an die Schleudermaschine.

Eine unverträglich hohe Staubbildung wurde nicht ermittelt. Durch den Feuchtigkeitsgehalt wurden geringe Korndurchmesser an den Grobkörnungen gebunden.

7.2.5 Optimierungsansätze für weiterführende In situ-Versuche mit der Schleudertechnologie

Anhand der Versuchsergebnisse lässt sich feststellen, dass mittels eines gebündelten Schleuderstrahls eine deutlich höhere Einbaudichte erreicht werden könnte. Bei der bisher verwendeten Versatztechnologie findet eine starke Auffächerung des Versatzstrahls aus der Maschine statt. Die Randbereiche des Versatzstrahls ermöglichen eine geringe Verdichtung des Versatzmaterials während der Kernstrahl die Hauptverdichtungsenergie in das Versatzmaterial trägt. Eine

Optimierung der Schleudertechnologie ist dementsprechend vor allem durch eine Bündelung des Versatzstrahls möglich.

Darüber hinaus ist eine kontinuierlichere Arbeitsweise mit einem geringeren Versatzmassenstroms zu empfehlen, da ein Einschleudern von geringen Versatzmengen (< 3 t) mit dieser Versatztechnologie nicht zu empfehlen ist. Die verwendete Versatzschleudermaschine benötigt eine definierte Versatzmenge zum Anlaufen und Einrichten des Versatzstrahls. Dieses ist unumgänglich, da ein gezielter Versatzstrahl eine zentrale Rolle bzgl. einer optimierten Einbaudichte spielt.

Eine Separation der Korngrößenverteilung durch das Schleuderverfahren konnte nicht ermittelt werden. Jedoch liegt eine Separation beim Auftreffen des Versatzmaterials auf den Versatzkörper vor. Eine fehlende Haftkraft zwischen dem Versatzkörper und dem darauf aufgebrachteten Versatzmaterial führt zu einem abrollen von grobkörnigen Bestandteilen von der Firste zur Sohle.

Mit Hilfe des Schleuderverfahrens lässt sich generell eine Vollverfüllung im Sinne eines 100 %-igen Verfüllungsgrades erreichen. Aufgrund der theoretischen hohen Porosität ist bei herkömmlichen Versatzmaterialien allerdings mit Setzungen zu rechnen. Aus diesem Grund sollte bei Anwendung dieses Verfahrens eine Einbaudichte von > 1,4 kg/m³ angezielt werden, um eine ausreichende Festigkeitsentwicklung im Versatzmaterial zu gewährleisten.

7.2.6 Fazit hinsichtlich der Nutzung der Schleudertechnologie für eine anschließende In situ-Phase

Generell ist nach Auswertung der Versuchsergebnisse eine Eignung der Schleuderversatztechnologie zu bestätigen. Bei einem sorgfältigen Versatzeinbau unter Tage sind ausreichend hohe Versatzdichten (ca. 1,4 kg/m³) zu erreichen. Darüber hinaus spricht das Erreichen eines hohen Verfüllungsgrades sowie die einfache technische Umsetzbarkeit für eine Anwendung dieses Versatzverfahrens.

Es ist jedoch eine hohe Optimierbarkeit dieser Versatztechnologie hinsichtlich der Zielstellungen auszustellen. Mit Hilfe geeigneter technischer Maßnahmen kann das Schleuderverfahren hin zu einer hohen Einbaudichte und definierbaren Einbauenergien über den Querschnitt des Schleuderversatzstrahls erreicht werden.

Es wird empfohlen in einer anschließenden In situ-Phase sowohl eine herkömmliche Schleuderversatztechnologie zu verwenden sowie eine optimierte

Schleuderversatztechnologie anzuwenden. Als vielversprechend hinsichtlich eines gebündelten Schleuderstrahls sowie einer geringen mechanischen Materialbelastung spricht die Schleuderstrahlmaschine nach Spieß, die zum Einbringen von Schleuderbeton entwickelt wurde.

7.3 Einrichtung und Justierung der genutzten Blasversatztechnologie

7.3.1 Grundlagen der Blasversatztechnologie

Beim Blasversatz handelt es sich um eine pneumatische Versatztechnologie, bei der das Versatzgut mittels Druckluftbeschleunigung in die Hohlräume eingeblasen wird. Das Versatzmaterial verfügt durch die Druckluftbeschleunigung über kinetische Energie, die eine Versatzverdichtung ermöglicht.

Der generelle Aufbau einer Blasversatztechnologie besteht aus folgenden Komponenten:

- Kompressor zur Bereitstellung des Druckluftbedarfs, wenn kein Druckluftnetz unter Tage vorliegt
- Versatzgutbehälter
- Versatzgutschleuse zum Einbringen des Versatzmaterials in den Druckluftstrom
- Blasversatzleitung
- ggf. Stromversorgung
- Austragseinheit

Wie der oben genannten Aufzählung der Blasversatztechnologiekomponenten entnommen werden kann, ist der Aufbau dieser Versatztechnologie mit dem Aufbau der Spritzbetontechnologie aus der Baustofftechnik vergleichbar.

Die Vorteile der Blasversatztechnologie sind:

- Hohe Versatzmassenströme umsetzbar
- Kontinuierliche Arbeitsweise
- Geringer technischer Aufwand bei vorhandenem Druckluftnetz oder bei Nutzung eines separaten untertägigen Kompressors

Als Nachteile der Blasversatztechnologie gelten:

- Hohe Staubentwicklung
- Hoher Druckluftbedarf
- Potentielle Kornseparation beim Drucklufttransport

Aus den genannten Vor- und Nachteilen der Blasversatztechnologie wird ersichtlich, dass die Einbaudichte des einzubringenden Materials einer hohen Abhängigkeit von den Einflüssen unterliegt. Dieses ist vor allem die Kornseparation während des Versatzeinbringens (Verschiebung der Korngrößenverteilung) sowie dem Druckluftanteil im Versatzmassenstrom, der zu einer Auflockerung führen kann.

Aus diesem Grund wurde sich am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg dafür entschieden einen In situ-Versuch mit der Blasversatztechnologie und dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz durchzuführen.

7.3.2 Adaption der Spritzbetontechnologie auf den Blasversatz

Wie unter Kapitel 7.3.1 aufgezeigt wurde, kann die Spritzbetontechnologie als Blasversatz eingesetzt werden. Dies ist von Vorteil, da die Spritzbetontechnologie im untertägigen Bergbau eine gebräuchliche Technologie darstellt. Als Ausgangstechnologie wurde sich für die Verwendung einer Spritzbetonmaschine des Typs Aliva-237. Die Abbildung stellt die verwendete Spritzbetonmaschine dar.



Abbildung 78: Spritzbetonmaschine des Typs Aliva-237 [Sik15]

Die dargestellte Spritzbetonmaschine ist für die Verarbeitung von 1,7 m³/h – 4 m³/h Spritzbeton ausgelegt. Die standardmäßige Arbeitsleistung der Maschine liegt bei 3,2 m³/h Spritzbeton. Die Fördermenge kann durch die Druckluftzuleitung gesteuert werden. Die maximale Korngröße beträgt 16 mm und ist damit für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz geeignet. [Sik15]

Die verwendete Spritzbetonmaschine sowie der Spritzbetonmaschinenführer wurden vom Unternehmen TS-Bau beauftragt. Als Blasversatzleitung sowie als Austragsdüse wurde sich für einen Durchmesser von 32 mm entschieden. Da ein Größtkorn von 12 mm eingestellt wurde, ist dieser Förderdurchmesser gerechtfertigt.

7.3.3 Versuchsaufbau

Da die Grube Sondershausen aktuell nicht über ein durchgängiges Druckluftnetz unter Tage verfügt, welches eine Durchführung der In situ-Versuche mittels Blasversatz erlaubt, wurde sich für eine In situ-Erprobung der Spritzbetontechnologie als Blasversatz mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz auf den über Tage Gelände des Forschungs- und Lehrbergwerkes „Reichen Zeche“ entschieden. Die Grube verfügt über ein ausgebautes Druckluftnetz, welches den Betrieb einer Spritzbetonmaschine ermöglicht.

Zum Anmischen des Versatzmaterials wurde sich aufgrund der positiven Erfahrungen aus den In situ-Versuchen des Schleuderversatzes für die Verwendung des Zwangsmischers aus Kapitel 7.2.4.2 entschieden. Der Anmischvorgang wurde ebenfalls anhand der Erfahrungen aus den vorherigen In situ-Versuchen adaptiert. Das Versatzmaterial wurde über Tage angemischt und in entsprechende Behälter für die Befüllung der Spritzbetonmaschine abgefüllt. Dabei wurden ein Bautrockner sowie ein Bauzelt beim Anmischen des Versatzmaterials aufgebaut, um die Luftfeuchtigkeit herabzusetzen, sodass keine zusätzliche Wasseraufnahme aus der Umgebungsluft erfolgt.

Das Anmischen des Versatzmaterials erfolgt am Morgen des Versuchstages und der Einbau am Nachmittag. Beim Einbau wurde ein Bauzelt errichtet, um die Staubentwicklung einzugrenzen. Darüber hinaus wurde geplant, das Versatzmaterial in einen entsprechenden Probenkasten aus Holz einzublasen. In diesen Probenkasten wurden Plattendruckmesssensoren eingebaut, die den entstehenden Druck durch das Auftreffen des Versatzmaterials aufzuzeichnen sollten. Abbildung 79 stellt den Probenkasten mit Messsensoren dar.

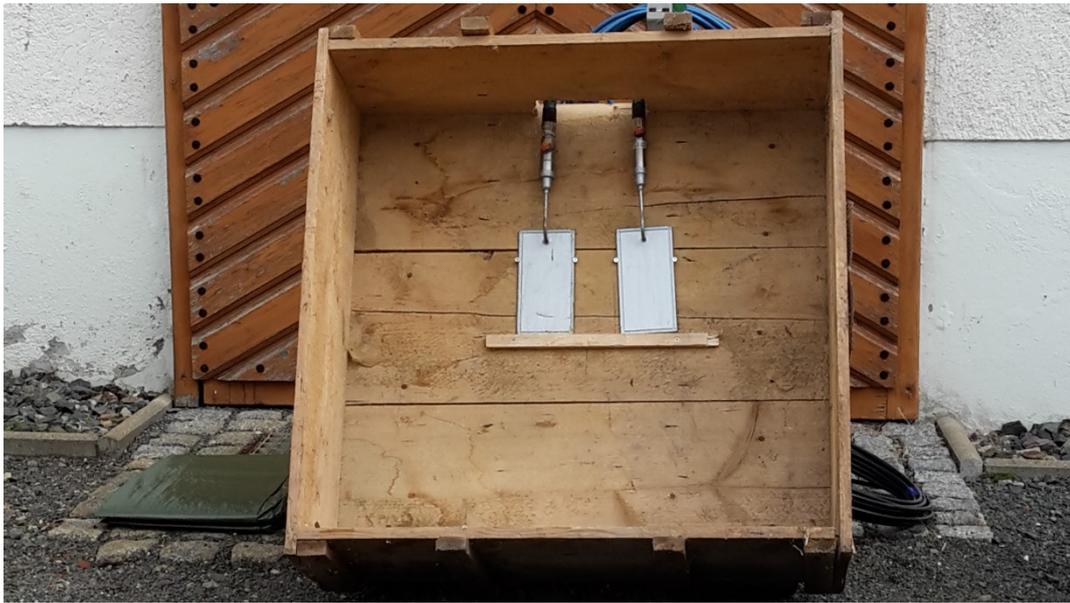


Abbildung 79: Versuchsaufbau des Probenkastens zur Messwertermittlung der Verdichtungsenergie durch die Spritzbetonmaschine

Es wurden zwei Plattendruckmesssensoren wie beim In situ-Versuch der Schleudertechnologie verwendet. Die Messsensoren wurden mittels Messsignalwandler und Verteiler an einen Computer unter Tage angeschlossen, um die Messsignale aufzuzeichnen. Diese sind in Abbildung 74 (S. 139) dargestellt.

Zu Beginn sollte die optimale Fördermenge durch die Druckluftsteuerung für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz ermittelt werden. Anschließend sollte bei der Versuchsdurchführung für 10 Sekunden jeder Plattendruckmesssensor direkt durch die Blasversatzmaschine bestrahlt werden, um die Druckentwicklung aufzuzeichnen. Dies wurde mehrfach wiederholt.

Um die Einbaudichten zu ermitteln wurden analog zu der Schleuderversatztechnologie Probenkörper befüllt. Anhand dieser Probenkörper wurden im Labor die Einbaudichte sowie die Kornverteilung ermittelt. Für die Kornverteilung wurden Probenkörper mit dem Salzgrus befüllt ohne Zugabe des Salzbinders. Dieses soll eine Analyse der mechanischen Beanspruchung des Versatzmaterials durch die Versatztechnologie ermöglichen.

7.3.4 Durchführung des In situ-Blasversatzversuchs

Am 05.09.2016 und 06.09.2016 wurde der In situ-Versuch der Spritzbetontechnologie als Blasversatztechnologie auf dem übertägigen Gelände des Forschungs- und Lehrbergwerkes „Reiche Zeche“ durchgeführt.

Am ersten Tag wurde eine ausreichende Menge des Salzgruskorngemisches angemischt. Das Anmischen erfolgte in einem Bauzelt mit einer Temperatur von ca. 30 °C sowie einer Luftfeuchtigkeit < 30 % durch die Verwendung des Bautrockners. Ein Zumischen des Salzbinders zum Salzgruskorngemisch erfolgte am ersten Tag nicht, um die Materialeigenschaften im Einbauzustand, wie diese zuvor ermittelt wurden, beim Einbau in vergleichbaren Wertebereichen zu belassen. Insgesamt wurden am ersten Tag ca. 700 kg Salzgruskorngemisch angemischt.

Am zweiten Tag erfolgte das Zumischen des Salzbinders zu dem Salzgruskorngemisch. Es wurden insgesamt ca. 820 kg Versatzmaterial für die Versuchsdurchführung angemischt. Im Anschluss erfolgte die Befüllung der Spritzbetonmaschine mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz.

Als erster Versuch wurden die Plattendruckmessensoren zwei Mal für jeweils 10 Sekunden mit dem Versatzmaterial und einer Förderleistung für Beton mit 3,2 m³/h bestrahlt. Vor Beginn der Bestrahlung wurden die Plattendruckmessensoren mit einem Gewicht von ca. 5 kg belastet, um die Funktionstüchtigkeit zu ermitteln.

7.3.5 Auswertung des Blasversatzversuches

Abbildung 80 stellt die Versuchsergebnisse der Plattendruckmessensoren bildlich dar. Dabei ist zu beachten, dass die Messwertaufnahme über den gesamten In situ-Versuch aktiv war, um Einflüsse auf die Einbaudichte aufzunehmen.

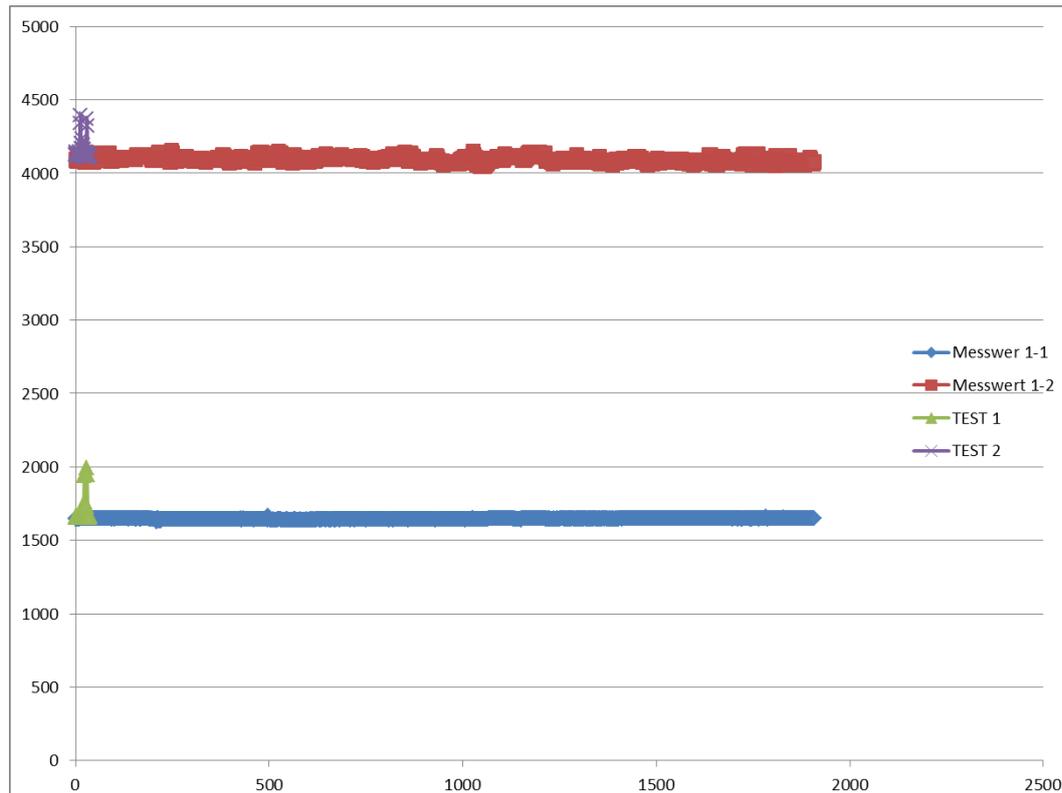


Abbildung 80: Ergebnisse der Plattendruckmessgeber im Blasversatzversuch

Aus Abbildung 80 ist zu entnehmen, dass die Anfangsbelastung zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit (Test 1 und Test 2) erfolgreich waren. Auch die Prüfung der Plattendruckmesssensoren vor Versuchsbeginn bestätigte dies. Im weiteren Verlauf des Versuchs konnten keine messbare Belastung der Plattendruckmesssensoren ermittelt werden. Dies bestätigt, dass durch das Einbringen des Versatzmaterials mit der Blasversatzversuch geringe Einbauenergien erreicht werden können. Es lässt sich eine nahezu gleichbleibende Druckentwicklung im gesamten Versuch ermitteln. Dies ist trotz einer Änderung des Abstands zwischen Austragseinheit und Plattendruckmessgeber der Fall.

Nach Beendigung der Blasversatzversuche, wurden die erstellten Versatzböschungen genauer betrachtet. Es zeigte sich, dass durch die Versatztechnologie eine ausgeprägte Separation des Korngemisches erfolgt. Dies ist vor allem auf die hohe Auffächerung des Versatzstrahls sowie auf den starken Rückprall zurückzuführen. Es zeigte sich, dass eine Agglomeration des Feinkorns im oberen Bereich und des Grobkorns im unteren Bereich der Versatzböschung stattfindet. Abbildung 81 stellt eine Aufnahme der Versatzböschung dar.



Abbildung 81: Nahaufnahme eines eingeblasenen Versatzlörpers mit GESAV-Material

Die ermittelten Einbaudichten betragen zwischen $1,2 \text{ g/cm}^3$ und $1,3 \text{ g/cm}^3$. Dies sind vergleichbare Einbaudichten wie bei der losen Schüttung des reinen Salzgruses. Es ist daher davon auszugehen, dass eine geringe Verdichtungsenergie in das Probenmaterial durch die verwendete Versatztechnologie eingetragen wurde. Dies wurde ebenfalls durch die visuelle Untersuchung der Probenkörper nachgewiesen. Abbildung 82 stellt einen aufgebrochenen Probenkörper dar.

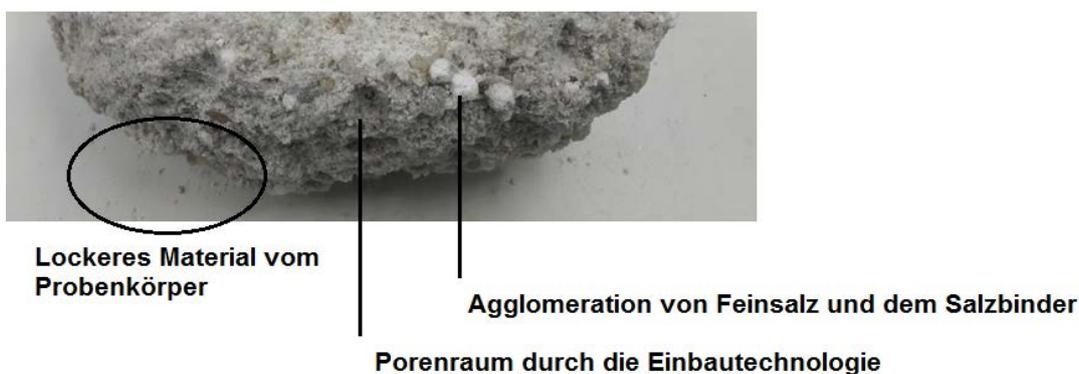


Abbildung 82: Darstellung eines aufgebrochenen Probenkörpers erstellt durch die Spritzbetontechnologie

Aus Abbildung 82 lässt sich entnehmen, dass der Drucklufttransport einen hohen Einfluss auf das Versatzmaterial ausübt. Vor allem die Feinkornkomponenten des Versatzmaterials (Feinsalz und Salzbinder) agglomerieren. Dies bewirkt eine inhomogene Verteilung des Salzbinders und des Feinkorns.

Darüber hinaus wurden technologisch bedingte Porenräume erkannt, die durch den zusätzlichen Drucklufteintrag bzw. dem Rückprall des Grobkorns geschuldet sind. Dies führt zu den ermittelten Einbaudichten $< 1,4 \text{ g/cm}^3$. Die geringen Einbaudichten führen, entsprechend den Ergebnissen der Scherfestigkeitsuntersuchungen, zu einer geringeren Kohäsion des Versatzmaterials und erhöhtem Abrieb bei mechanischer Belastung.

7.3.5 Bewertung des Blasversatzes

Durch die Versuchsdurchführungen lässt sich sagen, dass mit der untersuchten Versatztechnologie teilweise hohe Versatzmassenströme erreichbar sind. Des Weiteren handelt es sich um eine bereits in vielen Gruben standardmäßig vorhandene Technologie, sodass ein technisch einfacher Einbau möglich ist. Darüber hinaus können die ermittelten Einflussfaktoren durch eine Änderung der Vorgehensweisen abgeschwächt und ggf. höhere Einbaudichten erreicht werden. Aus diesem Grund ist eine weiter führende Untersuchung dieser Einbautechnologie zu empfehlen.

7.3.5 Planung eines Drehkreuzversuchsstands zur Ermittlung der mechanische Materialbelastung beim Rohrtransport

Im Blasversatzversuch wurde gezeigt, dass eine starke Separation des Korngemisches durch den Drucklufttransport im Rohrsystemen auftritt. Da im Blasversatzversuch eine Separation des Grobkorns vom Feinkorn erkannt wurde, konnten keine repräsentativen Probenkörper entnommen werden, um die mechanische Belastung des Korngemisches durch den Rohrtransport festzustellen.

Aus diesem Grund wurde ein Drehkreuzversuchsstand geplant, mit dem die mechanische Belastung unterschiedlicher Transporteinflüsse in Rohrsystemen auf das Salzgrusversatzmaterial festzustellen. Die Versuchsdurchführung sollte bereits begleitend zum Blasversatzversuch durchgeführt werden, jedoch verzögerte sich der Maschinenbau aufgrund technischer Fragestellungen. Der Versuch soll nun zu Beginn der anschließenden In situ-Phase nachgeholt werden.

Der schematische Aufbau des Drehkreuzversuchsstands ist in Abbildung 83 dargestellt.

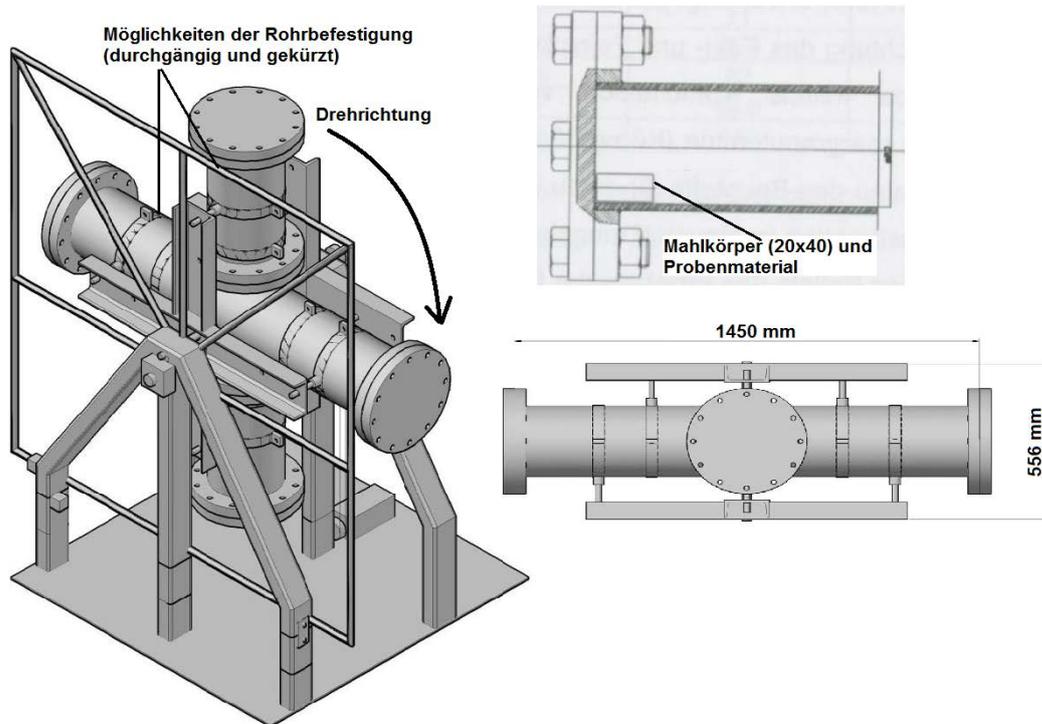


Abbildung 83: Konstruktionsbeispiel für den Drehkreuzversuchsstand

Rohrstücken, in denen sich das zu untersuchende Probenmaterial sowie ein Körper mit einer definierten Masse. Die vier Rohre sind zentrisch an einer Drehachse befestigt, sodass die Rohre in 360° rotieren können.

Bei der Rotation mit einer definierten Geschwindigkeit bewegt sich das Probenmaterial in dem Rohr von einer Seite zur nächsten. Der Gewichtskörper wird ebenfalls bewegt und führt eine entsprechende mechanische Energie in das Probenmaterial mit ein.

Durch die entsprechende Materialbewegung, der Reibung an der Rohrwandung sowie dem Energieeintrag durch den Gewichtskörper, wird eine entsprechende mechanische Belastung des Versatzmaterials erreicht. Diese ist unmittelbar von der Drehzahl und Rohrlänge abhängig. Anhand dieser Energie kann die Materialbelastung über eine definierte Rohrförderlänge simuliert und der Einfluss auf das Versatzmaterial identifiziert werden. Da die Rohrlänge mit ca. 0,5 m festliegt, ist in den Versuchen die zu untersuchende Variable die Drehgeschwindigkeit. Dieses wird unter Berücksichtigung der Förderlängen in den In situ-Versuchen untersucht.

Entsprechende Einflüsse können so in den Versatzkörperuntersuchungen berücksichtigt werden.

7.4 Adaption des Schleuderstrahlverfahrens

7.4.1 Grundlagen der Schleuderstrahltechnologie

Die Schleuderstrahltechnologie wurde für die Erstellung von Betonbauwerken entwickelt. Ausgangspunkt für die Entwicklung war die Intention zur Verbesserung der Spritzbetontechnologie. Die Verringerung der Staubentwicklung sowie die Erhöhung der Einbaudichte des Betons auf Baustellen war ein zentraler Faktor bei der Entwicklung der Schleuderstrahltechnologie in den 1980ern.

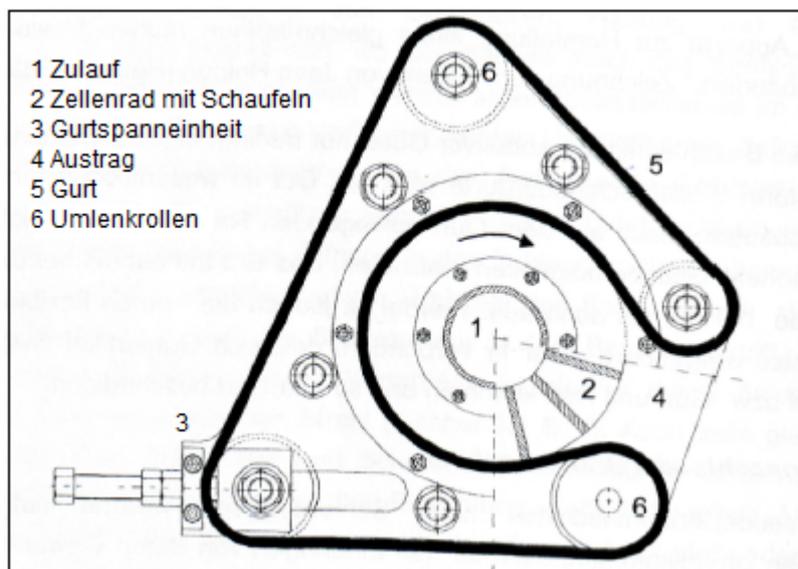


Abbildung 84: Aufbau einer Betonschleudermaschine – übernommen aus [Sch99]

Entwickelt wurde die Technologie an der RWTH Aachen am Institut für Bergbaukunde II. Basierend auf der heute noch zur Verfügung stehenden Datengrundlage bezüglich der Schleuderstrahltechnologie wurde eine Konstruktion der Maschine unter Berücksichtigung des verwendeten Versatzmaterials in [Wei17] erstellt. Ausgangsdaten waren dabei Funktionsbeschreibungen und Abbildungen aus Veröffentlichungen. Als Basis wurde die Funktion einer Betonschleudermaschine in [Sch99] beschrieben verwendet.

Das Prinzip der Betonschleudermaschine basiert im Wesentlichen auf der Rotation eines Zellenrads, das durch einen umlaufenden Riemen in einem Winkel von $> 250^\circ$ verschlossen wird (siehe Abbildung 84). Der einzubauende Beton wird axial in das Zellenrad zugeführt und radial beschleunigt. An der unverschlossenen Seite des Zellenrads erfolgt der Materialaustrag mit einer definierten Wurfgeschwindigkeit.

Die Weiterentwicklung des in Abbildung 80 dargestellten Maschinenprinzips führte zur Schleuderstrahlmaschine. Diese wurde am Institut für Bergbaukunde II entwickelt und untersucht.

Der Vorteil der Versatztechnologie ist maßgeblich der geringe Verschleiß aufgrund des mitlaufenden Riemens sowie die daraus resultierende geringe mechanische Belastung des Betons. Darüber hinaus wird der Beton, im Unterschied zum Spritzbeton pulsartig eingetragen. Dies ist auf die Unterteilung in Zellenabschnitten zurückzuführen. Des Weiteren ist eine geringe Auffächerung des Schleuderstrahls im Vergleich zu herkömmlichen Spritzverfahren zu erwarten. Zielstellung ist es eine hohe Einbaudichte des Betons sowie einen geringen Rückprall zu erreichen.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieser Maschinenteknologie ist die geringe Staubentwicklung. Dies ist vor allem in untertägigen Grubenbauen von Bedeutung.

Bisherige Veröffentlichungen, die sich mit der Untersuchung der Schleuderstrahlmaschine befassen, zeigen eine generelle Eignung der Maschinenteknologie. [Sch99]

7.4.2 Zielstellungen der Adaption des Schleuderstrahlverfahrens auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz

Im Rahmen der labortechnischen Materialuntersuchungen wurde erkannt, dass die Materialeigenschaften des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes mit zunehmender Einbaudichte optimiert werden. Aus diesem Grund ist eine hohe Einbaudichte unter Tage vorteilhaft für das Versatzmaterial.

Untersuchungen des Schleuderverfahrens resultierten in Einbaudichten des gefügestabilisierten Salzgrusversatzes wie bei herkömmlichen Salzgrusversatz. Aus diesem Grund wurde sich dafür entschieden im Rahmen einer folgenden In situ-Phase das Schleuderstrahlverfahren als Einbautechnologie mit zu betrachten.

Als zu erwartende vorteilhafte Einflüsse der Schleuderstrahltechnologie auf Versatzkörper unter Tage sind:

- Optimierung der zu erreichenden Einbaudichten
- Geringe mechanische Belastung des Versatzmaterials durch die verwendete Einbautechnologie und eine definierte Kornverteilungskurve
- Geringe Staubentwicklungen unter Tage am Arbeitsort
- Geringere Einflüsse auf die Salzbinderverteilung im Steinsalzgrusgefüge

Die zu erwartenden positiven Einflüsse auf das Versatzmaterial sollen in der in situ-Phase untersucht werden. Hierfür ist die Verwendung einer Schleuderstrahlmaschine unumgänglich.

7.4.3 Adaption der Schleuderstrahltechnologie auf die Einsatzbedingungen für GESAV

Im Rahmen einer Masterarbeit in Kooperation vom Institut für Bergbau und Spezialtiefbau sowie dem Institut für Maschinenelemente, Konstruktion und Fertigung der TU Bergakademie Freiberg wurde anhand des vorhandenen Wissenstands über Schleuderstrahlmaschinen eine grundlegende Konstruktion sowie Adaption auf Salzgrusversatzmaterialien durchgeführt.

Im Mittelpunkt der Konstruktion lagen dabei die zentralen Maschinenkomponenten. Dieses sind das Zellenrad, der umschließende Riemen, Antrieb, Materialzuführung sowie die Halterungskomponenten.

Als Schleudereinheit wurde ein Schleuderrad mit umschließenden Riemen konstruiert. In vorhandenen Literaturquellen wurden Versuche mit einem Schleuderraddurchmesser von $d = 250$ mm durchgeführt [Sch99]. Aufgrund der Adaption der Maschinentechologie wurde ein Schleuderraddurchmesser in einem Bereich von 300 mm – 400 mm [Wei17] festgelegt. Dies ist auf die Abweichung der Kornverteilung des Salzgruskorngemisches von herkömmlichen Betonbaustoffen zurückzuführen. Die umgebenden Tragrollen zur Führung des Riemens wurden nach Berechnung der Walkarbeit mit einem Durchmesser von $d = 200$ mm beschrieben. Sodass die Konstruktion des Entwurfes für die Schleudereinheit der Maschine wie in Abbildung 85 dargestellt aussieht. [Wei17]

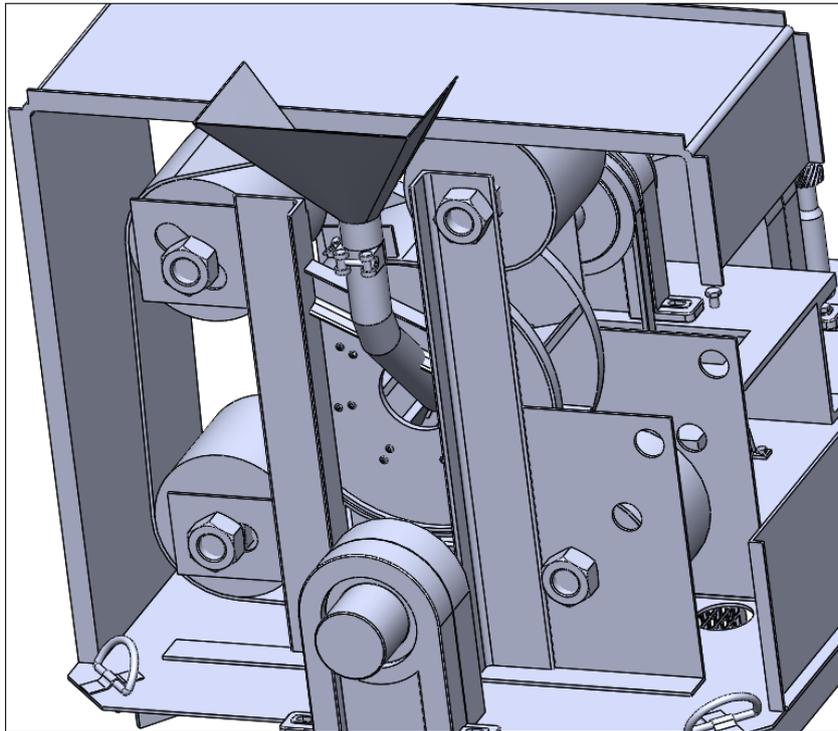


Abbildung 85: Entwurfskonstruktion der Schleudereinheit einer Schleuderstrahlmaschine [Wei17]

Die Materialzuführung erfolgt weiterhin axial in das Zentrum des Schleuderrads. Das Eintretende Material verteilt sich in die Zellen und wird radial beschleunigt und ausgetragen. Zur Materialzuführung wurde sich erst einmal für eine Schwerkraftbedingt Zuführung entschieden. Durch eine Fördermaschine soll das Versatzmaterial in eine Trichtereinheit gefördert und von dort aus zum Schleuderradzentrum geleitet werden. Die Materialzuführung kann des Weiteren auch zu einer Druckluftförderung in das Schleuderrad geändert werden. [Wei17]

Der Antrieb des Schleuderrads erfolgt direkt über eine Antriebswelle, die über einen Antriebsriemen mit dem Antriebsmotor unterhalb der Schleudereinheit verbunden ist. Der umlaufende Riemen wird durch Reibkraft mitbeschleunigt. Als Antriebsmotor wurde sich für eine geforderte Antriebsleistung von ca. 4,32 kW entschieden. In Kombination mit der Auslegung des Schleuderrads soll somit ein theoretischer Volumenstrom von ca. 60 kg/min möglich sein. [Wei17]

Es ist zurzeit geplant, dass die Schleudereinheit sowie die Antriebswelle auf einer Grundplatte aufgebaut werden. Die Ausrichtung der Grundplatte ermöglicht eine Änderung des Materialeinbauwinkels. Es soll eine minimale Dimensionierung in Höhe und Breite erfolgen, um unter Tage einen möglichst vorteilhaften Einbauprozess zu ermöglichen. Daher wird der Antriebsmotor unterhalb der Grundplatte angebracht. Dies bewirkt neben einer schmaleren Maschinendimensionierung auch einen

höheren Sicherheitsfaktor, da der Motor so außerhalb des Handlungsraumes von Personen liegt und eingekapselt werden kann. [Wei17]

Die Schleuderstrahlmaschine für das Einbringen von gefügestabilisierten Salzgrusversatz soll so geplant werden, dass eine Großzahl an Einbringvariablen (Geschwindigkeit, Winkel, Schaufelstellungen, etc.) und deren Einfluss auf die Versatzqualität untersucht werden können. Da in der bisherigen Literatur gezeigt wurde, dass unterschiedliche Maschinenparameter einen Einfluss auf die Betonqualität und das Einbringverhalten besitzen [Sch99], müssen diese Maschinenparameter durch Versuchsreihen auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz angepasst werden.

Da die Schleuderstrahlmaschine über schnellbewegte Teile verfügt (Schleuderrad, Antriebswelle, Antriebsriemen und Antriebsmotor) ist eine Sicherung der Maschinenkomponenten gegen den Eingriff von Mensch und Material zu schützen. Dies wird durch eine Einhüllung der betreffenden Teile gewährleistet. [Wei17]

Die Aufstellung der Schleuderstrahlmaschine kann durch unterschiedliche Verfahren erfolgen. Zur verbesserten Beweglichkeit und Gewichtsreduktion ist bisher geplant eine Aufstellung der Maschine mittels Dreibein durchzuführen. Dies ist eine vorläufige Planung. Da es im Laufe des Maschinenbetriebs zu Schwingungen kommen kann, die bei der Maschinenkonstruktion versucht wurden zu berücksichtigen, kann eine Änderung der Aufstellkomponenten erfolgen.

Die vorläufige Konstruktion der Schleuderstrahlmaschine ist in Abbildung 86 dargestellt.

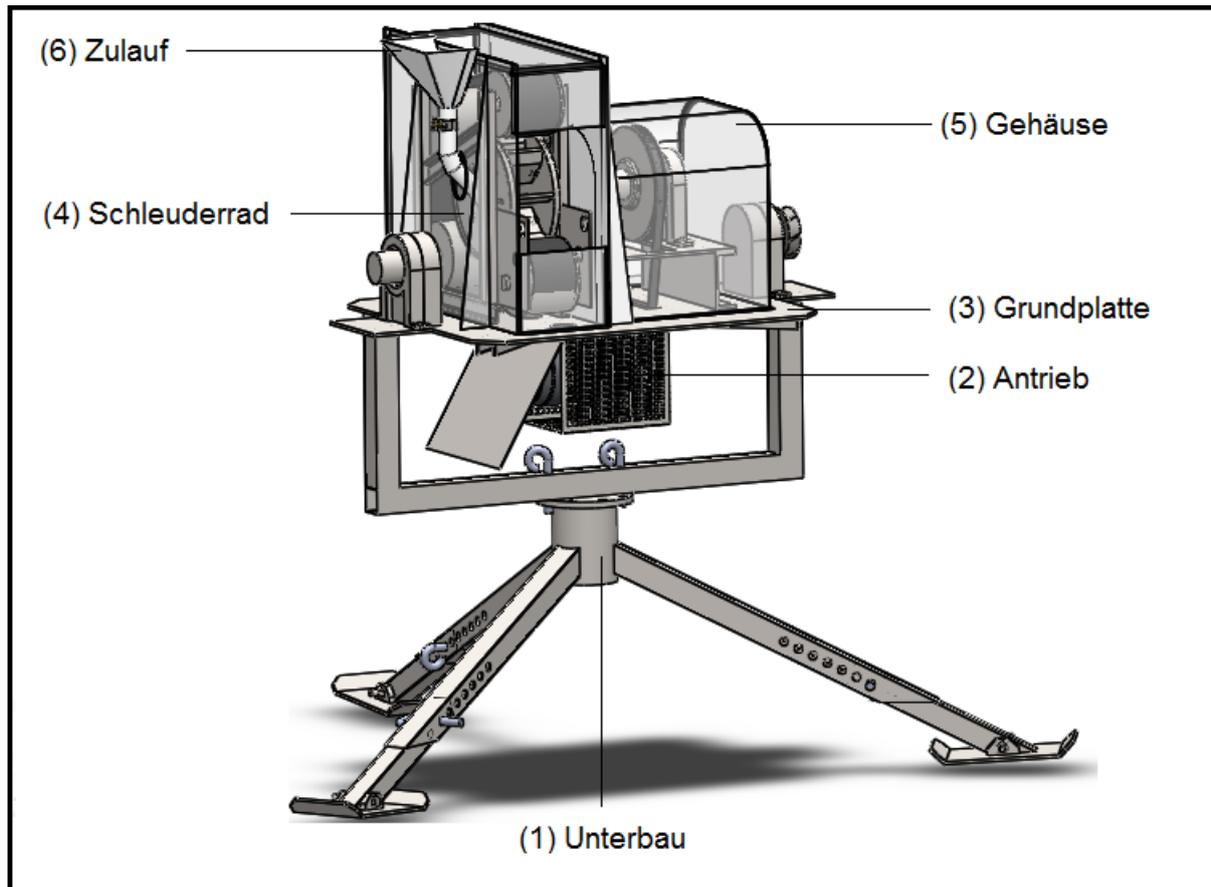


Abbildung 86: Vorläufige Konstruktion der Schleuderstrahlmaschine für das Einbringen von gefügestabilisierten Salzgrusversatz nach [Wei17]

Bei der Konstruktion der in Abbildung 82 dargestellten Schleuderstrahlmaschine wurden Problematiken aufgezeigt, deren endgültige Lösung noch aussteht. Dies betrifft maßgeblich die Auswirkungen der Maschinenvibration auf das Materialeinbringen, die Verwendung eines geeigneten Riemens zum Umlauf des Schleuderrads sowie der Materialzulauf in das Schleuderrad.

Eine Überprüfung der bisherigen Konstruktion sowie eine abschließende Konstruktion und der Bau einer entsprechenden Maschine sind im Rahmen der In situ-Phase geplant. Generell ist festzustellen, dass eine Eignung der Maschinenteknologie für den gefügestabilisierten Salzgrusversatz vorliegt. Die technologischen Einflüsse der Schleuderstrahlmaschine auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz werden als positiv angesehen.

Für die endgültige Maschinenkonzipierung und -dimensionierung ist eine vorhergehende Versuchsreihe zu empfehlen, um alle Einflussfaktoren der Maschinenteknologie (Schleudergeschwindigkeit, Austragskomponenten, Schaufelstellungen, etc.) zu identifizieren und zu optimieren.

7.5 Entwicklung einer neuartigen Blasversatztechnologie

Der Versuch mit konventioneller Blasversatztechnologie hat gezeigt, dass der pneumatische Transport des fertig angemischten GESAV-Materials zu Agglomerationen von Calciumsulfathalbhydrat, Kieserit, Kaliumsulfat und der Feinkornfraktion des Salzgruses führt. Diese Agglomerationen entstehen beim pneumatischen Rohrleitungstransport vom Versatzgutbehälter zur Austragseinheit (vgl. Abbildung 80).

Wie bereits beschrieben, ist die Ursache für die Agglomeration der feinen Bestandteile die frühe Zugabe der $MgCl_2$ -Lösung. Beim durchgeführten Versuch mit konventioneller Blasversatztechnologie wurde das GESAV-Material vollständig vor Aufgabe in den Versatzgutbehälter angemischt, was bedeutet, dass das GESAV-Material über den gesamten Förderweg innerhalb der Blasversatzmaschine feucht ist. Der pneumatische Transport des feuchten Materials führt zur beschriebenen Agglomeration.

Zur Lösung dieses Problems ist es notwendig den flüssigen Anteil des GESAV-Materials erst kurz vor der Austragseinheit zuzugeben. Das entspricht dem technologischen Ablauf des Trockenspritzverfahrens. Die direkte Übertragung des Trockenspritzverfahrens auf GESAV-Material ist dennoch nicht möglich, da der Masseanteil der flüssigen Phase bei Betonen deutlich größer ist. Beispielsweise liegt der empfohlene Massenanteil des Anmachwassers bei einem Beton der Zementfestigkeitsklasse C 8/10 mit einem Größtkorn von 16 mm im Sieblinienbereich 4 zwischen 4,7 und 6,9 Massen-%. Der Massenanteil der $MgCl_2$ -Lösung am GESAV-Material beträgt 3,75 Massen-%. Die dynamische Viskosität der Magnesiumchloridlösung liegt bei ca. 14 mPas. Die dynamische Viskosität von Wasser beträgt 1 mPas und ist damit um das ca. 14-fache geringer. Die Erfolgsaussichten auf eine gleichmäßige Benetzung des GESAV-Materials beim Trockenspritzverfahren werden demnach aufgrund des geringeren Anteils an flüssiger Phase des GESAV-Materials und der höheren Viskosität der $MgCl_2$ -Lösung als gering eingeschätzt.

Ein Ansatz die Nachteile der GESAV-Materials (hohe Viskosität der $MgCl_2$ -Lösung und geringer Massenanteil der flüssigen Phase) in Bezug auf das Trockenspritzverfahren auszugleichen ist die dosierte Zugabe in die Förderleitung der Spritzbeton- resp. Blasversatzmaschine. Die Lösung muss in einer Form zugegeben werden, welche eine großflächige Verteilung im Feststoff-Druckluft-Gemisch in der Förderleitung erlaubt

Zur Untersuchung einer solchen Zugabetechnologie wurde ein Versuchsstand im Institut für Bergbau und Spezialtiefbau errichtet. Dieser ist in Abbildung 87 dargestellt und besteht aus einem Dosierer und einer rotierenden Benetzungskammer, welche die Förderleitung darstellt in der sich der zu benetzende Feststoff befindet.

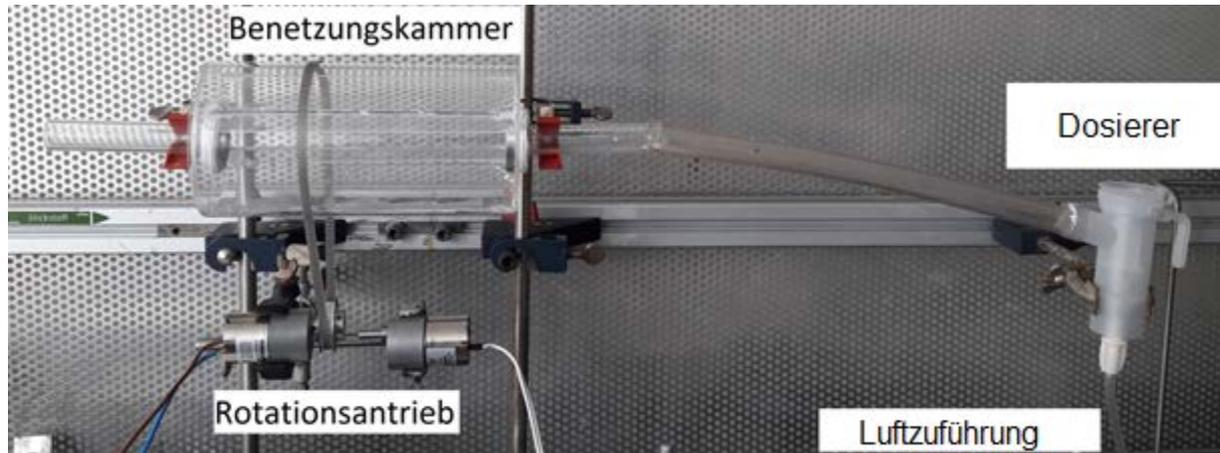


Abbildung 87: Aerosolversuchsstand

Die Funktionsfähigkeit des Verfahrens wurde nachgewiesen mit der Zugabe von Wasser in einer Form, was die Benetzung von Calciumsulfathalhydrat in der rotierenden Kammer ermöglicht. Der benetzte Feststoff wurde anschließend in einen Probekörper eingebaut und ist darin abgebunden.

7.6 Grundlagen eines Qualitätssicherungsprogramms

7.6.1 Qualitätssicherung vor dem Einbau

Zur Entwicklung eines Qualitätssicherungsverfahrens für das GESAV-Material wurden Verfahren aus der Baustoffindustrie auf deren Eignung für das GESAV-Material hin überprüft. Einen Überblick über die betrachteten Verfahren für Schüttgüter und deren Eignung für das GESAV-Material gibt Tabelle 21. Im Anschluss werden die geeigneten Verfahren (Siebanalyse, Schüttdichtenbestimmung) erläutert.

Tabelle 21: Untersuchte Schüttgut-Prüfverfahren am GESAV-Material

| Verfahren | Eignung | Bemerkungen |
|--|--|---|
| Siebanalyse | Geeignet zur Kornverteilungskontrolle von Salzgrus | Übertägige Siebanalyse u. U. nicht ausreichend, da bei Transport von Salzgrus über Fallleitungen nach untertage Kornbruch auftreten kann, was zu einer Verschiebung der Sieblinie führt. In Abhängigkeit des Versatztransportes muss eine erneute Siebanalyse untertage erfolgen. |
| Bestimmung der Schüttdichte | Geeignet zur QS-Kontrolle der Salzgruskörnung, des Salzbinder-, des Polyhalittrockengemisch- und $MgCl_2$ -Lösunganteils | Einfache und schnelle Ausführung über- und untertage möglich. |
| Bestimmung des Wassergehalts durch Trocknung bei $105^\circ C$ | Nicht geeignet | Ermittelter Wassergehalt der Salzgruskörnung liegt im Bereich der Fehlertoleranz der Waage |

Siebanalyse

Zur Bestimmung der Eignung der Siebanalyse wurden 8 Siebversuche durchgeführt. In Abbildung 88 ist dargestellt, dass die Sieblinien der einzelnen Eignungsversuche den gleichen charakteristischen Verlauf aufweisen. Die maximale Abweichung zwischen zwei Datenpunkten beträgt 5 %abs (Δ Versuche 3 und 7 bei 1 mm Maschenweite).

Die Siebanalyse wird damit als geeignet zur Ermittlung der Korngrößenverteilung eingeschätzt.

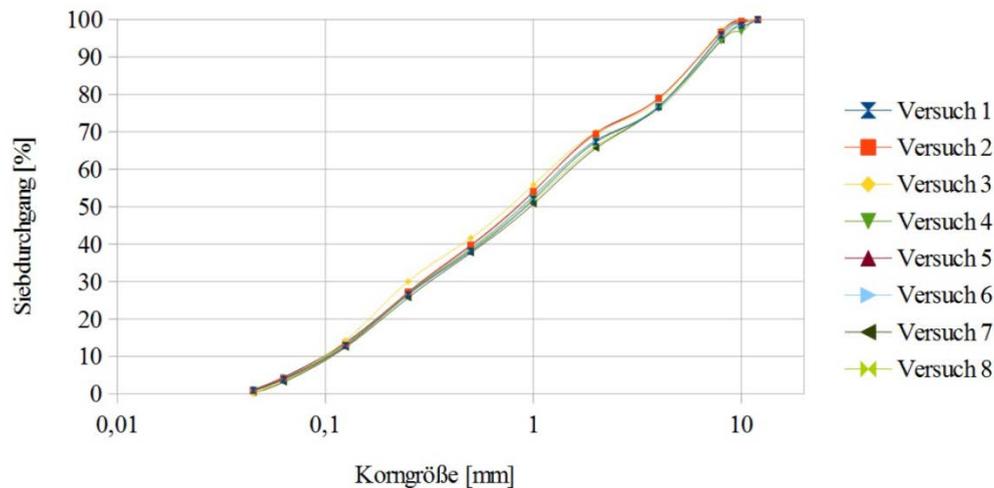


Abbildung 88: Sieblinien der labortechnischen Untersuchung zur Eignung der Siebanalyse

Bestimmung der Schüttdichte

Die Untersuchung zur Eignung der Schüttdichte wurde während vier verschiedener Phasen bei der Herstellung des GESAV-Materials durchgeführt.

Schüttdichte der Salzgruskörnung

Der Zusammenhang zwischen den Anteilen der einzelnen Fraktionen (sehr grob = ÜK↑, grob = Bd 6↑, fein = Bd 8↑; sehr fein = FK↑) an der Salzgruskörnung und der Schüttdichte wird in Abbildung 89 dargestellt. Je höher der Anteil des Feinkorns wird, desto geringer wird die Schüttdichte. Hintergrund ist die Ablagerung des Feinkorns zwischen das Grobkorn, was zu einer Vergrößerung des Porenraums im Vergleich zum Kugelpackungsmodell führt.

Die Ermittlung der Schüttdichte ist geeignet um Abweichungen der Salzgruszusammensetzung hinsichtlich des Anteils der einzelnen Salzgrusfraktionen zu identifizieren.

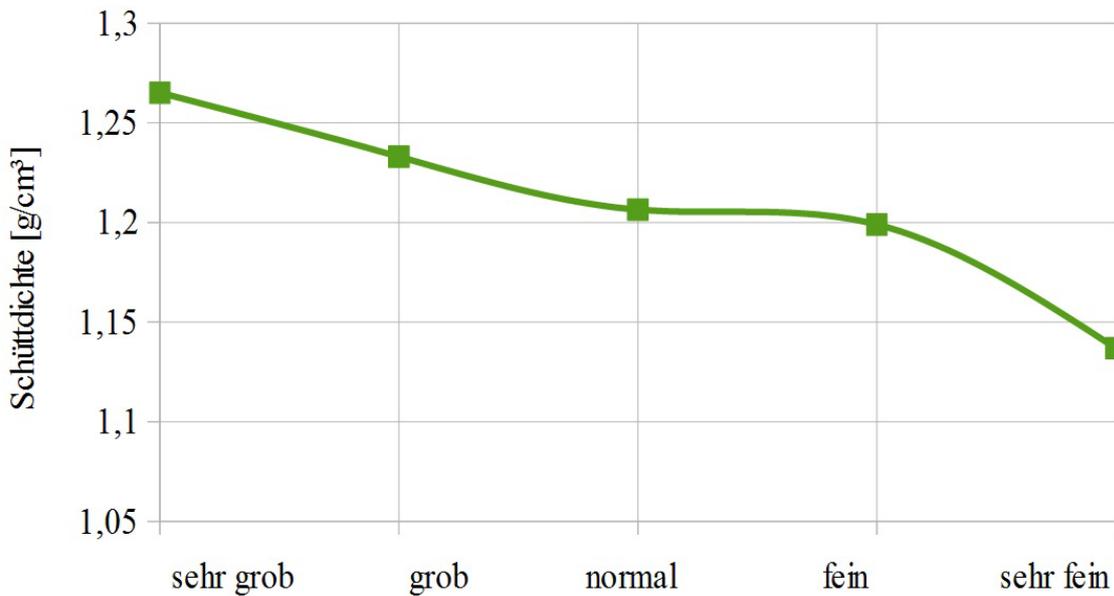


Abbildung 89: Zusammenhang von Korngrößenverteilung des Salzgruses und Schüttdichte

Schüttdichte des finalen GESAV-Materials

Die Versuche zur Ermittlung der Schüttdichte von fertig angemischtem GESAV-Material (Salzgrus + Salzbinder) zeigen den gleichen Zusammenhang wie die Untersuchungen an den Salzgrusfraktionen, wie Abbildung 90 zeigt.

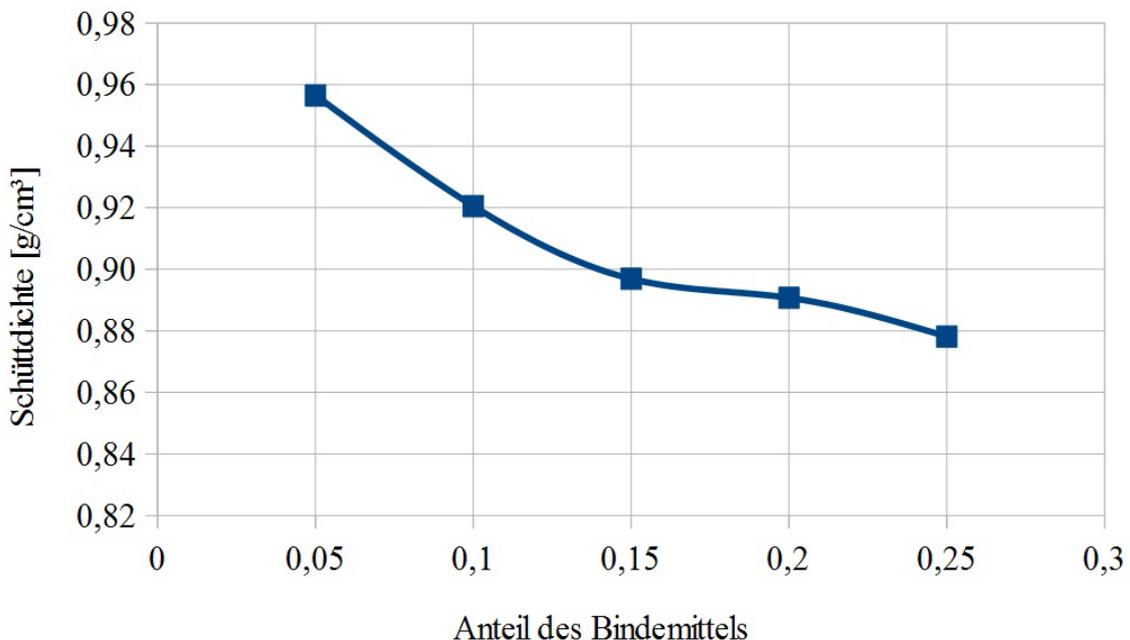


Abbildung 90: Zusammenhang von Salzbinderanteil und Schüttdichte

Die Schüttdichte ist ein geeigneter Indikator um den Anteil des Salzbinders in fertig angemischtem GESAV-Material zu quantifizieren.

Schüttdichte von Salzgrus und Polyhalittrockengemisch

Ein erhöhter Anteil des Polyhalittrockengemischs bewirkt eine Zunahme der Schüttdichte, wie in Abbildung 91 dargestellt.

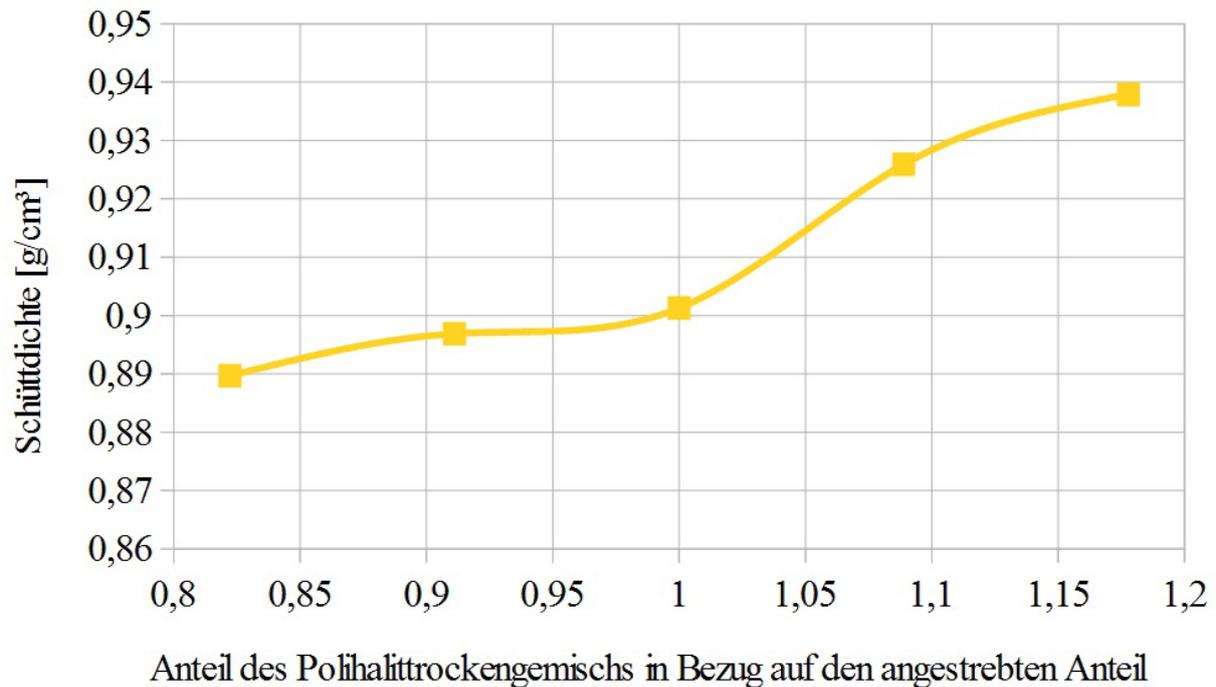


Abbildung 91: Zusammenhang von Polyhalittrockengemischanteil und Schüttdichte

Mithilfe der Schüttdichte kann ein erhöhter Anteil des Polyhalittrockengemischs festgestellt werden.

Anteil der Magnesiumchloridlösung

Abbildung 92 zeigt den Zusammenhang vom Anteil der Magnesiumchloridlösung am GESAV-Material und der Schüttdichte. Es ist zu erkennen, dass die Schüttdichte mit sinkendem Lösungsanteil abnimmt.

Die Schüttdichte ist ein geeigneter Indikator um einen zu geringen Anteil an Magnesiumchloridlösung zu erkennen.

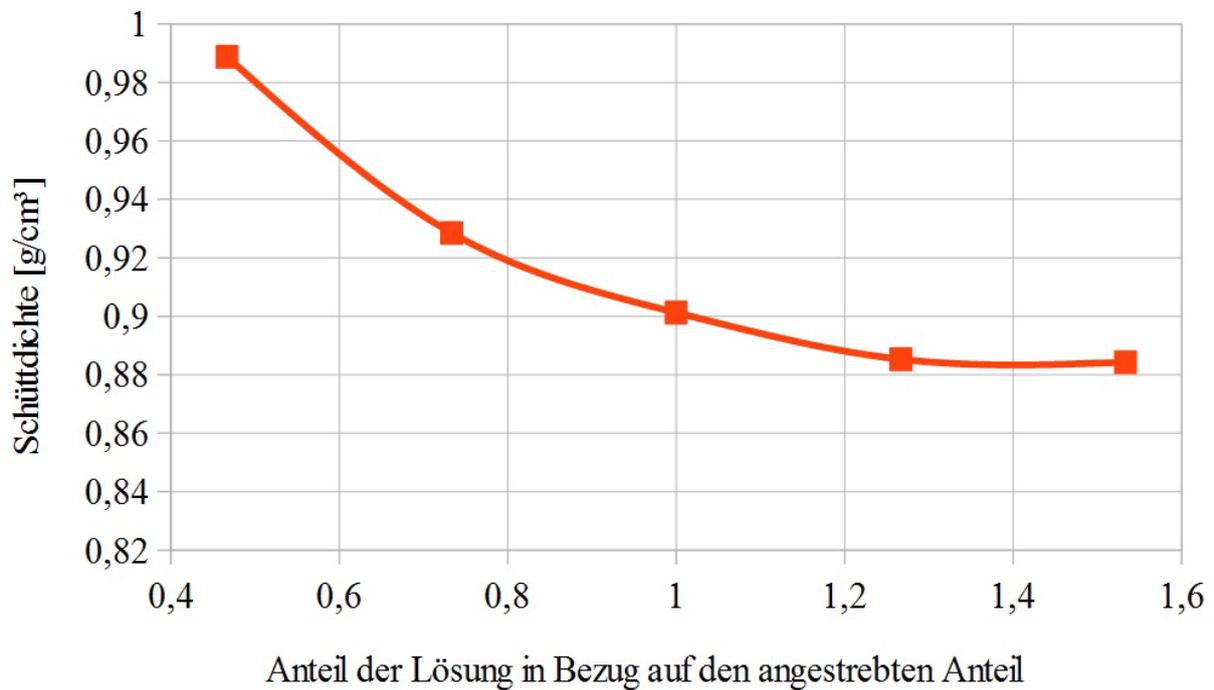


Abbildung 92: Zusammenhang von Lösungsanteil und Schüttdichte

7.6.2 Qualitätssicherung nach dem Einbau

Zur Überwachung des ordnungsgemäßen Einbaus des GESAV-Materials wurden die in Tabelle 22 aufgeführten Verfahren untersucht. Geeignete Verfahren werden im Anschluss dargestellt.

Tabelle 22: Untersuchte Baustoff-Prüfverfahren an ausgehärteten Proben aus GESAV-Material

| Verfahren | Eignung | Bemerkungen |
|------------------------------|--|---|
| Einaxialer Druckversuch | Geeignet zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit von Bohrkernen aus dem erstellten Versatzkörper | Werte aus Laborversuchen und in situ-Werte sind nicht vergleichbar |
| Ermittlung der Ausziehkraft | Nicht geeignet | Adaption des Ausziehtests auf GESAV-Material fehlerbehaftet |
| Rückprallhammer nach Schmidt | Nicht geeignet | Die Energie des Rückprallhammers wird bei der Zertrümmerung des GESAV-Materials umgesetzt. Nur geringe Energierückgabe an den Schlagbolzen. |
| Härteprüfung nach Brinell | Geeignet zur Überprüfung des Bindemittelanteils aus Bohrkernen oder beim Einbau entnommener Proben | Keine Aussage, ob Salzbindeanteil zu hoch oder zu niedrig |

Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit

Zur Prüfung des Verfahrens zur Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit auf Eignung für das GESAV-Material wurden zwei Probekörper hergestellt, welcher unter Last erhärtet sind, um die Bedingungen bei Einbau im Labormaßstab zu simulieren. Nach 6 Tagen wurde die einaxiale Druckfestigkeit bestimmt. Die bestimmten Werte der Bruchspannung betragen:

230 kN/m² (Probekörper 1)

150 kN/m² (Probekörper 2)

Eine weitere Versuchsreihe mit einer Erhärungszeit von 21 Tagen wurde ohne Lasteintrag durchgeführt. Die mittlere Druckfestigkeit der sechs untersuchten Probekörper beträgt 490 kN/m².

Ein zusätzlicher Lasteintrag bei der Erhärtung führt nicht zu einer vorzeitigen Erhöhung der Druckfestigkeit.

Zur Ableitung von Aussagen zur Qualität des eingebauten GESAV-Materials durch die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit muss die Endfestigkeit erreicht sein. Die Probekörper können einerseits durch Kernbohrungen gewonnen werden oder

andererseits durch Entnahme von GESAV-Material aus dem Versatzmaterialstrom beim Einbau. Bei Entnahme von Bohrkernen wird der Versatzkörper lokal geschädigt. Vergleichswerte zur Endfestigkeit werden im Anschlussprojekt GESAV II bestimmt. Die Entnahme aus dem Versatzmaterialstrom beim Einbau und dem anschließenden händischen Einbau in ein Probekörpergefäß hat Laborcharakter, es können daher Vergleichswerte aus Laborversuchen herangezogen werden.

Härteprüfung nach Brinell

Die Härteprüfung nach Brinell ist ein geeignetes Verfahren zur Bestimmung des Bindemittelanteils. Es wurden drei Probekörper hergestellt, an welchen die Brinellhärte nach 2 und 6 Tagen bestimmt wurde. Die grafische Auswertung der Versuche ist in Abbildung 93 dargestellt.

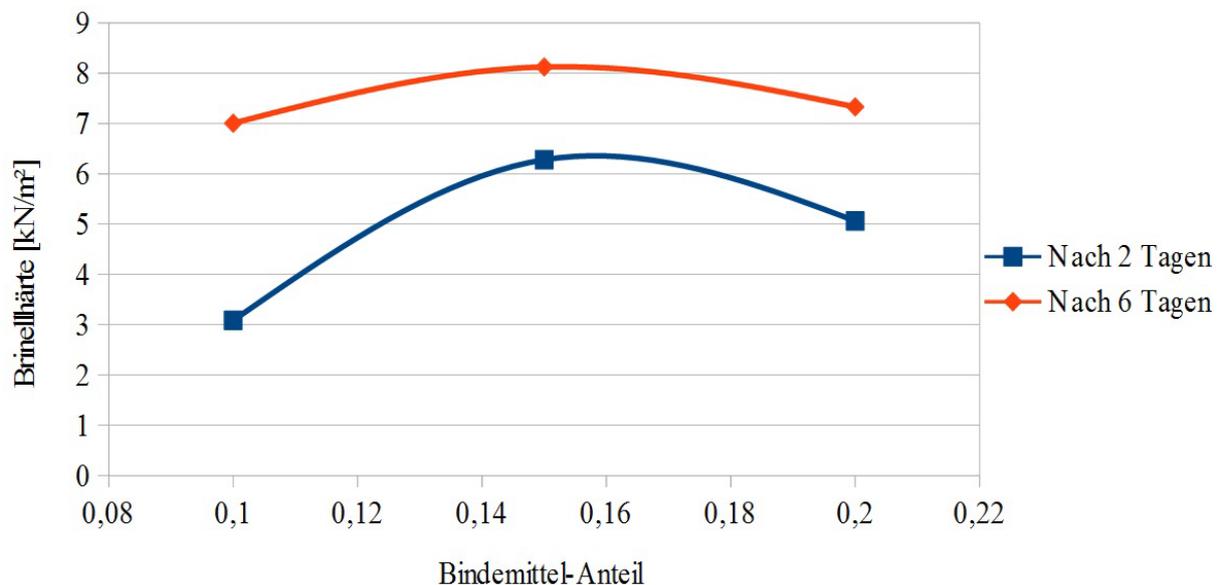


Abbildung 93: Zusammenhang von Brinellhärte und Salzbindeanteil

Der gemessene Peak-Wert der Brinellhärte liegt im Bereich des in der Rezeptur vorgesehenen Salzbindeanteils. Die bestimmte Brinellhärte erlaubt es damit Rückschlüsse zu ziehen, ob der eingebrachte Salzbindeanteil im vorgesehen Bereich liegt. Im Falle einer nicht optimalen Brinellhärte können jedoch keine Aussagen darüber getroffen werden, ob der Salzbindeanteil zu hoch oder zu niedrig ist.

Die Probekörper können analog zum einaxialen Druckversuch aus Bohrkernen oder dem Versatzmaterialvolumenstrom gewonnen werden.

8 Planung einer anschließenden In situ-Phase

8.1 Zielstellungen einer In situ-Phase

Anschließend an die Laborphase GESAV – Phase 1 wird eine In situ-Phase GESAV – Phase 2 folgen. Das Ziel der In situ-Phase ist die Feststellung des Einflusses von Versatztechnologien auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz, die Identifizierung optimaler Einbautechnologien sowie die Materialprüfung von Versatzkörpern in situ.

In der Laborphase GESAV – Phase 1 wurde die Rezeptur für einen gefügestabilisierten Salzgrusversatz entwickelt sowie das Versatzmaterial im Einbauzustand und als Versatzmaterial charakterisiert. Durch die In situ-Phase sollen die Ergebnisse verifiziert sowie weiterführend untersucht werden. Versatzkörper werden unter Tage mittels vier unterschiedlichen Versatztechnologien erstellt. Über einen Zeitraum von 6 Monaten werden diese messtechnisch überwacht. Abschließend werden die Versatzkörper mittels Probenkörpern charakterisiert und die Ergebnisse mit denen in der Laborphase ermittelten Werten verglichen.

Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Faktoren Einbaudichte sowie Kornverteilung, da diese unmittelbaren Einfluss auf die Versatzqualität ausüben und von den verwendeten Einbautechnologien abhängig sind.

8.2 Planung der In situ-Phase

In GESAV – Phase 1 wurden bereits Grundlagenuntersuchungen zu ausgewählten Versatztechnologien durchgeführt. Darüber hinaus wurden bereits Planungen von optimierten Versatztechnologien durchgeführt. Um Einflussfaktoren herkömmlicher Versatztechnologien zu identifizieren, wurde sich dafür entschieden das Blasversatzverfahren (pneumatisch) und das Schleuderversatzverfahren (mechanisch) anzuwenden. Als optimierte Versatzverfahren kommen das Schleuderstrahlverfahren sowie das neuartige Aerosolverfahren zur Anwendung.

Das Blasversatzverfahren zeigte bei Grundlagenuntersuchungen in GESAV – Phase 1 einen großen Einfluss auf die Versatzqualität. Dies ist vor allem auf die Druckluftförderung, die Versatzstrahlaufweitung sowie das Anmischen zurückzuführen. Dennoch ist Blasversatz eine weitverbreitete Versatztechnologie, die viele Vorteile wie z.B. kontinuierliche Arbeitsweise, technisch geringer Aufwand und einen hohen vorhandenen Wissensstand aufweist. Aus diesem Grund ist zu

überprüfen, ob die Einflussfaktoren durch geeignete Anpassungen auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz optimiert werden können.

Das Schleuderversatzverfahren ist ebenfalls ein weit verbreitetes Versatzverfahren, das zum Einbringen von Salzgrusversatz geeignet ist. Untersuchungen in GESAV – Phase 1 zeigten, dass eine generelle Eignung dieses Versatzverfahrens vorliegt. Durch eine Anpassung der Technologie auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz liegt ein hohes Optimierungspotential vor.

Anhand der Vorversuche mit den genannten herkömmlichen Versatztechnologien (Blasversatz und Schleuderversatz) wurde sich für die Auswahl von zwei optimierten Technologien im Rahmen der In situ-Phase entschieden.

Das Schleuderstrahlverfahren, das zum Einbringen von Beton entwickelt wurde, lässt vielversprechende positive Einflussfaktoren auf den gefügestabilisierten Salzgrusversatz erwarten. Das Schleuderstrahlverfahren ist eine Weiterentwicklung des Schleuderverfahrens. Durch In situ-Versuche soll, neben der Eignung zum Einbringen von gefügestabilisierten Salzgrusversatz, ebenfalls die Eignung für herkömmlichen Salzgrusversatz ermittelt werden. In GESAV – Phase 1 wurde ein Konstruktions- und Dimensionierungsvorschlag für die Maschinenteknologie erstellt. Die entsprechende Versatztechnologie muss für GESAV – Phase 2 abschließend konstruiert und gebaut werden.

Eine weitere optimierte Technologie, die für das Einbringen von gefügestabilisierten Salzgrusversatz im Rahmen der In situ-Phase untersucht werden soll ist das Aerosolverfahren. Bei diesem Verfahren wird die Salzlösung in einer definierten Menge dem Versatzmaterial so hinzugegeben, dass die Einbringtechnologie selbst technisch einfach gehalten werden kann und die Lösungsverteilung ein Optimum erreicht. Ein Prüfstand für die Versatztechnologie wurde im Rahmen von GESAV – Phase 1 konstruiert und gebaut. Untersuchungen in GESAV – Phase 1 zeigten, dass eine generelle Eignung vorliegt. Eine Versatztechnologie im Technikumsmaßstab muss im Rahmen von GESAV – Phase 2 konstruiert und gebaut werden.

Die Durchführung der In situ-Versuche wird in der Grube Sondershausen durchgeführt. Insgesamt werden 4 Versuchsorte in der Form von Blindstrecken aufgefahren, die mit den vier Versatztechnologien und dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz wieder verfüllt werden. Die Versuchsorte werden in einer ausreichenden Entfernung zu den aktiven Betriebspunkten der Grube aufgefahren,

sodass es zu keiner Beeinflussung des Forschungsvorhabens durch Prozesse innerhalb des Grubengebäudes kommt.

Nachdem die Blindstrecken mit dem gefügestabilisierten Salzgrusversatz verfüllt wurden, werden die Versatzkörper für sechs Monate messtechnisch (Temperatur, Feuchtigkeit, Setzung) überwacht. Durch weitere in situ-Untersuchungen wird die Permeabilität sowie die Anbindung an den Gebirgskörper ermittelt. Probenkörper werden weiterhin entnommen und labortechnisch untersucht.

Nach einem Zeitraum von ca. sechs Monaten werden die Versatzkörper zurückgebaut. Hierbei werden ebenfalls Proben aus unterschiedlichen Schichten des Versatzkörpers entnommen.

Die Ergebnisse der Versatzkörper werden abschließend mit den labortechnischen Ergebnissen der Phase 1 verglichen. Darüber hinaus erfolgt eine Beurteilung der Versatztechnologien hinsichtlich der Eignung. Ein abschließender Abschlussbericht wird erstellt.

Für die Phase 2 wurde im Rahmen der GESAV – Phase 1 eine Vorhabensbeschreibung, eine Kostenkalkulation erstellt.

Literaturverzeichnis

- Becker, S. (2013). *Voruntersuchungen für die Bewertung der Mischbarkeit von MgO- und CaSO₄-Halbhydrat - Suspensionen mit Salzgrus für die Entwicklung eines gefügestabilisierten Salzgrusversatzes für HAW-Endlager im Salinar*. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg.
- Boley, C. (. (2012). *Handbuch Geotechnik; Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen*. Vieweg+Teubner.
- Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., et al. (Juni 2012, Änderung der Vorbemerkung Dezember 2012). *Endlagerauslegung und -optimierung, Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. ISBN 978-3-939355-57-1, GRS - 281.
- Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S. & Filbert, W. (Februar 2014). *Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte - Abschlussbericht*. Peine: DBE Technology GmbH.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. (Stand 30. September 2010). *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle*.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2011). *Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontakwinkelmessmethode*. Straßenbau Heft 59.
- Caprez, M. (1985). *Geotechnische Untersuchung von Brechsotter*. Zürich: Institut für Grundbau und Bodenmechanik.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2012). *Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät; Deutsche Fassung EN 12697-30:2012*. Berlin: Beuth.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2016). *Geotechnische Erkundung und Untersuchung: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen (ISO/DIS 14688-2:2016)*. Berlin: Beuth.
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2016). *Partikelgrößenanalyse - Siebanalyse - Teil 1 Grundlagen 1*. Berlin: Beuth.
- Engelhardt, H.-J. & Anmelung, P. (Januar 2006). *Abdichtung von Wegsamkeiten im Carnallitit mit kristallisierenden Evaporitmineralen (AISKRISTALL)*. Fachgespräch "Verschlussmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen, CARLA-Streckenverschluss im Carnallitit und weitere FuE-Aktivitäten Vortragsunterlagen und Materialien. FZK-WTE.
- Equipment, S. S. (24.11.2015). *Aliva-237 concrete spraying machine; The small, reliable one*. Datenblatt der Spritzbetonmaschine Aliva-237.
- Fahlbusch, M. (1995). *Grundlagenuntersuchungen an festen Rückständen des Kalibergbaus im Hinblick auf eine untertägige Verwertung in Entsorgungsbergwerken*. Clausthal: Technische Universität Clausthal; Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen.

- Fischböck, E. K. & Nischer, P. (2009). Kornzusammensetzung des Mehlkorns. *Zement + Beton*.
- Freyer, D. (2000). *Untersuchungen zur Phasenbildung und -stabilität im System Na₂SO₄ - CaSO₄ - H₂O*. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg.
- Freyer, D. & Voigt, W. (2003). Crystallization and Phase Stability of CaSO₄ and CaSO₄ - Based Salts. *Monatshefte für Chemie; Chemical Monthly*, 143, 693-719.
- Gläß, F. (1991). *Untersuchungen zum Versatz und Verschuß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz*. Braunschweig: Institut für Tief Lagerung Braunschweig der GSF Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH.
- Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft. (2013). Angaben und Siebanalyse der Produkte und Kornfraktionen der untertägigen Brech- und Siebanlage. *Firmeninterne Unterlagen, unveröffentlicht*.
- Firma SCHMIDT Winterdienst- und Kommunaltechnik (2007). *Betriebsanleitung - Trägerfahrzeug SUPRA 3000 UT*. o.V.
- Haake Mars (kein Datum). *Betriebsanleitung: Messgerät HAAKE RheoStress 60*.
- Herbert, H.-J. (22 - 25 Mai 2007). Self-sealing backfill (SVV) - A salt based material for constructing seals in salt mines. Hannover: 6th Conference of Saltmechanics (Saltmech 6).
- Herbert, H.-J., Hertes, U., Meyer, L., Hellwald, K. & Dittrich, J. (September 2011). SVV2 - *Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformation*. GRS - 263.
- Herbert, H.-J., Kull, H. & Müller-Lyda, I. (April 2005). SVV - *Weiterentwicklung eines Selbst Verheilenden Versatzes als Komponente im Barriersystem Salinar*. GRS-220.
- Höhne, D., Schünemann, U. & Husemann, K. (1998). *Schüttgutmechanische Eigenschaften von Salzgrus*. Forschungszentrum Jülich 3492.
- (Stand: 23.02.2016). *Homepage der K+S Entsorgung GmbH; <http://www.ks-entsorgung.com/de/entsorgungswege/utv/stapelversatz.html>*.
- Institut für Anorganische Chemie der TU Bergakademie Freiberg. (April 2016). Konsultation des Instituts für Anorganische Chemie bzgl. Phasen- und Gefügeanalysen - unveröffentlicht. Freiberg.
- Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C. & Xie, M. (September 2009). *Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz, REPOPERM - Phase 1*. GRS-254.
- Kudla, W., Gruner, M., Herold, P. & Jobmann, M. (2015). Schachtverschlusskonzepte für zukünftige Endlager für hochradioaktive Abfälle für die Wirtsgesteinsoptionen Steinsalz und Ton. *Mining Report 151 (2015) No. 1*, 55-64.

- Kudla, W., Jobmann, M. & Herold, P. (2014). *Forschungsvorhaben ELSA 2 - Halbtechnische Versuche zur Verdichtung von Salzgrus und Schachtverschlusskonzepte im Tonstein und Salz*. Karlsruhe, 25./26.11.2014: 11. Projektstatusgespräch zu BMWi-geförderten FuE Projekten bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, 25./26.11.2014.
- 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*. Bericht zum Forschungsvorhaben 02E10921 und 02E10931, Freiberg, Peine.
- Langefeld, O. & Fuchs, C. (2006). *Untersuchung an Calciumsulfat-Steinsalz Baustoffen für Dammbauwerke in Unter-Tage Deponien und Endlagern im Salinar*. Clausthal-Zellerfeld: TU Clausthal.
- Mischo, H. (2002). *Untersuchung an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge*. Dissertation an der TU Clausthal. Aachen: Shaker Verlag .
- Mischo, H., Fahning, E., Weyer, J., Schreiter, F., Becker, S. & Noll, S. (2016). Fachgutachten Versatz/Teilversatz für die Durchführung eines bergrechtlichen Genehmigungsverfahrens für die Erweiterung der Haldenkapazität Zielitz (HKE II). TU Bergakademie Freiberg.
- Müller, M. (2007). *Die Abbindebeschleunigung von Stuckgips durch Calciumsulfatdihydrat*. Kassel: kassel university press GmbH.
- Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., et al. (Juli 2012). *Integrität geotechnischer Barrieren, Teil 1 Vorbemessung, Bericht zum Arbeitspaket 9.2 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. GRS - 287.
- Müller-Lyda, I. (Dezember 1999). *Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz - Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999*. GRS-143.
- Palzer, S. (2000). *Anreichern und Benetzen von pulverförmigen Lebensmitteln mit Flüssigkeiten in diskontinuierlichen Mischaggregaten - Benetzungsvorgänge und verfahrenstechnische Einflussparameter*. München: Dissertation .
- Priestel, U., Kudla, W. & Gruner, M. (2006). *Aktuelle Erfahrungen beim Einsatz von MgO-Beton in untertägigen Bauwerken im Carnallit / Current experiences with the application of MgO based concrete in underground constructions in Carnallit formations*. Freiberg : 35. Geomechanik - Kolloquium in Freiberg am 17. November 2006.
- Rothfuchs, T., Feddersen, H.-K., Kröhn, K.-P., Miehe, R. & Wiczorek, K. (1999). *The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste - Phase II, FKZ-02 E 8715*. Braunschweig: GRS-161.
- Rübel, A. & Mönig, J. (Dezember 2010). *Projekt VerSi, Endlagerung im Tonstein, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02538 „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur*

Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen" - Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz. GRS - A - 3535/4.

Schmidt, T. (2016). *Erreichbare Einbaudichten von gefügestabilisierten Salzgrusversatz (GESAV) bei Einsatz des Schleuderversatzverfahrens*. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg; Institut für Bergbau und Spezialtiefbau.

Schormann, A. (1999). *Verfahrens- und maschinentechnische Optimierung einer Schleuderstrahlmaschine mit vorzugsweise pneumatischer Materialzufuhr zur Erzeugung*. Aachen, Techn. Hochsch., Diss; ISBN 3-8265-6153-8: Shaker.

Stührenberg, D. (2011). *Compaction and Permeability Behaviour of Crushed Rock Salt and Crushed Salt with added Bentonite. 2nd US/German Workshop on Salt Repository Research, Design and Operation, 09.11.2011 - 10.11.2011.*

Technische Universität Dresden (kein Datum). *Wahlpraktikum MCII für Bachelor Chemie: Kontaktwinkelmessungen auf funktionalisierten Oberflächen*. Professur für Makromolekulare Chemie.

Tesch, V. (2007). *Gefügeoptimierte Instandsetzungsmörtel auf Calciumsulfat-Basis für die Anwendung im Außenbereich*. Kassel: kassel university press GmbH.

Weiss, R. (07.04.2017). *Modellierung und Konstruktion einer Schleuderstrahlversatzmaschine zum Verfüllen von untertägigen Hohlräumen im Salinar*. Von der TU Bergakademie Freiberg genehmigte Diplomarbeit.

Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O. & Navarro, M. (2012). *Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus*. Technischer Bericht im Vorhaben "Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben": GRS.

Anhang

Anhangverzeichnis

| Anhang | Beschreibung | Seite |
|---------------|--|--------------|
| A | Korndichteermittlung der Salzgruskomponente | 136 |
| B | Charakterisierung von Salzgruskornmischungen | 139 |
| C | Zusammensetzung des Salzbinders | 147 |
| D | Durchschnittliche Korndichte des Salzbinders | 148 |
| E | Schüttgutmechanische Eigenschaften der Rezepturen im Einbauzustand | 150 |
| F | Berechnung der Sättigung in Abhängigkeit von der Einbaudichte | 159 |
| G | P-XRD-Diffraktogramme | 160 |
| H | Porositäts- und Permeabilitätsmessungen am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig | 165 |
| I | Ergebnisse Scherfestigkeitsuntersuchungen am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig | 166 |
| J | Ergebnisse der Untersuchungen des Kompaktions- und Kriechverhaltens am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig | 176 |

Anhang A: Korndichteermittlung der Salzgruskomponente

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.01
 Seriennummer: 1180
 Dichte und Volumenbericht

| | |
|--|---|
| Probenname: Probengewicht: 4.4890 g Temperatur: 25.6 C Spülzyklen: 10 Zellvolumen: 12.1345 cm ³ | Beginn: 05/06/13 12:07:10 Ende: 05/06/13 12:43:21 Gleichgewicht: 0.0050 psig/min Expansionsvolumen: 8.3706 cm ³ |
|--|---|

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.0313 | -0.0050 | 2.2099 | 0.0054 | 0:09:46 |
| 2 | 2.0313 | -0.0050 | 2.2099 | 0.0054 | 0:12:50 |
| 3 | 2.0320 | -0.0043 | 2.2092 | 0.0047 | 0:15:49 |
| 4 | 2.0339 | -0.0025 | 2.2071 | 0.0027 | 0:18:51 |
| 5 | 2.0352 | -0.0012 | 2.2057 | 0.0012 | 0:21:46 |
| 6 | 2.0378 | 0.0015 | 2.2028 | -0.0016 | 0:24:39 |
| 7 | 2.0383 | 0.0020 | 2.2024 | -0.0021 | 0:27:32 |
| 8 | 2.0406 | 0.0043 | 2.1998 | -0.0046 | 0:30:26 |
| 9 | 2.0410 | 0.0047 | 2.1994 | -0.0051 | 0:33:09 |
| 10 | 2.0418 | 0.0055 | 2.1986 | -0.0059 | 0:36:03 |

| | |
|--|--|
| Mittleres Volumen: 2.0363 cm ³ Mittlere Dichte: 2.2045 g/cm ³ | Standardabweichung: 0.0041 cm ³ Standardabweichung: 0.0045 g/cm ³ |
|--|--|

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.01
 Seriennummer: 1180
 Dichte und Volumenbericht

| | |
|--|---|
| Probenname: Probengewicht: 5.1630 g Temperatur: 25.0 C Spülzyklen: 10 Zellvolumen: 12.1345 cm ³ | Beginn: 05/06/13 10:56:47 Ende: 05/06/13 11:32:14 Gleichgewicht: 0.0050 psig/min Expansionsvolumen: 8.3706 cm ³ |
|--|---|

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.3416 | -0.0046 | 2.2049 | 0.0043 | 0:09:35 |
| 2 | 2.3427 | -0.0035 | 2.2039 | 0.0033 | 0:12:36 |
| 3 | 2.3427 | -0.0035 | 2.2039 | 0.0033 | 0:15:45 |
| 4 | 2.3442 | -0.0019 | 2.2024 | 0.0018 | 0:18:31 |
| 5 | 2.3459 | -0.0002 | 2.2008 | 0.0002 | 0:21:17 |
| 6 | 2.3464 | 0.0002 | 2.2004 | -0.0002 | 0:24:08 |
| 7 | 2.3477 | 0.0015 | 2.1992 | -0.0014 | 0:26:55 |
| 8 | 2.3495 | 0.0034 | 2.1975 | -0.0031 | 0:29:43 |
| 9 | 2.3499 | 0.0037 | 2.1971 | -0.0035 | 0:32:31 |
| 10 | 2.3511 | 0.0050 | 2.1960 | -0.0046 | 0:35:19 |

| | |
|--|--|
| Mittleres Volumen: 2.3462 cm ³ Mittlere Dichte: 2.2006 g/cm ³ | Standardabweichung: 0.0034 cm ³ Standardabweichung: 0.0031 g/cm ³ |
|--|--|

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.01
 Seriennummer: 1180
 Dichte und Volumenbericht

| | | |
|----------------|-------------------------|---------------------------|
| Probenname: | | Beginn: 05/06/13 09:32:44 |
| Probengewicht: | 5.1030 g | Ende: 05/06/13 10:07:20 |
| Temperatur: | 24.1 C | |
| Spülzyklen: | 10 | Gleichgewicht: |
| Zellvolumen: | 12.1345 cm ³ | Expansionsvolumen: |
| | | 0.0050 psig/min |
| | | 8.3706 cm ³ |

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.3158 | -0.0056 | 2.2036 | 0.0053 | 0:09:19 |
| 2 | 2.3164 | -0.0050 | 2.2030 | 0.0047 | 0:12:09 |
| 3 | 2.3185 | -0.0029 | 2.2010 | 0.0027 | 0:14:52 |
| 4 | 2.3198 | -0.0016 | 2.1997 | 0.0015 | 0:17:50 |
| 5 | 2.3224 | 0.0010 | 2.1973 | -0.0010 | 0:20:39 |
| 6 | 2.3230 | 0.0016 | 2.1968 | -0.0015 | 0:23:23 |
| 7 | 2.3230 | 0.0016 | 2.1967 | -0.0016 | 0:26:05 |
| 8 | 2.3243 | 0.0029 | 2.1955 | -0.0027 | 0:28:52 |
| 9 | 2.3245 | 0.0031 | 2.1953 | -0.0030 | 0:31:44 |
| 10 | 2.3261 | 0.0047 | 2.1938 | -0.0045 | 0:34:28 |

| | | | |
|--------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| Mittleres Volumen: | 2.3214 cm ³ | Standardabweichung: | 0.0036 cm ³ |
| Mittlere Dichte: | 2.1983 g/cm ³ | Standardabweichung: | 0.0034 g/cm ³ |

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.01
 Seriennummer: 1180
 Dichte und Volumenbericht

Probename:
 Probengewicht: 4.8220 g
 Temperatur: 23.4 C
 Spülzyklen: 10
 Zellvolumen: 12.1345 cm³

Beginn: 05/06/13 08:51:38
 Ende: 05/06/13 09:24:22

Gleichgewicht: 0.0050 psig/min
 Expansionsvolumen: 8.3706 cm³

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1* | 2.1959 | -0.0022 | 2.1959 | 0.0022 | 0:09:09 |
| 2* | 2.1957 | -0.0025 | 2.1961 | 0.0025 | 0:12:07 |
| 3* | 2.1966 | -0.0016 | 2.1952 | 0.0016 | 0:14:55 |
| 4* | 2.1973 | -0.0009 | 2.1945 | 0.0009 | 0:17:52 |
| 5 | 2.1978 | -0.0004 | 2.1940 | 0.0004 | 0:20:49 |
| 6 | 2.1979 | -0.0003 | 2.1939 | 0.0003 | 0:23:50 |
| 7 | 2.1981 | -0.0001 | 2.1937 | 0.0001 | 0:26:44 |
| 8 | 2.1985 | 0.0003 | 2.1933 | -0.0003 | 0:29:44 |
| 9 | 2.1987 | 0.0005 | 2.1931 | -0.0005 | 0:32:36 |

Mittleres Volumen: 2.1982 cm³
 Mittlere Dichte: 2.1936 g/cm³

Standardabweichung: 0.0004 cm³
 Standardabweichung: 0.0004 g/cm³

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.01
 Seriennummer: 1180
 Dichte und Volumenbericht

Probename:
 Probengewicht: 4.8980 g
 Temperatur: 22.8 C
 Spülzyklen: 10
 Zellvolumen: 12.1345 cm³

Beginn: 05/06/13 08:23:48
 Ende: 05/06/13 08:48:48

Gleichgewicht: 0.0050 psig/min
 Expansionsvolumen: 8.3706 cm³

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1* | 2.2333 | -0.0010 | 2.1932 | 0.0010 | 0:09:28 |
| 2 | 2.2338 | -0.0005 | 2.1926 | 0.0005 | 0:12:32 |
| 3 | 2.2341 | -0.0002 | 2.1924 | 0.0002 | 0:15:53 |
| 4 | 2.2348 | 0.0005 | 2.1917 | -0.0005 | 0:18:50 |
| 5 | 2.2345 | 0.0002 | 2.1920 | -0.0002 | 0:21:44 |
| 6 | 2.2344 | 0.0001 | 2.1921 | -0.0001 | 0:24:52 |

Mittleres Volumen: 2.2343 cm³
 Mittlere Dichte: 2.1922 g/cm³

Standardabweichung: 0.0004 cm³
 Standardabweichung: 0.0004 g/cm³

Durchschnittliche Korndichte des verwendeten Salzgruses: 2,20 g/cm³

Anhang B: Charakterisierung der Salzgruskornmische

Labortechnische Ermittlung der lockersten und dichtesten Lagerung

Ermittelt mit Behälter: Leergewicht: 26,9 g, Höhe: 9,6 cm, Durchmesser: 7,0 cm, Volumen: 369,45 cm³

Lockerste Lagerung:

| Korngemisch 1 | Korngemisch 2 | Referenzsalzgrus |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) |
| 1,346 | 1,2990 | 1,3645 |
| 1,355 | 1,2914 | 1,3547 |
| 1,354 | 1,3144 | 1,3647 |
| 1,363 | 1,3025 | 1,3607 |
| Ø 1,355 | Ø 1,302 | Ø 1,361 |

Dichteste Lagerung

Korngemisch 1:

| Korngemisch 1 | Korngemisch 2 | Referenzsalzgrus |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) |
| 1,656 | 1,641 | 1,6967 |
| 1,678 | 1,631 | 1,700 |
| 1,688 | 1,682 | |
| 1,722 | 1,667 | |
| Ø 1,686 | Ø 1,655 | Ø 1,698 |

Schüttwinkel 04.04.2016

Korngemisch 1:

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| 2 | 10,0 | 11,0 | 10,0 |
| 3 | 10,0 | 10,0 | 9,0 |
| 4 | 10,0 | 10,0 | 9,0 |
| Mittelwert/cm | 10,0 | 10,25 | 9,5 |
| Kegelhöhe /cm | 5,4 | 5,3 | 5,5 |
| tan α / Grad | 28,37 | 27,34 | 30,07 |

Ø=28,59°

Korngemisch 2:

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 11,0 | 11,0 | 11,0 |
| 2 | 12,0 | 11,0 | 11,0 |
| 3 | 9,0 | 10,0 | 10,0 |
| 4 | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Mittelwert/cm | 10,5 | 10,5 | 10,5 |
| Kegelhöhe /cm | 7,0 | 6,8 | 6,9 |
| tan α / Grad | 33,69 | 32,93 | 33,31 |

 $\varnothing=33,31^\circ$

Referenzsalzgrus:

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|---------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 10,0 | 11,0 | 11,0 |
| 2 | 11,0 | 11,0 | 11,0 |
| 3 | 9,0 | 9,0 | 10,0 |
| 4 | 10,0 | 9,0 | 10,0 |
| Mittelwert/cm | 10,0 | 10,0 | 10,5 |
| Kegelhöhe /cm | 5,7 | 5,9 | 5,7 |
| tan α / Grad | 29,68 | 30,54 | 28,5 |

 $\varnothing=29,57^\circ$

Korngemisch 1 - Probe 1

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,30 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,68 | 1,50 | 20,99 | 0,0005416 | 33619,7935 |
| 2 | | 1,00 | 6,53 | 1,54 | 21,05 | 0,0005294 | 72496,7767 |
| 3 | | 1,00 | 6,46 | 1,55 | 21,09 | 0,0005237 | 112325,8177 |
| 4 | | 1,00 | 6,39 | 1,57 | 21,12 | 0,0005181 | 152646,1008 |
| 5 | | 1,00 | 6,34 | 1,58 | 21,14 | 0,0005140 | 193451,1568 |
| 6 | | 1,00 | 6,29 | 1,60 | 21,16 | 0,0005100 | 234621,4386 |
| 7 | | 1,00 | 6,28 | 1,60 | 21,17 | 0,0005091 | 276127,7411 |
| 8 | | 1,00 | 6,25 | 1,61 | 21,18 | 0,0005067 | 317726,4369 |
| 9 | | 1,00 | 6,2 | 1,62 | 21,20 | 0,0005027 | 359568,8512 |
| 10 | | 1,00 | 6,17 | 1,63 | 21,22 | 0,0005002 | 401775,3441 |
| 15 | | 5,00 | 6,03 | 1,67 | 21,28 | 0,0004889 | 614458,5190 |
| 20 | | 5,00 | 5,94 | 1,69 | 21,32 | 0,0004816 | 832490,4759 |
| 25 | | 5,00 | 5,87 | 1,71 | 21,35 | 0,0004759 | 1054150,3502 |
| 30 | | 5,00 | 5,83 | 1,72 | 21,37 | 0,0004727 | 1278641,1116 |
| 35 | | 5,00 | 5,78 | 1,74 | 21,39 | 0,0004686 | 1504908,2068 |
| 40 | | 5,00 | 5,77 | 1,74 | 21,39 | 0,0004678 | 1733180,2559 |
| 45 | | 5,00 | 5,71 | 1,76 | 21,42 | 0,0004629 | 1962134,1759 |
| 50 | | 5,00 | 5,69 | 1,76 | 21,43 | 0,0004613 | 2193590,3363 |
| 100 | | 50,00 | 5,63 | 1,78 | 21,46 | 0,0004564 | 4519190,2492 |
| 200 | | 100,00 | 5,61 | 1,79 | 21,47 | 0,0004548 | 9221914,6134 |

Korngemisch 1 - Probe 2

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,30 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,69 | 1,50 | 20,98 | 0,0005424 | 33612,6434 |
| 2 | | 1,00 | 6,52 | 1,54 | 21,06 | 0,0005286 | 72439,7441 |
| 3 | | 1,00 | 6,43 | 1,56 | 21,10 | 0,0005213 | 112355,2050 |
| 4 | | 1,00 | 6,41 | 1,56 | 21,11 | 0,0005197 | 152846,4829 |
| 5 | | 1,00 | 6,32 | 1,58 | 21,15 | 0,0005124 | 193541,4001 |
| 6 | | 1,00 | 6,31 | 1,59 | 21,15 | 0,0005116 | 234824,5449 |
| 7 | | 1,00 | 6,23 | 1,61 | 21,19 | 0,0005051 | 276242,9160 |
| 8 | | 1,00 | 6,2 | 1,62 | 21,20 | 0,0005027 | 318219,6558 |
| 9 | | 1,00 | 6,16 | 1,63 | 21,22 | 0,0004994 | 360435,0288 |
| 10 | | 1,00 | 6,12 | 1,64 | 21,24 | 0,0004962 | 402960,2781 |
| 15 | | 5,00 | 5,98 | 1,67 | 21,30 | 0,0004848 | 617605,9617 |
| 20 | | 5,00 | 5,9 | 1,70 | 21,34 | 0,0004783 | 837645,0614 |
| 25 | | 5,00 | 5,83 | 1,72 | 21,37 | 0,0004727 | 1060994,3444 |
| 30 | | 5,00 | 5,8 | 1,73 | 21,38 | 0,0004702 | 1287167,0042 |
| 35 | | 5,00 | 5,74 | 1,74 | 21,41 | 0,0004654 | 1514794,2941 |
| 40 | | 5,00 | 5,74 | 1,74 | 21,41 | 0,0004654 | 1744800,9632 |
| 45 | | 5,00 | 5,74 | 1,74 | 21,41 | 0,0004654 | 1974807,6324 |
| 50 | | 5,00 | 5,73 | 1,75 | 21,41 | 0,0004645 | 2204862,2596 |
| 100 | | 50,00 | 5,63 | 1,78 | 21,46 | 0,0004564 | 4514227,6181 |
| 200 | | 100,00 | 5,6 | 1,79 | 21,47 | 0,0004540 | 9217929,8830 |

Korngemisch 1 - Probe 3

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit spezifischer Schlagenergie [-] | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] | |
|--------------------------|---|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|--------------|
| 0 | 0 | 0 | 7,7 | 1,31 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | 1,00 | 1,00 | 6,71 | 1,50 | 20,97 | 0,0005440 | 33598,3432 |
| 2 | 1,00 | 1,00 | 6,5 | 1,55 | 21,07 | 0,0005270 | 72326,1249 |
| 3 | 1,00 | 1,00 | 6,41 | 1,57 | 21,11 | 0,0005197 | 112381,3429 |
| 4 | 1,00 | 1,00 | 6,29 | 1,60 | 21,16 | 0,0005100 | 153102,0272 |
| 5 | 1,00 | 1,00 | 6,25 | 1,61 | 21,18 | 0,0005067 | 194634,5884 |
| 6 | 1,00 | 1,00 | 6,23 | 1,62 | 21,19 | 0,0005051 | 236450,5759 |
| 7 | 1,00 | 1,00 | 6,16 | 1,64 | 21,22 | 0,0004994 | 278462,6645 |
| 8 | 1,00 | 1,00 | 6,12 | 1,65 | 21,24 | 0,0004962 | 320987,9138 |
| 9 | 1,00 | 1,00 | 6,09 | 1,65 | 21,25 | 0,0004937 | 363818,0940 |
| 10 | 1,00 | 1,00 | 6,07 | 1,66 | 21,26 | 0,0004921 | 406877,3411 |
| 15 | 5,00 | 5,00 | 5,92 | 1,70 | 21,33 | 0,0004800 | 623563,2156 |
| 20 | 5,00 | 5,00 | 5,86 | 1,72 | 21,35 | 0,0004751 | 846018,4406 |
| 25 | 5,00 | 5,00 | 5,82 | 1,73 | 21,37 | 0,0004718 | 1070939,2681 |
| 30 | 5,00 | 5,00 | 5,79 | 1,74 | 21,38 | 0,0004694 | 1297547,8395 |
| 35 | 5,00 | 5,00 | 5,78 | 1,74 | 21,39 | 0,0004686 | 1525378,0925 |
| 40 | 5,00 | 5,00 | 5,73 | 1,76 | 21,41 | 0,0004645 | 1753840,6461 |
| 45 | 5,00 | 5,00 | 5,72 | 1,76 | 21,42 | 0,0004637 | 1984344,8065 |
| 50 | 5,00 | 5,00 | 5,72 | 1,76 | 21,42 | 0,0004637 | 2215251,9462 |
| 100 | 50,00 | 50,00 | 5,63 | 1,79 | 21,46 | 0,0004564 | 4528654,6568 |
| 200 | 100,00 | 100,00 | 5,6 | 1,80 | 21,47 | 0,0004540 | 9232356,9217 |

Korngemisch 1 - Probe 4

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit spezifischer Schlagenergie [-] | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] | |
|--------------------------|---|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|-------------|
| 0 | 0 | 0 | 7,7 | 1,2558797 | 20,53233 | 0,000624264 | 0 |
| 1 | 1,00 | 1,00 | 6,52 | 1,4831708 | 21,0590289 | 0,000528597 | 33734,19522 |
| 2 | 1,00 | 1,00 | 6,31 | 1,5325315 | 21,1527635 | 0,000511572 | 73750,98588 |
| 3 | 1,00 | 1,00 | 6,22 | 1,5547064 | 21,1929354 | 0,000504275 | 115178,0821 |
| 4 | 1,00 | 1,00 | 6,15 | 1,5724022 | 21,2241803 | 0,0004986 | 157266,5658 |
| 5 | 1,00 | 1,00 | 6,09 | 1,5878939 | 21,2509616 | 0,000493736 | 199887,8183 |
| 6 | 1,00 | 1,00 | 6,04 | 1,6010387 | 21,2732793 | 0,000489682 | 242974,1864 |
| 7 | 1,00 | 1,00 | 5,99 | 1,614403 | 21,2955971 | 0,000485628 | 286462,8058 |
| 8 | 1,00 | 1,00 | 5,97 | 1,6198113 | 21,3045242 | 0,000484007 | 330332,8179 |
| 9 | 1,00 | 1,00 | 5,92 | 1,6334922 | 21,3268419 | 0,000479953 | 374395,9086 |
| 10 | 1,00 | 1,00 | 5,89 | 1,6418122 | 21,3402326 | 0,000477521 | 418859,0537 |
| 15 | 5,00 | 5,00 | 5,81 | 1,6644189 | 21,375941 | 0,000471035 | 642681,0109 |
| 20 | 5,00 | 5,00 | 5,75 | 1,6817867 | 21,4027223 | 0,000466171 | 869869,1352 |
| 25 | 5,00 | 5,00 | 5,7 | 1,6965392 | 21,42504 | 0,000462117 | 1099667,291 |
| 30 | 5,00 | 5,00 | 5,64 | 1,7145875 | 21,4518213 | 0,000457253 | 1331770,988 |
| 35 | 5,00 | 5,00 | 5,61 | 1,7237564 | 21,465212 | 0,000454821 | 1566490,298 |
| 40 | 5,00 | 5,00 | 5,59 | 1,7299237 | 21,4741391 | 0,000453199 | 1802562,93 |
| 45 | 5,00 | 5,00 | 5,58 | 1,733024 | 21,4786026 | 0,000452388 | 2039529,432 |
| 50 | 5,00 | 5,00 | 5,58 | 1,733024 | 21,4786026 | 0,000452388 | 2276920,605 |
| 100 | 50,00 | 50,00 | 5,44 | 1,7776238 | 21,5410923 | 0,000441038 | 4657738,978 |
| 200 | 100,00 | 100,00 | 5,36 | 1,8041555 | 21,5768007 | 0,000434552 | 9550014,289 |

Kornmisch 1 - Probe 5

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,21 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,34 | 1,47 | 21,14 | 0,0005140 | 33862,8971 |
| 2 | | 1,00 | 6,15 | 1,51 | 21,22 | 0,0004986 | 75154,7533 |
| 3 | | 1,00 | 6,04 | 1,54 | 21,27 | 0,0004897 | 117820,7666 |
| 4 | | 1,00 | 5,96 | 1,56 | 21,31 | 0,0004832 | 161336,7316 |
| 5 | | 1,00 | 5,91 | 1,57 | 21,33 | 0,0004791 | 205482,9912 |
| 6 | | 1,00 | 5,86 | 1,59 | 21,35 | 0,0004751 | 250049,3172 |
| 7 | | 1,00 | 5,81 | 1,60 | 21,38 | 0,0004710 | 295042,8778 |
| 8 | | 1,00 | 5,76 | 1,61 | 21,40 | 0,0004670 | 340471,0267 |
| 9 | | 1,00 | 5,75 | 1,62 | 21,40 | 0,0004662 | 386303,0753 |
| 10 | | 1,00 | 5,71 | 1,63 | 21,42 | 0,0004629 | 432253,1316 |
| 15 | | 5,00 | 5,58 | 1,67 | 21,48 | 0,0004524 | 664239,6020 |
| 20 | | 5,00 | 5,53 | 1,68 | 21,50 | 0,0004483 | 901877,4408 |
| 25 | | 5,00 | 5,48 | 1,70 | 21,52 | 0,0004443 | 1141912,8000 |
| 30 | | 5,00 | 5,44 | 1,71 | 21,54 | 0,0004410 | 1384339,1964 |
| 35 | | 5,00 | 5,41 | 1,72 | 21,55 | 0,0004386 | 1628699,9481 |
| 40 | | 5,00 | 5,38 | 1,73 | 21,57 | 0,0004362 | 1874568,4003 |
| 45 | | 5,00 | 5,38 | 1,73 | 21,57 | 0,0004362 | 2121807,8662 |
| 50 | | 5,00 | 5,35 | 1,74 | 21,58 | 0,0004337 | 2369200,8334 |
| 100 | | 50,00 | 5,27 | 1,76 | 21,62 | 0,0004273 | 4861119,3304 |
| 200 | | 100,00 | 5,24 | 1,77 | 21,63 | 0,0004248 | 9923746,4008 |

Referenzsalzgrus

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Probenvolumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|----|--------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 1 | 7,7 | 0,99 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1 | 6,73 | 1,39 | 20,97 | 0,0005456 | 33584,0430 |
| 2 | | 1 | 6,43 | 1,46 | 21,10 | 0,0005213 | 72253,9992 |
| 3 | | 1 | 6,23 | 1,50 | 21,19 | 0,0005051 | 112899,3992 |
| 4 | | 1 | 6,23 | 1,50 | 21,19 | 0,0005051 | 154849,6274 |
| 5 | | 1 | 6,23 | 1,50 | 21,19 | 0,0005051 | 196799,8555 |
| 6 | | 1 | 6,03 | 1,55 | 21,28 | 0,0004889 | 238926,8279 |
| 7 | | 1 | 5,93 | 1,58 | 21,32 | 0,0004808 | 282542,3496 |
| 8 | | 1 | 5,83 | 1,61 | 21,37 | 0,0004727 | 326986,2204 |
| 9 | | 1 | 5,83 | 1,61 | 21,37 | 0,0004727 | 372192,4218 |
| 10 | | 1 | 5,83 | 1,61 | 21,37 | 0,0004727 | 417398,6231 |
| 12 | | 2 | 5,83 | 1,61 | 21,37 | 0,0004727 | 507811,0259 |
| 14 | | 2 | 5,73 | 1,64 | 21,41 | 0,0004645 | 598412,2993 |
| 16 | | 2 | 5,73 | 1,64 | 21,41 | 0,0004645 | 690594,7467 |
| 18 | | 2 | 5,63 | 1,67 | 21,46 | 0,0004564 | 782969,3611 |
| 20 | | 2 | 5,53 | 1,70 | 21,50 | 0,0004483 | 877180,3125 |
| 25 | | 2 | 5,53 | 1,70 | 21,50 | 0,0004483 | 973094,8977 |
| 30 | | 5 | 5,43 | 1,73 | 21,55 | 0,0004402 | 1213379,1529 |
| 35 | | 5 | 5,43 | 1,73 | 21,55 | 0,0004402 | 1458088,5325 |
| 40 | | 5 | 5,43 | 1,73 | 21,55 | 0,0004402 | 1702797,9121 |
| 50 | | 10 | 5,43 | 1,73 | 21,55 | 0,0004402 | 2192216,6713 |
| 60 | | 10 | 5,33 | 1,76 | 21,59 | 0,0004321 | 2682649,3497 |
| 70 | | 10 | 5,33 | 1,76 | 21,59 | 0,0004321 | 3182283,3916 |
| 80 | | 10 | 5,33 | 1,76 | 21,59 | 0,0004321 | 3681917,4335 |
| 90 | | 10 | 5,23 | 1,79 | 21,63 | 0,0004240 | 4182584,4174 |
| 100 | | 10 | 5,23 | 1,79 | 21,63 | 0,0004240 | 4692824,3838 |
| 120 | | 10 | 5,23 | 1,79 | 21,63 | 0,0004240 | 5203064,3501 |
| 150 | | 20 | 5,23 | 1,79 | 21,63 | 0,0004240 | 6223544,2829 |

Korngemisch 2 - Probe 1

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,28 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,33 | 1,55 | 20,53 | 0,0005132 | 32890,4828 |
| 2 | | 1,00 | 6,13 | 1,60 | 21,14 | 0,0004970 | 74091,0142 |
| 3 | | 1,00 | 6,04 | 1,63 | 21,23 | 0,0004897 | 116815,3991 |
| 4 | | 1,00 | 5,96 | 1,65 | 21,27 | 0,0004832 | 160258,4425 |
| 5 | | 1,00 | 5,92 | 1,66 | 21,31 | 0,0004800 | 204358,5144 |
| 6 | | 1,00 | 5,89 | 1,67 | 21,33 | 0,0004775 | 248793,7596 |
| 7 | | 1,00 | 5,85 | 1,68 | 21,34 | 0,0004743 | 293483,3723 |
| 8 | | 1,00 | 5,83 | 1,69 | 21,36 | 0,0004727 | 338516,2001 |
| 9 | | 1,00 | 5,81 | 1,69 | 21,37 | 0,0004710 | 383722,4014 |
| 10 | | 1,00 | 5,77 | 1,70 | 21,38 | 0,0004678 | 429103,1700 |
| 15 | | 5,00 | 5,71 | 1,72 | 21,39 | 0,0004629 | 657770,8380 |
| 20 | | 5,00 | 5,67 | 1,73 | 21,42 | 0,0004597 | 889130,5784 |
| 25 | | 5,00 | 5,61 | 1,75 | 21,44 | 0,0004548 | 1122316,6868 |
| 30 | | 5,00 | 5,58 | 1,76 | 21,47 | 0,0004524 | 1358291,1803 |
| 35 | | 5,00 | 5,57 | 1,76 | 21,48 | 0,0004516 | 1595682,3533 |
| 40 | | 5,00 | 5,57 | 1,76 | 21,48 | 0,0004516 | 1833549,1441 |
| 45 | | 5,00 | 5,57 | 1,76 | 21,48 | 0,0004516 | 2071415,9349 |
| 50 | | 5,00 | 5,55 | 1,77 | 21,48 | 0,0004500 | 2309282,7257 |
| 100 | | 50,00 | 5,51 | 1,78 | 21,49 | 0,0004467 | 4697514,4064 |
| 200 | | 100,00 | 5,49 | 1,79 | 21,51 | 0,0004451 | 9512649,4297 |

Korngemisch 2 - Probe 2

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,28 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,3 | 1,57 | 21,16 | 0,0005108 | 33891,4975 |
| 2 | | 1,00 | 6,1 | 1,62 | 21,25 | 0,0004945 | 75489,2193 |
| 3 | | 1,00 | 6,06 | 1,63 | 21,26 | 0,0004913 | 118486,9029 |
| 4 | | 1,00 | 5,97 | 1,66 | 21,30 | 0,0004840 | 161850,1658 |
| 5 | | 1,00 | 5,91 | 1,67 | 21,33 | 0,0004791 | 205922,4786 |
| 6 | | 1,00 | 5,87 | 1,69 | 21,35 | 0,0004759 | 250479,4888 |
| 7 | | 1,00 | 5,83 | 1,70 | 21,37 | 0,0004727 | 295377,6411 |
| 8 | | 1,00 | 5,82 | 1,70 | 21,37 | 0,0004718 | 340593,2860 |
| 9 | | 1,00 | 5,78 | 1,71 | 21,39 | 0,0004686 | 385924,4601 |
| 10 | | 1,00 | 5,77 | 1,71 | 21,39 | 0,0004678 | 431578,8699 |
| 15 | | 5,00 | 5,7 | 1,74 | 21,43 | 0,0004621 | 660580,4985 |
| 20 | | 5,00 | 5,65 | 1,75 | 21,45 | 0,0004581 | 892635,9007 |
| 25 | | 5,00 | 5,61 | 1,76 | 21,47 | 0,0004548 | 1126939,7783 |
| 30 | | 5,00 | 5,57 | 1,78 | 21,48 | 0,0004516 | 1363110,5492 |
| 35 | | 5,00 | 5,57 | 1,78 | 21,48 | 0,0004516 | 1600977,3400 |
| 40 | | 5,00 | 5,56 | 1,78 | 21,49 | 0,0004508 | 1838893,5525 |
| 45 | | 5,00 | 5,54 | 1,79 | 21,50 | 0,0004491 | 2077336,6931 |
| 50 | | 5,00 | 5,54 | 1,79 | 21,50 | 0,0004491 | 2316640,6393 |
| 100 | | 50,00 | 5,47 | 1,81 | 21,53 | 0,0004435 | 4713158,3561 |
| 200 | | 100,00 | 5,45 | 1,82 | 21,54 | 0,0004418 | 9569543,6328 |

Korngemisch 2 - Probe 3

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,25 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,22 | 1,55 | 21,19 | 0,0005043 | 33948,6984 |
| 2 | | 1,00 | 6,02 | 1,60 | 21,28 | 0,0004881 | 76152,2504 |
| 3 | | 1,00 | 5,93 | 1,62 | 21,32 | 0,0004808 | 119840,2231 |
| 4 | | 1,00 | 5,86 | 1,64 | 21,35 | 0,0004751 | 164256,2411 |
| 5 | | 1,00 | 5,81 | 1,66 | 21,38 | 0,0004710 | 209249,8017 |
| 6 | | 1,00 | 5,79 | 1,66 | 21,38 | 0,0004694 | 254649,5224 |
| 7 | | 1,00 | 5,74 | 1,68 | 21,41 | 0,0004654 | 300253,6081 |
| 8 | | 1,00 | 5,73 | 1,68 | 21,41 | 0,0004645 | 346264,5336 |
| 9 | | 1,00 | 5,68 | 1,70 | 21,43 | 0,0004605 | 392403,7990 |
| 10 | | 1,00 | 5,66 | 1,70 | 21,44 | 0,0004589 | 438968,6058 |
| 15 | | 5,00 | 5,59 | 1,72 | 21,47 | 0,0004532 | 672955,7907 |
| 20 | | 5,00 | 5,54 | 1,74 | 21,50 | 0,0004491 | 910119,2723 |
| 25 | | 5,00 | 5,49 | 1,75 | 21,52 | 0,0004451 | 1149671,6652 |
| 30 | | 5,00 | 5,45 | 1,77 | 21,54 | 0,0004418 | 1391606,3416 |
| 35 | | 5,00 | 5,42 | 1,78 | 21,55 | 0,0004394 | 1635468,2150 |
| 40 | | 5,00 | 5,41 | 1,78 | 21,55 | 0,0004386 | 1880730,6670 |
| 45 | | 5,00 | 5,41 | 1,78 | 21,55 | 0,0004386 | 2126446,4691 |
| 50 | | 5,00 | 5,41 | 1,78 | 21,55 | 0,0004386 | 2372162,2711 |
| 100 | | 50,00 | 5,37 | 1,79 | 21,57 | 0,0004354 | 4831355,6270 |
| 200 | | 100,00 | 5,33 | 1,81 | 21,59 | 0,0004321 | 9790479,3576 |

Korngemisch 2 - Probe 4

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,209425 | 20,53233 | 0,000624264 | 0 |
| 1 | | 1,00 | 6,09 | 1,529158 | 21,2509616 | 0,000493736 | 34041,64973 |
| 2 | | 1,00 | 5,9 | 1,5784021 | 21,335769 | 0,000478332 | 77254,58294 |
| 3 | | 1,00 | 5,8 | 1,6056159 | 21,3804045 | 0,000470225 | 121952,434 |
| 4 | | 1,00 | 5,75 | 1,6195778 | 21,4027223 | 0,000466171 | 167468,3996 |
| 5 | | 1,00 | 5,71 | 1,6309233 | 21,4205765 | 0,000462928 | 213418,4559 |
| 6 | | 1,00 | 5,67 | 1,642429 | 21,4384307 | 0,000459685 | 259728,972 |
| 7 | | 1,00 | 5,65 | 1,6482429 | 21,4473578 | 0,000458064 | 306385,6137 |
| 8 | | 1,00 | 5,61 | 1,6599951 | 21,465212 | 0,000454821 | 353246,3892 |
| 9 | | 1,00 | 5,59 | 1,6659342 | 21,4741391 | 0,000453199 | 400460,9156 |
| 10 | | 1,00 | 5,56 | 1,6749231 | 21,4875297 | 0,000450767 | 447873,914 |
| 15 | | 5,00 | 5,5 | 1,693195 | 21,514311 | 0,000445903 | 686515,0971 |
| 20 | | 5,00 | 5,47 | 1,7024812 | 21,5277017 | 0,00044347 | 927909,7907 |
| 25 | | 5,00 | 5,41 | 1,7213627 | 21,554483 | 0,000438606 | 1170930,356 |
| 30 | | 5,00 | 5,38 | 1,7309614 | 21,5678736 | 0,000436174 | 1416798,808 |
| 35 | | 5,00 | 5,35 | 1,7406677 | 21,5812643 | 0,000433742 | 1664191,775 |
| 40 | | 5,00 | 5,34 | 1,7439274 | 21,5857278 | 0,000432931 | 1913023,446 |
| 45 | | 5,00 | 5,34 | 1,7439274 | 21,5857278 | 0,000432931 | 2162321,095 |
| 50 | | 5,00 | 5,34 | 1,7439274 | 21,5857278 | 0,000432931 | 2411618,743 |
| 100 | | 50,00 | 5,27 | 1,7670915 | 21,6169727 | 0,000427256 | 4908203,754 |
| 200 | | 100,00 | 5,24 | 1,7772084 | 21,6303633 | 0,000424824 | 9970830,825 |

Korngemisch 2 - Probe 5

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,17 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,88 | 1,53 | 21,34 | 0,0004937 | 34191,8019 |
| 2 | | 1,00 | 5,75 | 1,57 | 21,40 | 0,0004783 | 77540,3406 |
| 3 | | 1,00 | 5,67 | 1,59 | 21,44 | 0,0004702 | 122359,5011 |
| 4 | | 1,00 | 5,61 | 1,61 | 21,47 | 0,0004662 | 168008,3600 |
| 5 | | 1,00 | 5,57 | 1,62 | 21,48 | 0,0004629 | 214092,4652 |
| 6 | | 1,00 | 5,54 | 1,63 | 21,50 | 0,0004597 | 260528,3272 |
| 7 | | 1,00 | 5,5 | 1,64 | 21,51 | 0,0004581 | 307330,6192 |
| 8 | | 1,00 | 5,47 | 1,65 | 21,53 | 0,0004548 | 354327,8162 |
| 9 | | 1,00 | 5,45 | 1,65 | 21,54 | 0,0004532 | 401679,7368 |
| 10 | | 1,00 | 5,43 | 1,66 | 21,55 | 0,0004508 | 449220,7720 |
| 15 | | 5,00 | 5,37 | 1,68 | 21,57 | 0,0004459 | 688505,5931 |
| 20 | | 5,00 | 5,3 | 1,70 | 21,60 | 0,0004435 | 930751,1492 |
| 25 | | 5,00 | 5,28 | 1,71 | 21,61 | 0,0004386 | 1174425,9421 |
| 30 | | 5,00 | 5,25 | 1,72 | 21,63 | 0,0004362 | 1420955,8781 |
| 35 | | 5,00 | 5,23 | 1,72 | 21,63 | 0,0004337 | 1668962,8506 |
| 40 | | 5,00 | 5,21 | 1,73 | 21,64 | 0,0004329 | 1918463,4245 |
| 45 | | 5,00 | 5,2 | 1,73 | 21,65 | 0,0004329 | 2168482,7783 |
| 50 | | 5,00 | 5,2 | 1,73 | 21,65 | 0,0004329 | 2418502,1321 |
| 100 | | 50,00 | 5,15 | 1,75 | 21,67 | 0,0004273 | 4921273,1890 |
| 200 | | 100,00 | 5,09 | 1,77 | 21,70 | 0,0004248 | 9999570,7930 |

Anhang C: Zusammensetzung des Salzbinders

Zielmineralisation:

Polyhalit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Elementtabelle nach Periodensystem:

| Elemente | Molmasse [g/mol] | Anzahl in Polyhalit | Masse in Polyhalit [g/mol] |
|----------|---------------------|------------------------|-------------------------------|
| K | 39,1 | 2 | 78,2 |
| Mg | 24,31 | 1 | 24,31 |
| Ca | 40,08 | 2 | 80,16 |
| S | 32,07 | 4 | 128,28 |
| O | 16 | 18 | 288 |
| H | 1,01 | 4 | 4,04 |
| Summe | | | 602,99 |

Berechnung der Einzelkomponenten:

| Kiserit [$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$] | K_2SO_4 | $2 \cdot (\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O})$ | Trockengemisch [g/mol] |
|--|-------------------------|--|------------------------|
| 138,37 | 174,27 | 290,32 | 602,96 |

Masse der Einzelkomponenten für 1000 g Salzbindertrockengemisch:

Massen für 1 kg Trockengemisch [g]:

| Kiserit [$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$] | K_2SO_4 | $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ |
|--|-------------------------|--|
| 229,5 | 289,1 | 481,4 |

Anteil der Einzelkomponenten am Trockengemisch [Masse-%]:

| Kiserit [$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$] | K_2SO_4 | $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ |
|--|-------------------------|--|
| 22,95 | 28,90 | 48,15 |

Anhang D: Durchschnittliche Korndichte des Salzbinders

Seite 1

AccuPyc 1330 V2.04N
 Seriennummer: 0
 Dichte und Volumenbericht

Probename: *Ca SO₄*
 Probengewicht: 4.8920 g
 Temperatur: 24.4 C
 Spülzyklen: 10
 Zellvolumen: 12.1372 cm³
 Chamber Insert: None

Beginn: 25/03/14 08:55:39
 Ende: 25/03/14 09:20:56
 Gleichgewicht: 0.0050 psig/min
 Expansionsvolumen: 8.3605 cm³

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 1.8634 | -0.0015 | 2.6252 | 0.0022 | 0:10:46 |
| 2 | 1.8643 | -0.0006 | 2.6240 | 0.0009 | 0:14:27 |
| 3 | 1.8650 | -0.0000 | 2.6231 | 0.0000 | 0:18:12 |
| 4 | 1.8663 | 0.0013 | 2.6212 | -0.0019 | 0:21:41 |
| 5 | 1.8659 | 0.0009 | 2.6219 | -0.0012 | 0:25:09 |

Mittleres Volumen: 1.8650 cm³
 Mittlere Dichte: 2.6231 g/cm³

Standardabweichung: 0.0012 cm³
 Standardabweichung: 0.0016 g/cm³

AccuPyc 1330 V2.04N
 Seriennummer: 0
 Dichte und Volumenbericht

Probenname: *K₂SO₄*
 Probengewicht: 4.7420 g
 Temperatur: 24.3 C
 Spülzyklen: 10
 Zellvolumen: 12.1372 cm³
 Chamber Insert: None

Beginn: 24/03/14 15:43:44
 Ende: 24/03/14 16:07:17

Gleichgewicht: 0.0050 psig/min
 Expansionsvolumen: 8.3605 cm³

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 1.7751 | -0.0009 | 2.6714 | 0.0013 | 0:09:56 |
| 2 | 1.7753 | -0.0007 | 2.6711 | 0.0011 | 0:13:36 |
| 3 | 1.7760 | 0.0000 | 2.6700 | -0.0000 | 0:16:43 |
| 4 | 1.7773 | 0.0013 | 2.6681 | -0.0020 | 0:20:14 |
| 5 | 1.7762 | 0.0003 | 2.6697 | -0.0004 | 0:23:25 |

Mittleres Volumen: 1.7760 cm³
 Mittlere Dichte: 2.6701 g/cm³

Standardabweichung: 0.0009 cm³
 Standardabweichung: 0.0013 g/cm³

AccuPyc 1330 V2.04N
 Seriennummer: 0
 Dichte und Volumenbericht

Probenname: *Mg SO₄*
 Probengewicht: 6.7560 g
 Temperatur: 24.2 C
 Spülzyklen: 10
 Zellvolumen: 12.1372 cm³
 Chamber Insert: None

Beginn: 24/03/14 13:46:55
 Ende: 24/03/14 14:07:18

Gleichgewicht: 0.0050 psig/min
 Expansionsvolumen: 8.3605 cm³

| Mess. Nr | Volumen cm ³ | Abweichung cm ³ | Dichte g/cm ³ | Abweichung g/cm ³ | Meßzeit (h:m:s) |
|----------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.5916 | -0.0025 | 2.6069 | 0.0025 | 0:09:14 |
| 2 | 2.5931 | -0.0010 | 2.6054 | 0.0010 | 0:11:55 |
| 3 | 2.5943 | 0.0003 | 2.6041 | -0.0003 | 0:14:40 |
| 4 | 2.5952 | 0.0011 | 2.6033 | -0.0011 | 0:17:23 |
| 5 | 2.5962 | 0.0021 | 2.6023 | -0.0021 | 0:20:15 |

Mittleres Volumen: 2.5941 cm³
 Mittlere Dichte: 2.6044 g/cm³

Standardabweichung: 0.0018 cm³
 Standardabweichung: 0.0018 g/cm³

Durchschnittliche Korndichte des Salzbindertrockengemisches:

| | Kiserit [MgSO ₄ ·H ₂ O] | K ₂ SO ₄ | CaSO ₄ · 0,5 H ₂ O |
|--|---|--------------------------------|--|
| Anteil am Salzbinde- trockengemisch [Masse-%] | 22,97 | 28,90 | 48,15 |
| Korndichte | 2,6044 | 2,6701 | 2,6231 |
| Gesamt | 2,63 | | |

Anhang E: Schüttgutmechanische Eigenschaften der Rezepturen im Einbauzustand

Korngemisch 2 mit Salzbinder:

Probe 1: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 8 | 10 | 9 | 9 | 9 |
| 2 | 9 | 9 | 9 | 8 | 8 |
| 3 | 8 | 7 | 9 | 8 | 8 |
| 4 | 9 | 9 | 10 | 9 | 8 |
| Mittelwert/cm | 8,5 | 8,75 | 9,25 | 8,5 | 8,25 |
| Kegelhöhe /cm | 7,8 | 8,0 | 7,5 | 7,8 | 7,6 |
| tan α / Grad | 42,54 | 42,44 | 39,04 | 42,54 | 42,65 |

$$\varnothing=41,84^{\circ}$$

Probe 2: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 10 | 9 | 8 | 9 | 9 |
| 2 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 |
| 3 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 |
| 4 | 9 | 8 | 8 | 9 | 9 |
| Mittelwert/cm | 9,0 | 8,75 | 8,5 | 8,75 | 8,75 |
| Kegelhöhe /cm | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 7,7 | 7,5 |
| tan α / Grad | 40,91 | 41,71 | 42,90 | 41,35 | 40,60 |

$$\varnothing=41,49^{\circ}$$

Probe 3: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 2 | 10 | 8 | 10 | 8 | 9 |
| 3 | 8 | 9 | 10 | 9 | 8 |
| 4 | 10 | 9 | 8 | 10 | 10 |
| Mittelwert/cm | 9,25 | 8,75 | 9,25 | 9,0 | 9,0 |
| Kegelhöhe /cm | 7,3 | 8,5 | 7,7 | 8,4 | 7,7 |
| tan α / Grad | 38,28 | 44,17 | 39,78 | 43,03 | 40,55 |

$$\varnothing=41,16^{\circ}$$

Korngemisch 1 mit Salzbinder

Probe 1: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 10 | 9 | 9 | 8 | 9 |
| 2 | 8 | 8 | 7 | 9 | 9 |
| 3 | 7 | 7 | 7 | 8 | 7 |
| 4 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Mittelwert/cm | 8,5 | 8,0 | 7,75 | 8,25 | 8,25 |
| Kegelhöhe /cm | 6,0 | 6,0 | 6,0 | 6,5 | 6,5 |
| tan α / Grad | 35,22 | 36,87 | 37,75 | 38,23 | 38,23 |

$$\varnothing = 37,26^\circ$$

Probe 2: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 2 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 |
| 3 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 7 |
| Mittelwert/cm | 8,0 | 8 | 8 | 8 | 8,0 |
| Kegelhöhe /cm | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,7 | 6,3 |
| tan α / Grad | 39,09 | 38,22 | 39,09 | 39,95 | 38,22 |

$$\varnothing = 38,91^\circ$$

Probe 3: Gefügestabilisierter Salzgrusversatz Material mit Feinsalz und Salzbinder

| Radius | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 4 | Messung 5 |
|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 |
| 2 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 |
| 3 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 |
| 4 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| Mittelwert/cm | 8,0 | 7,75 | 8,25 | 8 | 8,5 |
| Kegelhöhe /cm | 6,3 | 6,5 | 6,0 | 6,7 | 6,3 |
| tan α / Grad | 38,22 | 39,99 | 36,03 | 39,95 | 36,54 |

$$\varnothing = 38,15^\circ$$

Labortechnische Ermittlung der lockersten und dichtesten Lagerung

Ermittelt mit Behälter: Leergewicht: 26,9 g, Höhe: 9,6 cm, Durchmesser: 7,0 cm, Volumen: 369,45 cm³

Lockerste Lagerung:

| Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 | Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 |
|---|---|
| Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) |
| 0,965 | 0,904 |
| 0,979 | 0,909 |
| 0,987 | 0,878 |
| <u>Ø 0,977</u> | <u>Ø 0,897</u> |

Dichteste Lagerung

| Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 | Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 |
|---|---|
| Dichte (g/cm ³) | Dichte (g/cm ³) |
| 1,620 | 1,608 |
| 1,615 | 1,622 |
| 1,620 | 1,566 |
| <u>Ø 1,618</u> | <u>Ø 1,599</u> |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 - Probe 1

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,00 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,31 | 1,45 | 21,60 | 0,0004305 | 34599,3579 |
| 2 | | 1,00 | 5,05 | 1,52 | 21,72 | 0,0004094 | 85041,2613 |
| 3 | | 1,00 | 4,88 | 1,57 | 21,79 | 0,0003956 | 138265,5100 |
| 4 | | 1,00 | 4,84 | 1,59 | 21,81 | 0,0003924 | 193389,0097 |
| 5 | | 1,00 | 4,77 | 1,61 | 21,84 | 0,0003867 | 249047,7018 |
| 6 | | 1,00 | 4,7 | 1,63 | 21,87 | 0,0003810 | 305603,9828 |
| 7 | | 1,00 | 4,66 | 1,65 | 21,89 | 0,0003778 | 363049,4473 |
| 8 | | 1,00 | 4,62 | 1,66 | 21,91 | 0,0003746 | 421035,2642 |
| 9 | | 1,00 | 4,59 | 1,67 | 21,92 | 0,0003721 | 479558,8734 |
| 10 | | 1,00 | 4,57 | 1,68 | 21,93 | 0,0003705 | 538488,9792 |
| 15 | | 5,00 | 4,44 | 1,73 | 21,99 | 0,0003600 | 835212,0769 |
| 20 | | 5,00 | 4,36 | 1,76 | 22,02 | 0,0003535 | 1141119,0112 |
| 25 | | 5,00 | 4,29 | 1,79 | 22,05 | 0,0003478 | 1453080,8787 |
| 30 | | 5,00 | 4,26 | 1,80 | 22,07 | 0,0003454 | 1770325,5358 |
| 35 | | 5,00 | 4,22 | 1,82 | 22,09 | 0,0003421 | 2090062,7882 |
| 40 | | 5,00 | 4,19 | 1,83 | 22,10 | 0,0003397 | 2413026,4214 |
| 45 | | 5,00 | 4,15 | 1,85 | 22,12 | 0,0003365 | 2738565,2397 |
| 50 | | 5,00 | 4,13 | 1,86 | 22,13 | 0,0003348 | 3067374,4461 |
| 100 | | 50,00 | 4 | 1,92 | 22,18 | 0,0003243 | 6380054,4319 |
| 200 | | 100,00 | 3,9 | 1,97 | 22,23 | 0,0003162 | 13234502,5547 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 - Probe 2

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,04 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,48 | 1,47 | 21,52 | 0,0004443 | 34477,8061 |
| 2 | | 1,00 | 5,23 | 1,54 | 21,63 | 0,0004240 | 83174,0657 |
| 3 | | 1,00 | 5,16 | 1,56 | 21,67 | 0,0004183 | 134271,7508 |
| 4 | | 1,00 | 5,07 | 1,58 | 21,71 | 0,0004110 | 186158,6491 |
| 5 | | 1,00 | 4,98 | 1,61 | 21,75 | 0,0004037 | 239064,3488 |
| 6 | | 1,00 | 4,94 | 1,63 | 21,76 | 0,0004005 | 292970,3972 |
| 7 | | 1,00 | 4,87 | 1,65 | 21,80 | 0,0003948 | 347390,9461 |
| 8 | | 1,00 | 4,84 | 1,66 | 21,81 | 0,0003924 | 402627,6358 |
| 9 | | 1,00 | 4,81 | 1,67 | 21,82 | 0,0003900 | 458240,8272 |
| 10 | | 1,00 | 4,78 | 1,68 | 21,84 | 0,0003875 | 514235,2168 |
| 15 | | 5,00 | 4,64 | 1,73 | 21,90 | 0,0003762 | 796770,5673 |
| 20 | | 5,00 | 4,56 | 1,76 | 21,93 | 0,0003697 | 1088305,3104 |
| 25 | | 5,00 | 4,51 | 1,78 | 21,96 | 0,0003656 | 1385256,5391 |
| 30 | | 5,00 | 4,45 | 1,80 | 21,98 | 0,0003608 | 1685866,1350 |
| 35 | | 5,00 | 4,39 | 1,83 | 22,01 | 0,0003559 | 1990900,0567 |
| 40 | | 5,00 | 4,39 | 1,83 | 22,01 | 0,0003559 | 2300103,0069 |
| 45 | | 5,00 | 4,36 | 1,84 | 22,02 | 0,0003535 | 2609494,0749 |
| 50 | | 5,00 | 4,33 | 1,85 | 22,04 | 0,0003510 | 2921203,3928 |
| 100 | | 50,00 | 4,19 | 1,92 | 22,10 | 0,0003397 | 6068793,5368 |
| 200 | | 100,00 | 4,08 | 1,97 | 22,15 | 0,0003308 | 12588767,7697 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 - Probe 3

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,99 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,24 | 1,46 | 21,63 | 0,0004248 | 34649,4087 |
| 2 | | 1,00 | 5,99 | 1,27 | 21,30 | 0,0004856 | 84777,5119 |
| 3 | | 1,00 | 4,94 | 1,55 | 21,76 | 0,0004005 | 129594,2266 |
| 4 | | 1,00 | 4,81 | 1,59 | 21,82 | 0,0003900 | 184081,6449 |
| 5 | | 1,00 | 4,77 | 1,60 | 21,84 | 0,0003867 | 240087,4805 |
| 6 | | 1,00 | 4,72 | 1,62 | 21,86 | 0,0003827 | 296620,6773 |
| 7 | | 1,00 | 4,64 | 1,65 | 21,90 | 0,0003762 | 353846,0576 |
| 8 | | 1,00 | 4,62 | 1,65 | 21,91 | 0,0003746 | 412081,8134 |
| 9 | | 1,00 | 4,57 | 1,67 | 21,93 | 0,0003705 | 470629,2562 |
| 10 | | 1,00 | 4,55 | 1,68 | 21,94 | 0,0003689 | 529841,3563 |
| 15 | | 5,00 | 4,47 | 1,71 | 21,97 | 0,0003624 | 827687,2286 |
| 20 | | 5,00 | 4,35 | 1,76 | 22,03 | 0,0003527 | 1131602,6800 |
| 25 | | 5,00 | 4,29 | 1,78 | 22,05 | 0,0003478 | 1444281,7011 |
| 30 | | 5,00 | 4,25 | 1,80 | 22,07 | 0,0003446 | 1761590,5259 |
| 35 | | 5,00 | 4,22 | 1,81 | 22,09 | 0,0003421 | 2082080,1012 |
| 40 | | 5,00 | 4,19 | 1,82 | 22,10 | 0,0003397 | 2405043,7345 |
| 45 | | 5,00 | 4,17 | 1,83 | 22,11 | 0,0003381 | 2730451,1546 |
| 50 | | 5,00 | 4,13 | 1,85 | 22,13 | 0,0003348 | 3057683,3385 |
| 100 | | 50,00 | 3,99 | 1,91 | 22,19 | 0,0003235 | 6371029,8595 |
| 200 | | 100,00 | 3,86 | 1,98 | 22,25 | 0,0003129 | 13248176,4295 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 - Probe 4

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,0220041 | 20,53233 | 0,000624264 | 0 |
| 1 | | 1,00 | 5,3 | 1,4847985 | 21,603582 | 0,000429688 | 34606,50802 |
| 2 | | 1,00 | 5,07 | 1,5521562 | 21,7062437 | 0,000411041 | 85122,80903 |
| 3 | | 1,00 | 4,99 | 1,5770405 | 21,7419521 | 0,000404555 | 138017,6496 |
| 4 | | 1,00 | 4,92 | 1,599478 | 21,7731969 | 0,00039888 | 191837,7363 |
| 5 | | 1,00 | 4,86 | 1,6192247 | 21,7999782 | 0,000394016 | 246490,6971 |
| 6 | | 1,00 | 4,83 | 1,629282 | 21,8133689 | 0,000391584 | 301852,3709 |
| 7 | | 1,00 | 4,77 | 1,6497761 | 21,8401502 | 0,000386719 | 357626,2984 |
| 8 | | 1,00 | 4,72 | 1,6672525 | 21,8624679 | 0,000382665 | 414159,4952 |
| 9 | | 1,00 | 4,68 | 1,6815025 | 21,8803221 | 0,000379423 | 471338,218 |
| 10 | | 1,00 | 4,63 | 1,6996613 | 21,9026399 | 0,000375369 | 529064,4682 |
| 15 | | 5,00 | 4,52 | 1,7410248 | 21,9517389 | 0,000366451 | 821466,698 |
| 20 | | 5,00 | 4,46 | 1,7644466 | 21,9785202 | 0,000361586 | 1121350,326 |
| 25 | | 5,00 | 4,39 | 1,7925813 | 22,0097651 | 0,000355911 | 1425700,315 |
| 30 | | 5,00 | 4,34 | 1,8132332 | 22,0320828 | 0,000351858 | 1735216,795 |
| 35 | | 5,00 | 4,3 | 1,8301004 | 22,049937 | 0,000348615 | 2048552,846 |
| 40 | | 5,00 | 4,29 | 1,8343664 | 22,0544006 | 0,000347804 | 2364867,67 |
| 45 | | 5,00 | 4,25 | 1,851631 | 22,0722548 | 0,000344561 | 2682176,495 |
| 50 | | 5,00 | 4,24 | 1,8559981 | 22,0767183 | 0,00034375 | 3002536,527 |
| 100 | | 50,00 | 4,11 | 1,9147036 | 22,1347445 | 0,000333211 | 6222132,67 |
| 200 | | 100,00 | 4 | 1,967358 | 22,1838435 | 0,000324293 | 12879732,84 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 1 - Probe 5

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 1,00 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,38 | 1,43 | 21,57 | 0,0004362 | 34549,3072 |
| 2 | | 1,00 | 5,07 | 1,51 | 21,71 | 0,0004110 | 84314,4364 |
| 3 | | 1,00 | 4,96 | 1,55 | 21,76 | 0,0004021 | 137241,8544 |
| 4 | | 1,00 | 4,85 | 1,58 | 21,80 | 0,0003932 | 191465,1655 |
| 5 | | 1,00 | 4,8 | 1,60 | 21,83 | 0,0003892 | 246975,0423 |
| 6 | | 1,00 | 4,75 | 1,62 | 21,85 | 0,0003851 | 303120,4967 |
| 7 | | 1,00 | 4,71 | 1,63 | 21,87 | 0,0003819 | 359903,3187 |
| 8 | | 1,00 | 4,65 | 1,65 | 21,89 | 0,0003770 | 417238,5075 |
| 9 | | 1,00 | 4,61 | 1,66 | 21,91 | 0,0003737 | 475360,8650 |
| 10 | | 1,00 | 4,57 | 1,68 | 21,93 | 0,0003705 | 534035,3088 |
| 15 | | 5,00 | 4,44 | 1,73 | 21,99 | 0,0003600 | 830758,4065 |
| 20 | | 5,00 | 4,38 | 1,75 | 22,01 | 0,0003551 | 1136541,3413 |
| 25 | | 5,00 | 4,33 | 1,77 | 22,04 | 0,0003510 | 1446827,3289 |
| 30 | | 5,00 | 4,28 | 1,79 | 22,06 | 0,0003470 | 1761014,1698 |
| 35 | | 5,00 | 4,23 | 1,81 | 22,08 | 0,0003429 | 2079193,0053 |
| 40 | | 5,00 | 4,18 | 1,84 | 22,10 | 0,0003389 | 2401458,2090 |
| 45 | | 5,00 | 4,17 | 1,84 | 22,11 | 0,0003381 | 2727644,1158 |
| 50 | | 5,00 | 4,14 | 1,85 | 22,12 | 0,0003356 | 3054810,2854 |
| 100 | | 50,00 | 3,99 | 1,92 | 22,19 | 0,0003235 | 6360153,5540 |
| 200 | | 100,00 | 3,91 | 1,96 | 22,22 | 0,0003170 | 13230400,8999 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 - Probe 1

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,94 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,09 | 1,19 | 21,25 | 0,0004937 | 34041,6497 |
| 2 | | 1,00 | 4,8 | 1,51 | 21,83 | 0,0003892 | 78249,0228 |
| 3 | | 1,00 | 4,68 | 1,55 | 21,88 | 0,0003794 | 134474,7670 |
| 4 | | 1,00 | 4,58 | 1,59 | 21,92 | 0,0003713 | 192259,8375 |
| 5 | | 1,00 | 4,53 | 1,60 | 21,95 | 0,0003673 | 251366,6953 |
| 6 | | 1,00 | 4,47 | 1,63 | 21,97 | 0,0003624 | 311198,8684 |
| 7 | | 1,00 | 4,46 | 1,63 | 21,98 | 0,0003616 | 371846,4745 |
| 8 | | 1,00 | 4,41 | 1,65 | 22,00 | 0,0003575 | 432691,7837 |
| 9 | | 1,00 | 4,38 | 1,66 | 22,01 | 0,0003551 | 494264,4018 |
| 10 | | 1,00 | 4,31 | 1,69 | 22,05 | 0,0003494 | 556346,7390 |
| 15 | | 5,00 | 4,23 | 1,72 | 22,08 | 0,0003429 | 872310,8727 |
| 20 | | 5,00 | 4,17 | 1,74 | 22,11 | 0,0003381 | 1194641,1541 |
| 25 | | 5,00 | 4,11 | 1,77 | 22,13 | 0,0003332 | 1522005,3663 |
| 30 | | 5,00 | 4,07 | 1,79 | 22,15 | 0,0003300 | 1854416,5295 |
| 35 | | 5,00 | 4,03 | 1,80 | 22,17 | 0,0003267 | 2190365,1774 |
| 40 | | 5,00 | 4,01 | 1,81 | 22,18 | 0,0003251 | 2529784,9181 |
| 45 | | 5,00 | 3,97 | 1,83 | 22,20 | 0,0003219 | 2871172,1179 |
| 50 | | 5,00 | 3,94 | 1,84 | 22,21 | 0,0003194 | 3216207,0067 |
| 100 | | 50,00 | 3,84 | 1,89 | 22,26 | 0,0003113 | 6699814,3640 |
| 200 | | 100,00 | 3,72 | 1,95 | 22,31 | 0,0003016 | 13865671,9020 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 - Probe 2

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,95 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 6,03 | 1,21 | 21,28 | 0,0004889 | 34084,5504 |
| 2 | | 1,00 | 4,8 | 1,52 | 21,83 | 0,0003892 | 78731,7978 |
| 3 | | 1,00 | 4,66 | 1,57 | 21,89 | 0,0003778 | 134980,4819 |
| 4 | | 1,00 | 4,59 | 1,59 | 21,92 | 0,0003721 | 193001,7424 |
| 5 | | 1,00 | 4,53 | 1,61 | 21,95 | 0,0003673 | 251979,8272 |
| 6 | | 1,00 | 4,47 | 1,63 | 21,97 | 0,0003624 | 311812,0002 |
| 7 | | 1,00 | 4,44 | 1,64 | 21,99 | 0,0003600 | 372484,2399 |
| 8 | | 1,00 | 4,42 | 1,65 | 22,00 | 0,0003583 | 433591,2270 |
| 9 | | 1,00 | 4,4 | 1,66 | 22,01 | 0,0003567 | 494999,6285 |
| 10 | | 1,00 | 4,36 | 1,67 | 22,02 | 0,0003535 | 556737,2098 |
| 15 | | 5,00 | 4,24 | 1,72 | 22,08 | 0,0003438 | 869014,7642 |
| 20 | | 5,00 | 4,19 | 1,74 | 22,10 | 0,0003397 | 1190454,9841 |
| 25 | | 5,00 | 4,11 | 1,78 | 22,13 | 0,0003332 | 1516256,5985 |
| 30 | | 5,00 | 4,08 | 1,79 | 22,15 | 0,0003308 | 1848600,7839 |
| 35 | | 5,00 | 4,05 | 1,80 | 22,16 | 0,0003283 | 2183591,0876 |
| 40 | | 5,00 | 4,03 | 1,81 | 22,17 | 0,0003267 | 2521198,7411 |
| 45 | | 5,00 | 4,01 | 1,82 | 22,18 | 0,0003251 | 2860618,4819 |
| 50 | | 5,00 | 3,98 | 1,83 | 22,19 | 0,0003227 | 3201937,0335 |
| 100 | | 50,00 | 3,85 | 1,90 | 22,25 | 0,0003121 | 6649841,6058 |
| 200 | | 100,00 | 3,75 | 1,95 | 22,30 | 0,0003040 | 13792796,4638 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 - Probe 3

| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,95 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,18 | 1,41 | 21,66 | 0,0004200 | 34692,3093 |
| 2 | | 1,00 | 4,87 | 1,50 | 21,80 | 0,0003948 | 86591,4428 |
| 3 | | 1,00 | 4,73 | 1,55 | 21,86 | 0,0003835 | 141952,4885 |
| 4 | | 1,00 | 4,65 | 1,58 | 21,89 | 0,0003770 | 199045,2453 |
| 5 | | 1,00 | 4,57 | 1,60 | 21,93 | 0,0003705 | 257214,9626 |
| 6 | | 1,00 | 4,53 | 1,62 | 21,95 | 0,0003673 | 316451,1571 |
| 7 | | 1,00 | 4,47 | 1,64 | 21,97 | 0,0003624 | 376283,3302 |
| 8 | | 1,00 | 4,45 | 1,65 | 21,98 | 0,0003608 | 436943,2531 |
| 9 | | 1,00 | 4,41 | 1,66 | 22,00 | 0,0003575 | 497925,2933 |
| 10 | | 1,00 | 4,39 | 1,67 | 22,01 | 0,0003559 | 559485,4271 |
| 15 | | 5,00 | 4,27 | 1,72 | 22,06 | 0,0003462 | 869440,8485 |
| 20 | | 5,00 | 4,21 | 1,74 | 22,09 | 0,0003413 | 1188493,7699 |
| 25 | | 5,00 | 4,15 | 1,77 | 22,12 | 0,0003365 | 1512486,0855 |
| 30 | | 5,00 | 4,09 | 1,79 | 22,14 | 0,0003316 | 1841560,6211 |
| 35 | | 5,00 | 4,08 | 1,80 | 22,15 | 0,0003308 | 2175529,9614 |
| 40 | | 5,00 | 4,04 | 1,81 | 22,17 | 0,0003275 | 2510587,7354 |
| 45 | | 5,00 | 4,03 | 1,82 | 22,17 | 0,0003267 | 2849031,0515 |
| 50 | | 5,00 | 4 | 1,83 | 22,18 | 0,0003243 | 3188519,0997 |
| 100 | | 50,00 | 3,88 | 1,89 | 22,24 | 0,0003146 | 6617119,5562 |
| 200 | | 100,00 | 3,77 | 1,94 | 22,29 | 0,0003056 | 13702007,4536 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 - Probe 4

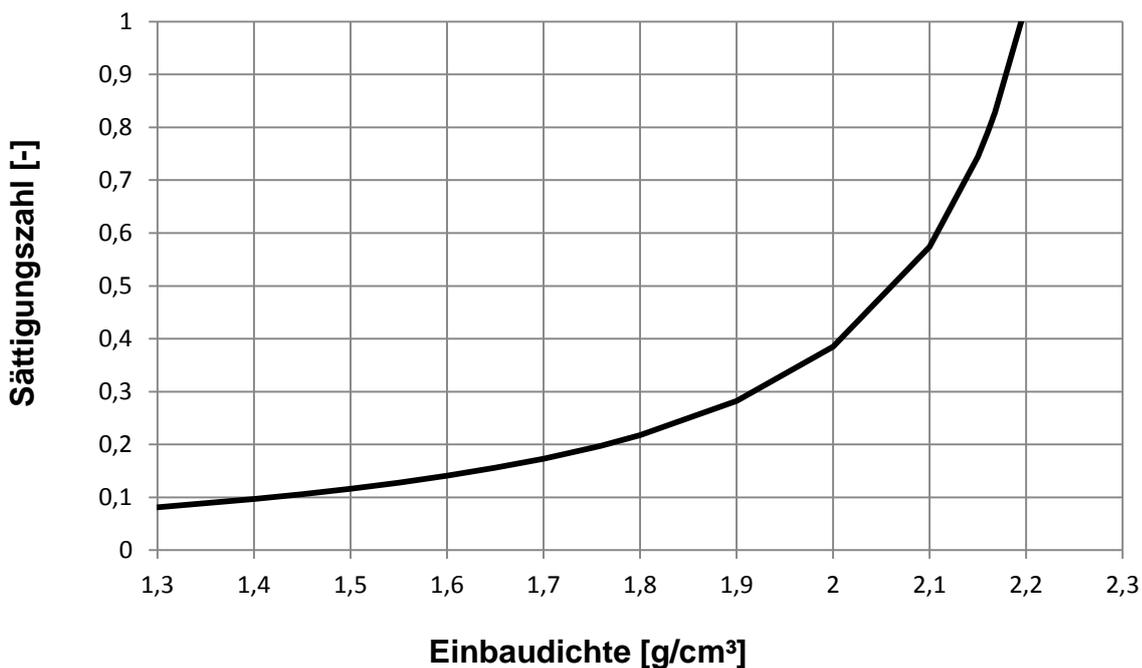
| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,9322985 | 20,53233 | 0,000624264 | 0 |
| 1 | | 1,00 | 4,96 | 1,4473182 | 21,7553427 | 0,000402123 | 34849,61159 |
| 2 | | 1,00 | 4,77 | 1,5049681 | 21,8401502 | 0,000386719 | 89161,72239 |
| 3 | | 1,00 | 4,69 | 1,5306392 | 21,8758586 | 0,000380233 | 145729,5455 |
| 4 | | 1,00 | 4,58 | 1,5674013 | 21,9249576 | 0,000371315 | 203391,4069 |
| 5 | | 1,00 | 4,53 | 1,5847016 | 21,9472754 | 0,000367262 | 262498,2647 |
| 6 | | 1,00 | 4,48 | 1,602388 | 21,9695931 | 0,000363208 | 322318,2842 |
| 7 | | 1,00 | 4,45 | 1,6131906 | 21,9829838 | 0,000360776 | 382842,8055 |
| 8 | | 1,00 | 4,38 | 1,6389722 | 22,0142286 | 0,000355101 | 443861,9619 |
| 9 | | 1,00 | 4,36 | 1,6464904 | 22,0231557 | 0,000353479 | 505881,45 |
| 10 | | 1,00 | 4,33 | 1,6578979 | 22,0365464 | 0,000351047 | 568223,3135 |
| 15 | | 5,00 | 4,24 | 1,6930892 | 22,0767183 | 0,00034375 | 882664,4537 |
| 20 | | 5,00 | 4,15 | 1,7298068 | 22,1168903 | 0,000336454 | 1204364,371 |
| 25 | | 5,00 | 4,1 | 1,750902 | 22,139208 | 0,0003324 | 1533372,574 |
| 30 | | 5,00 | 4,05 | 1,772518 | 22,1615258 | 0,000328346 | 1866728,779 |
| 35 | | 5,00 | 4,03 | 1,7813147 | 22,1704529 | 0,000326725 | 2204336,432 |
| 40 | | 5,00 | 4 | 1,7946745 | 22,1838435 | 0,000324293 | 2543824,481 |
| 45 | | 5,00 | 3,97 | 1,8082363 | 22,1972342 | 0,000321861 | 2886065,148 |
| 50 | | 5,00 | 3,95 | 1,8173919 | 22,2061613 | 0,000320239 | 3231030,697 |
| 100 | | 50,00 | 3,87 | 1,8549607 | 22,2418697 | 0,000313753 | 6703728,069 |
| 200 | | 100,00 | 3,8 | 1,8891311 | 22,2731145 | 0,000308078 | 13802655,28 |

Gefügestabilisierter Salzgrus mit Korngemisch 2 - Probe 5

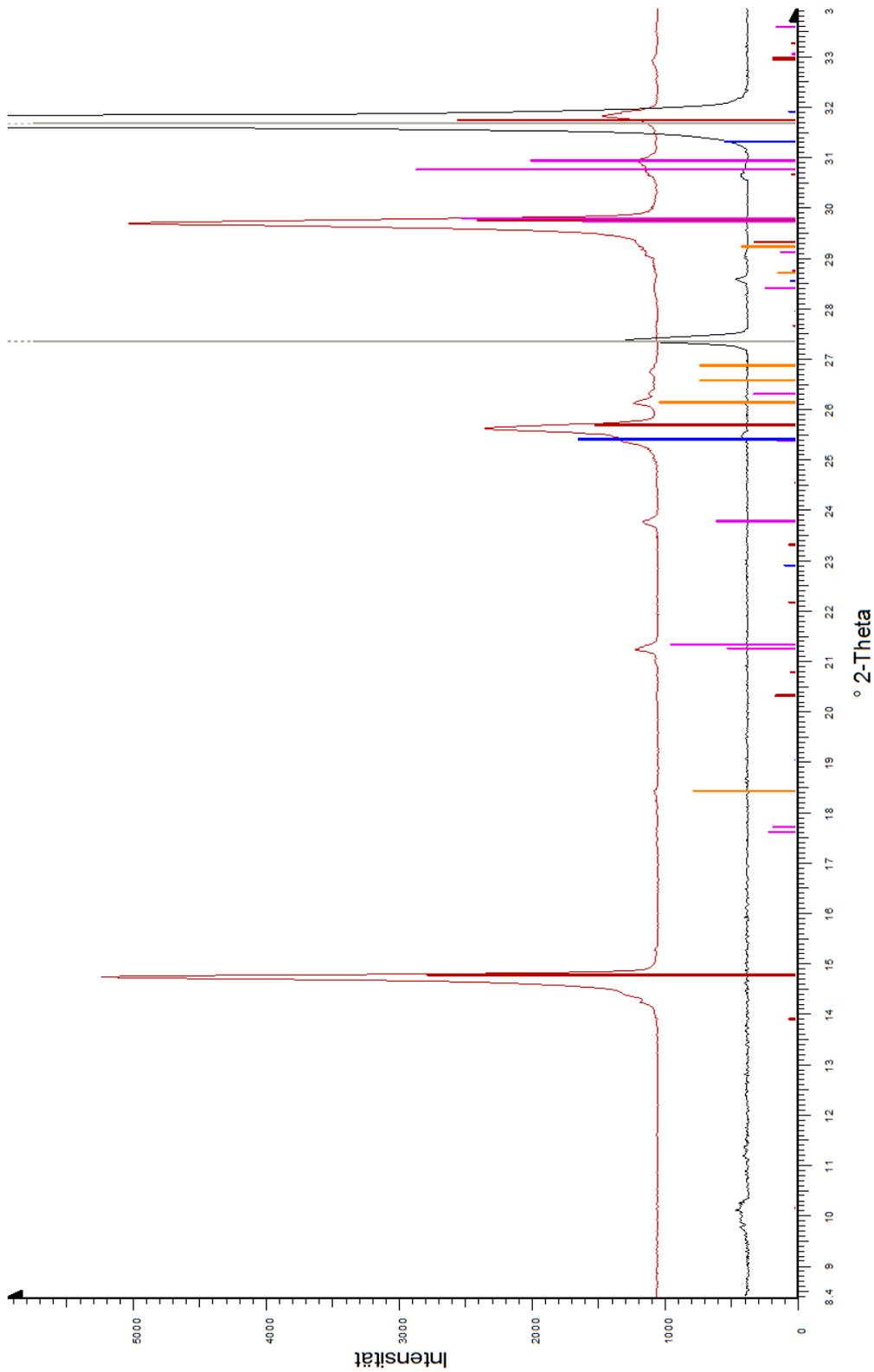
| Schlagzahl gesamt [-] | Anzahl der Schläge mit | | Probenhöhe [cm] | Dichte [g/cm ³] | Energie pro Schlag [Nm] | Proben-volumen [m ³] | Verdichtungsenergie [J/m ³] |
|--------------------------|-----------------------------------|--------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|--|
| | spezifischer Schlagenergie [-] | | | | | | |
| 0 | | 0 | 7,7 | 0,97 | 20,53 | 0,0006243 | 0,0000 |
| 1 | | 1,00 | 5,33 | 1,40 | 21,59 | 0,0004321 | 34585,0577 |
| 2 | | 1,00 | 5,01 | 1,49 | 21,73 | 0,0004062 | 84879,0033 |
| 3 | | 1,00 | 4,91 | 1,52 | 21,78 | 0,0003981 | 138495,2285 |
| 4 | | 1,00 | 4,81 | 1,56 | 21,82 | 0,0003900 | 193315,5638 |
| 5 | | 1,00 | 4,73 | 1,58 | 21,86 | 0,0003835 | 249367,1840 |
| 6 | | 1,00 | 4,68 | 1,60 | 21,88 | 0,0003794 | 306425,0216 |
| 7 | | 1,00 | 4,63 | 1,62 | 21,90 | 0,0003754 | 364151,2718 |
| 8 | | 1,00 | 4,59 | 1,63 | 21,92 | 0,0003721 | 422548,4800 |
| 9 | | 1,00 | 4,57 | 1,64 | 21,93 | 0,0003705 | 481478,5858 |
| 10 | | 1,00 | 4,56 | 1,64 | 21,93 | 0,0003697 | 540678,6387 |
| 15 | | 5,00 | 4,43 | 1,69 | 21,99 | 0,0003592 | 838112,8131 |
| 20 | | 5,00 | 4,35 | 1,72 | 22,03 | 0,0003527 | 1144772,4221 |
| 25 | | 5,00 | 4,32 | 1,73 | 22,04 | 0,0003502 | 1457261,5956 |
| 30 | | 5,00 | 4,24 | 1,77 | 22,08 | 0,0003438 | 1772430,6088 |
| 35 | | 5,00 | 4,22 | 1,77 | 22,09 | 0,0003421 | 2093676,0558 |
| 40 | | 5,00 | 4,2 | 1,78 | 22,09 | 0,0003405 | 2416574,4571 |
| 45 | | 5,00 | 4,16 | 1,80 | 22,11 | 0,0003373 | 2741272,6403 |
| 50 | | 5,00 | 4,13 | 1,81 | 22,13 | 0,0003348 | 3069291,4400 |
| 100 | | 50,00 | 3,97 | 1,89 | 22,20 | 0,0003219 | 6383971,0314 |
| 200 | | 100,00 | 3,88 | 1,93 | 22,24 | 0,0003146 | 13292989,5837 |

Anhang F: Berechnung der Sättigung in Abhängigkeit von der Einbaudichte

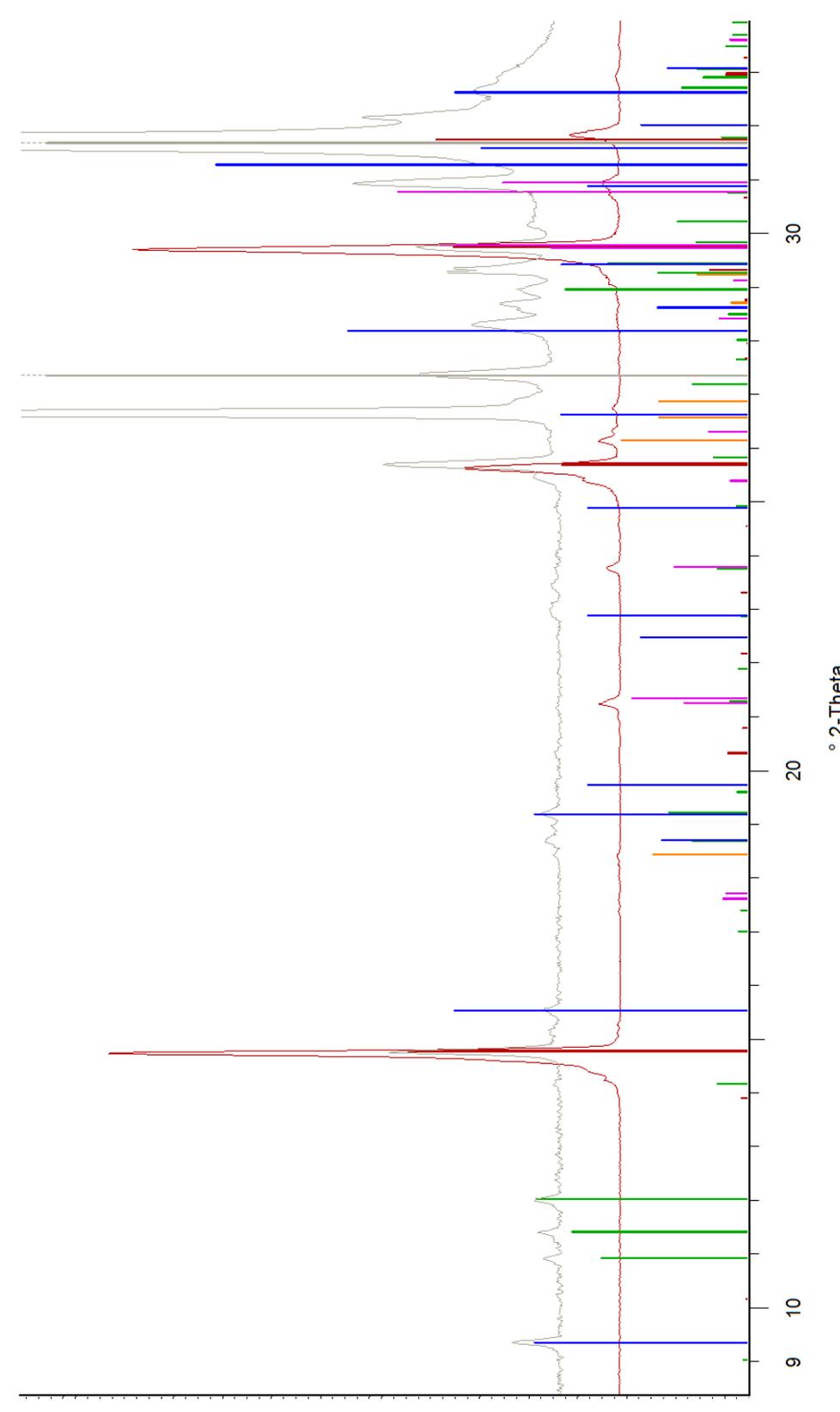
| Einbaudichte [g/cm ³] | Porosität [%] | Trocken- einbaudichte [g/cm ³] | Flüssigkeitsgef. Porenraum [-] | Sättigungszahl [-] |
|--------------------------------------|------------------|--|-----------------------------------|-----------------------|
| 1,3 | 44,39097 | 1,234520372 | 0,035663922 | 0,08034048 |
| 1,35 | 42,25217 | 1,282001925 | 0,037035611 | 0,087653759 |
| 1,4 | 40,11336 | 1,329483478 | 0,0384073 | 0,095746912 |
| 1,45 | 37,97455 | 1,37696503 | 0,03977899 | 0,104751713 |
| 1,5 | 35,83574 | 1,424446583 | 0,041150679 | 0,114831394 |
| 1,55 | 33,69693 | 1,471928136 | 0,042522368 | 0,126190627 |
| 1,6 | 31,55812 | 1,519409689 | 0,043894058 | 0,139089574 |
| 1,65 | 29,41931 | 1,566891242 | 0,045265747 | 0,153864049 |
| 1,7 | 27,2805 | 1,614372794 | 0,046637436 | 0,170955181 |
| 1,75 | 25,1417 | 1,661854347 | 0,048009126 | 0,190954204 |
| 1,76 | 24,71393 | 1,671350658 | 0,048283463 | 0,195369393 |
| 1,8 | 23,00289 | 1,7093359 | 0,049380815 | 0,214672245 |
| 1,9 | 18,72527 | 1,804299005 | 0,052124193 | 0,27836284 |
| 2 | 14,44765 | 1,899262111 | 0,054867572 | 0,379768073 |
| 2,1 | 10,17004 | 1,994225217 | 0,057610951 | 0,566477392 |
| 2,15 | 8,031227 | 2,041706769 | 0,05898264 | 0,734416334 |
| 2,16 | 7,603465 | 2,05120308 | 0,059256978 | 0,779341772 |
| 2,165 | 7,389584 | 2,055951235 | 0,059394147 | 0,803754945 |
| 2,166 | 7,346808 | 2,056900866 | 0,059421581 | 0,808808151 |
| 2,1675 | 7,282644 | 2,058325313 | 0,059462731 | 0,816499266 |
| 2,1951 | 6,102021 | 2,08453513 | 0,060219904 | 0,986884543 |



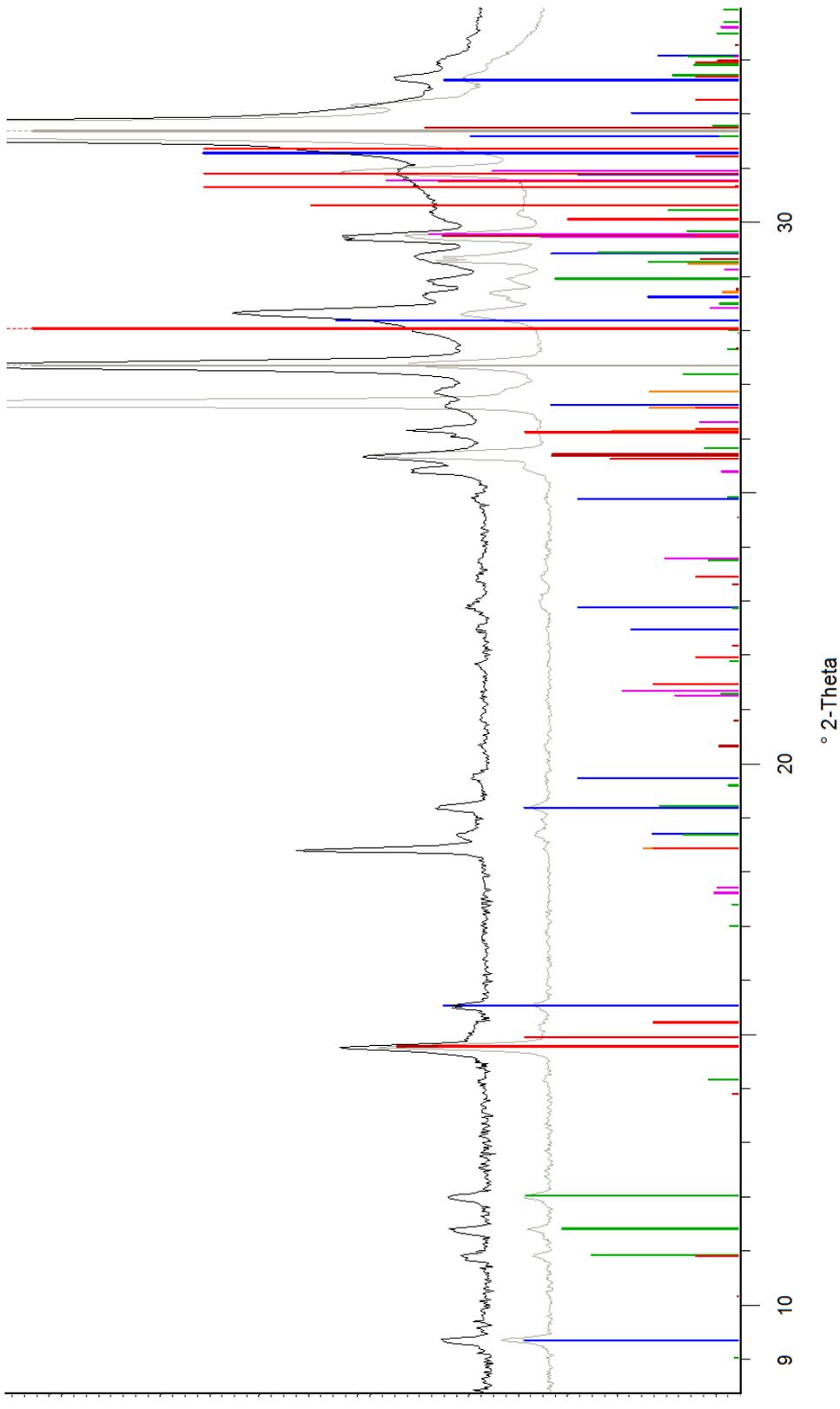
Anhang G: P-XRD-Abbildungen (Ausgangsmaterialien)



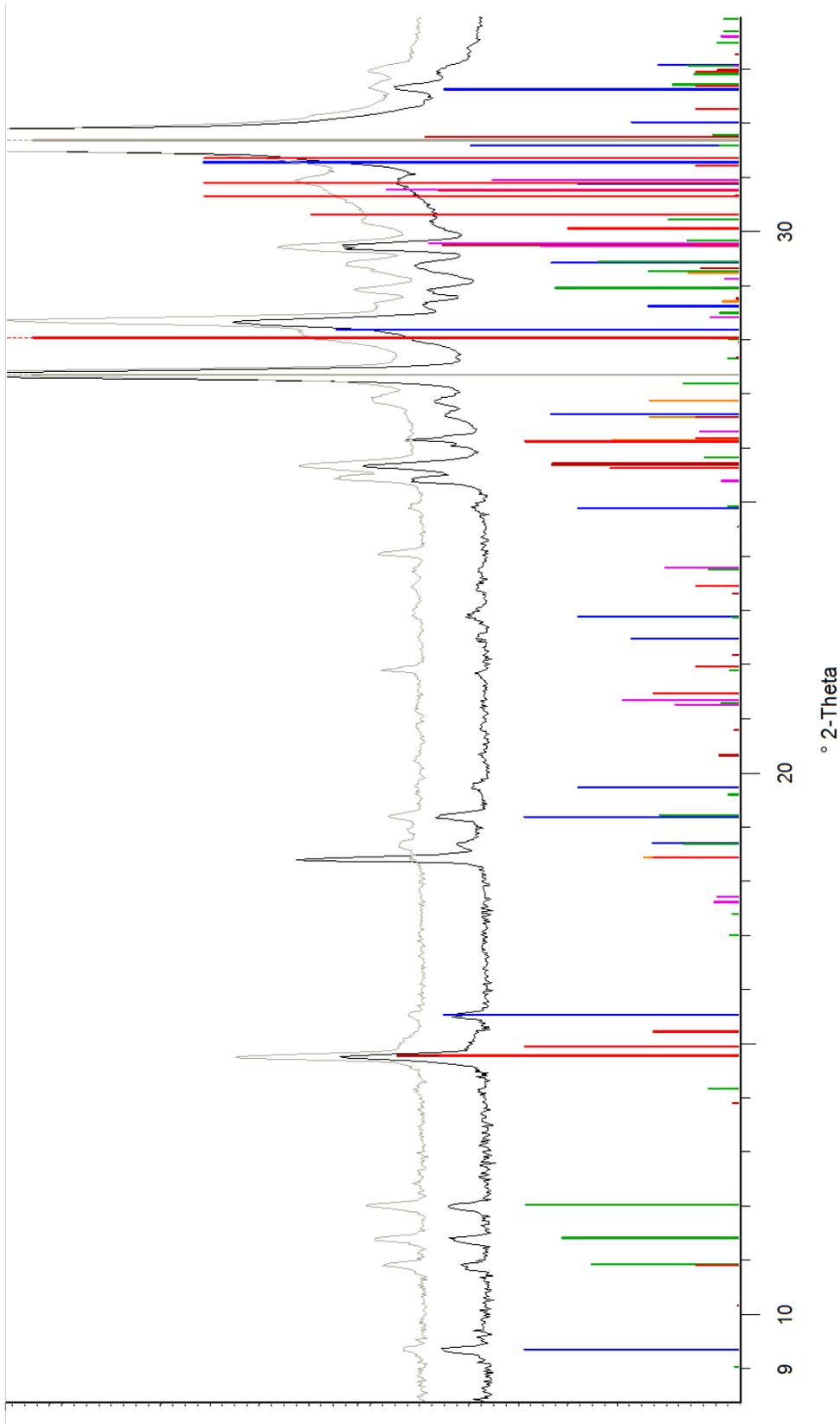
XRD – Probenalter 10 d



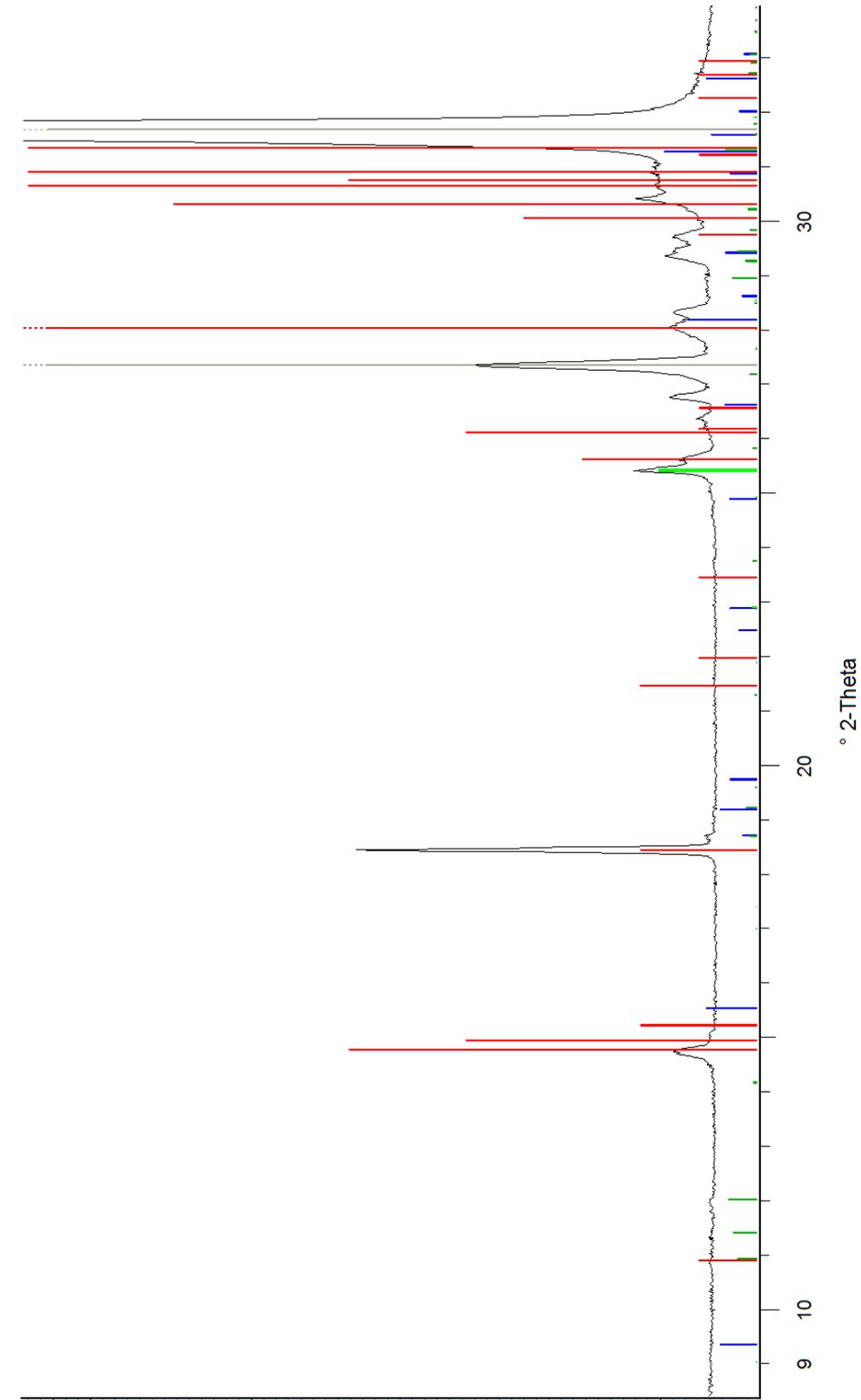
XRD – Probenalter 31 d



XRD – Probenalter 81 d



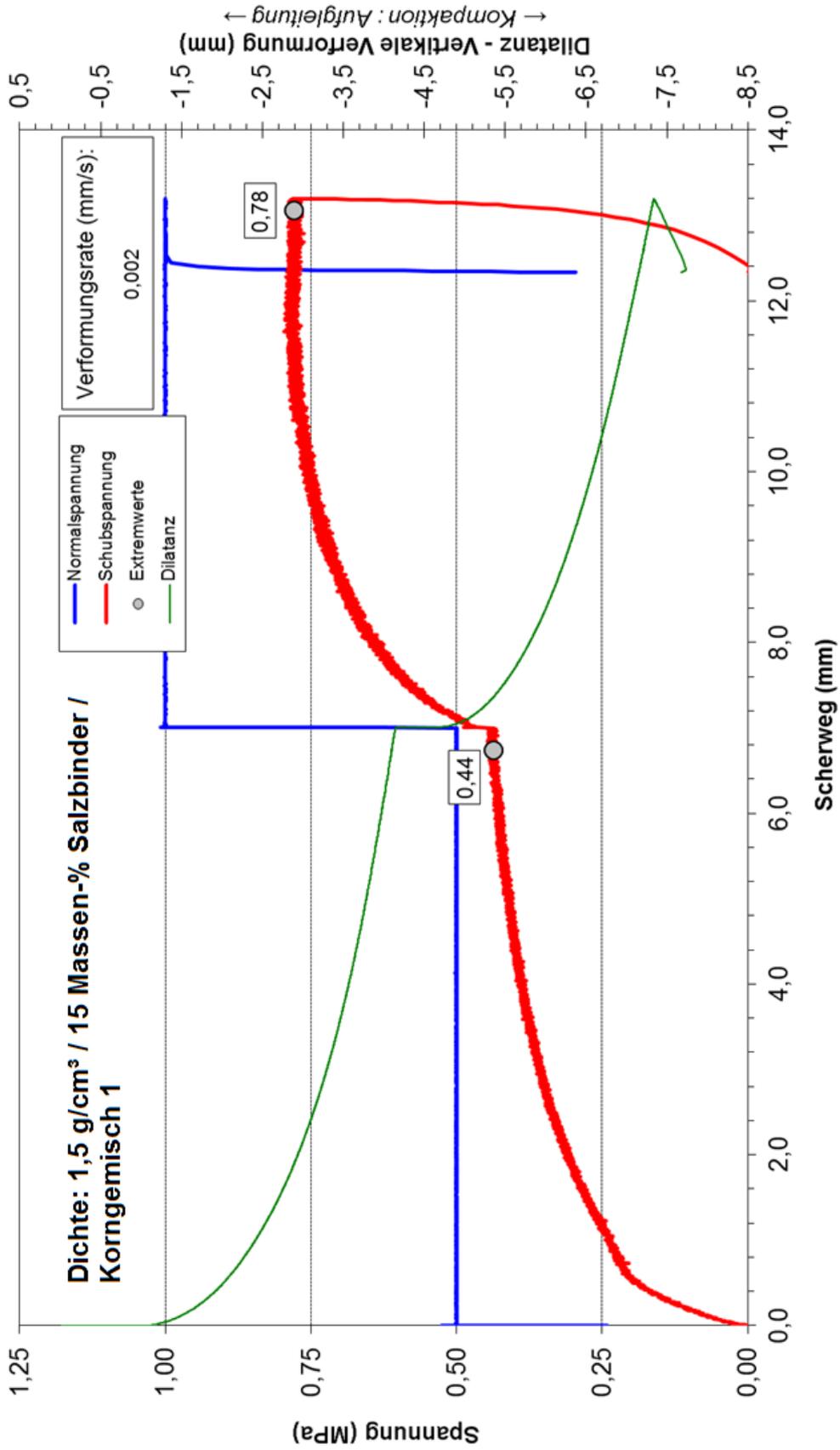
XRD – Probenalter 2 Jahre und 5 Monate

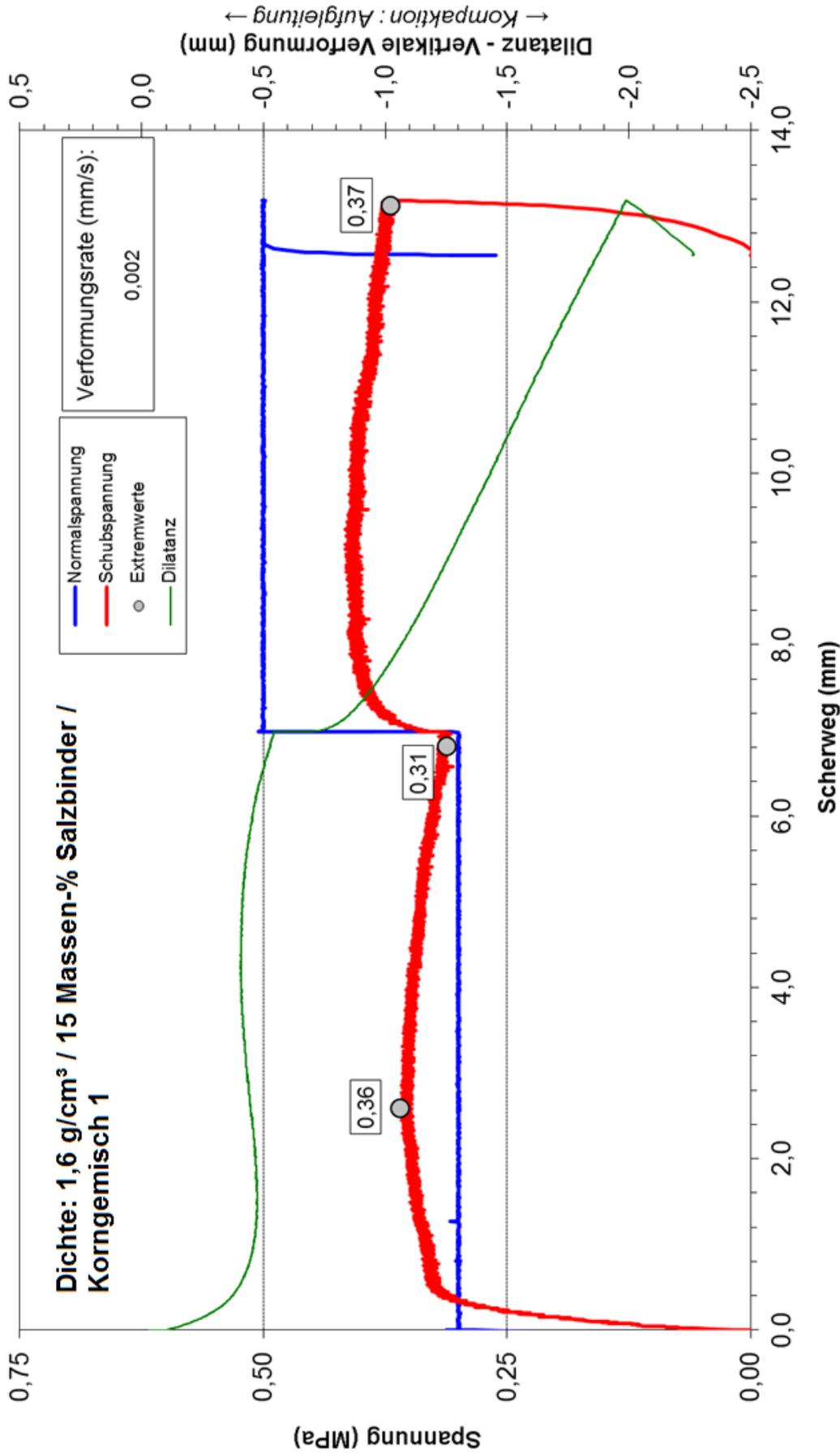


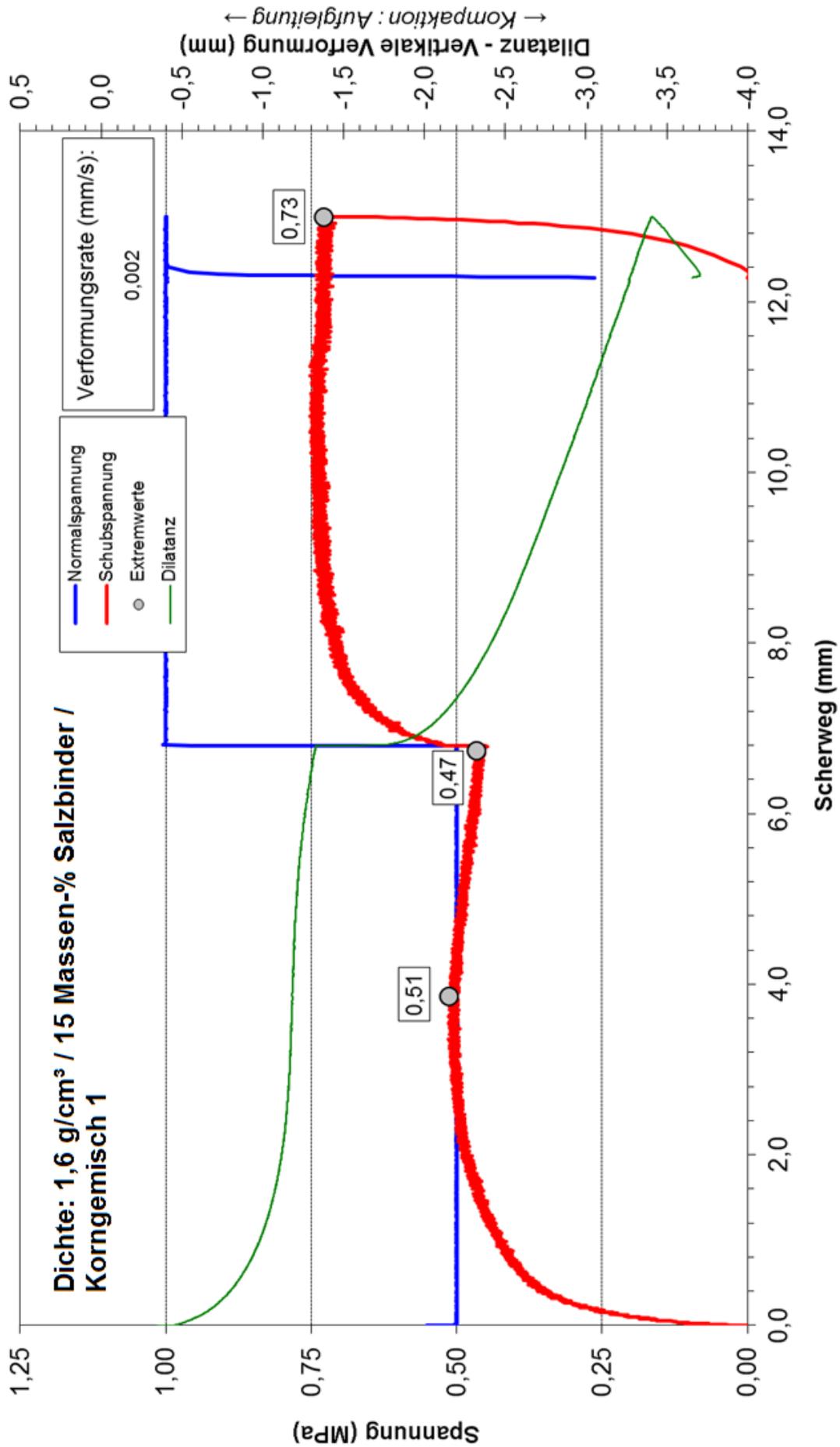
Anhang H: Porositäts- und Permeabilitätsmessungen am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig [Pop15]

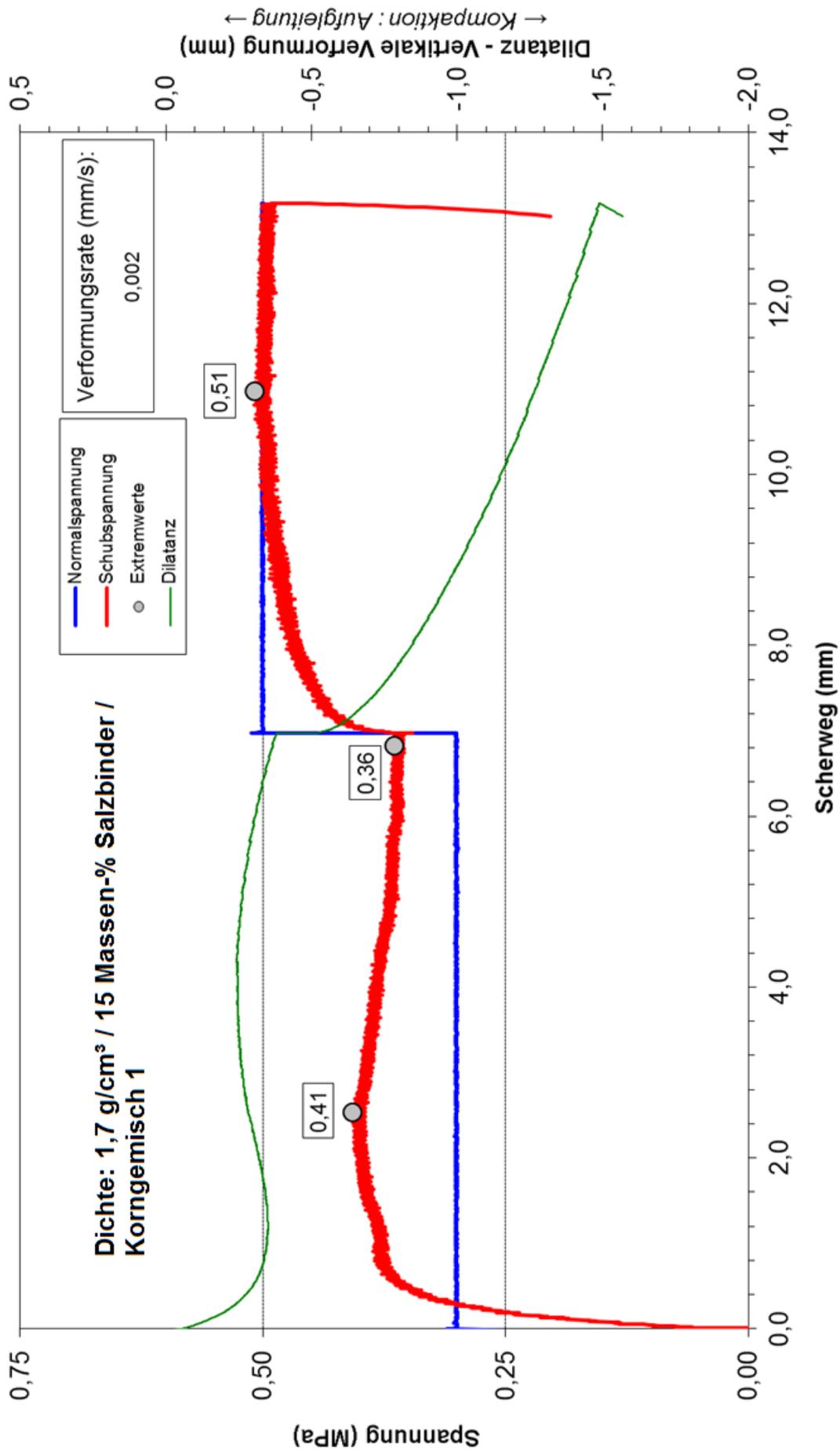
| Probenbezeichnung | reaktive Phase [%] | Feinkornanteil [%] | Soll-Dichte [g/cm ³] | Ist-Dichte [g/cm ³] | Porosität [%] | Permeabilität [m ²] |
|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|---------------------------------|
| 538/1 | 15 | 0 | 1,7 | 1,690 | 22,42 | 2,79E-11 |
| 538/2 | 15 | 0 | 1,7 | 1,679 | 22,81 | 3,74E-11 |
| 538/3 | 15 | 0 | 1,6 | 1,560 | 28,20 | 1,14E-10 |
| 538/4 | 15 | 0 | 1,6 | 1,599 | 26,57 | 8,24E-11 |
| 538/5 | 20 | 0 | 1,6 | 1,542 | 30,26 | 5,73E-11 |
| 538/6 | 20 | 0 | 1,6 | 1,550 | 29,89 | 5,36E-11 |
| 538/7 | 15 | 0 | 1,6 | 1,549 | 29,59 | 7,06E-11 |
| 538/8 | 15 | 0 | 1,6 | 1,581 | 28,09 | 5,44E-11 |
| 538/9 | 12,5 | 0 | 1,6 | 1,564 | 28,74 | 6,11E-11 |
| 538/10 | 12,5 | 0 | 1,6 | 1,567 | 28,70 | 3,56E-11 |
| 538/11 | 10 | 0 | 1,6 | 1,525 | 30,83 | 6,02E-11 |
| 538/12 | 10 | 0 | 1,6 | 1,542 | 30,26 | 3,91E-11 |
| 538/13 | 15 | 20 | 1,6 | 1,665 | 23,81 | 6,51E-12 |
| 538/14 | 15 | 20 | 1,6 | 1,601 | 26,58 | 6,36E-12 |
| 538/15 | 20 | 20 | 1,6 | 1,586 | 28,44 | 1,05E-11 |
| 538/16 | 10 | 20 | 1,6 | 1,577 | 28,78 | 6,63E-12 |
| 538/17 | 15 | 20 | 1,6 | 1,531 | 30,87 | 2,64E-11 |
| 538/18 | 15 | 20 | 1,6 | 1,528 | 30,71 | 1,82E-11 |
| 538/19 | 15 | 20 | 1,6 | 1,532 | 30,31 | 1,87E-11 |
| 538/20 | 15 | 20 | 1,6 | 1,517 | 30,75 | 2,06E-11 |
| 538/21 | 15 | 20 | 1,6 | 1,574 | 27,67 | 1,08E-11 |
| 538/22 | 15 | 20 | 1,6 | 1,580 | 27,26 | 9,13E-12 |

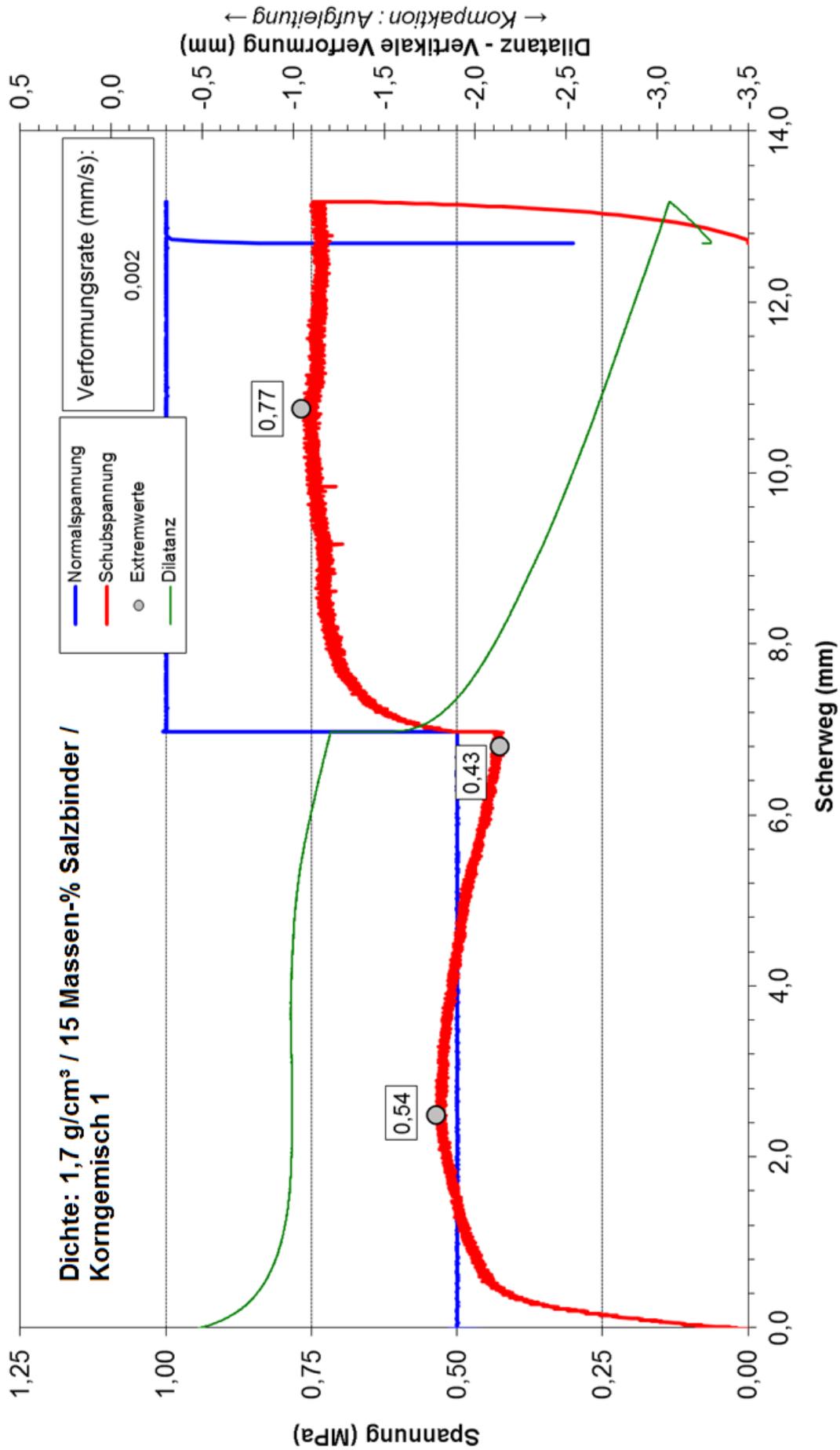
Anhang I: Ergebnisse Scherfestigkeitsuntersuchungen am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig [Pop15]

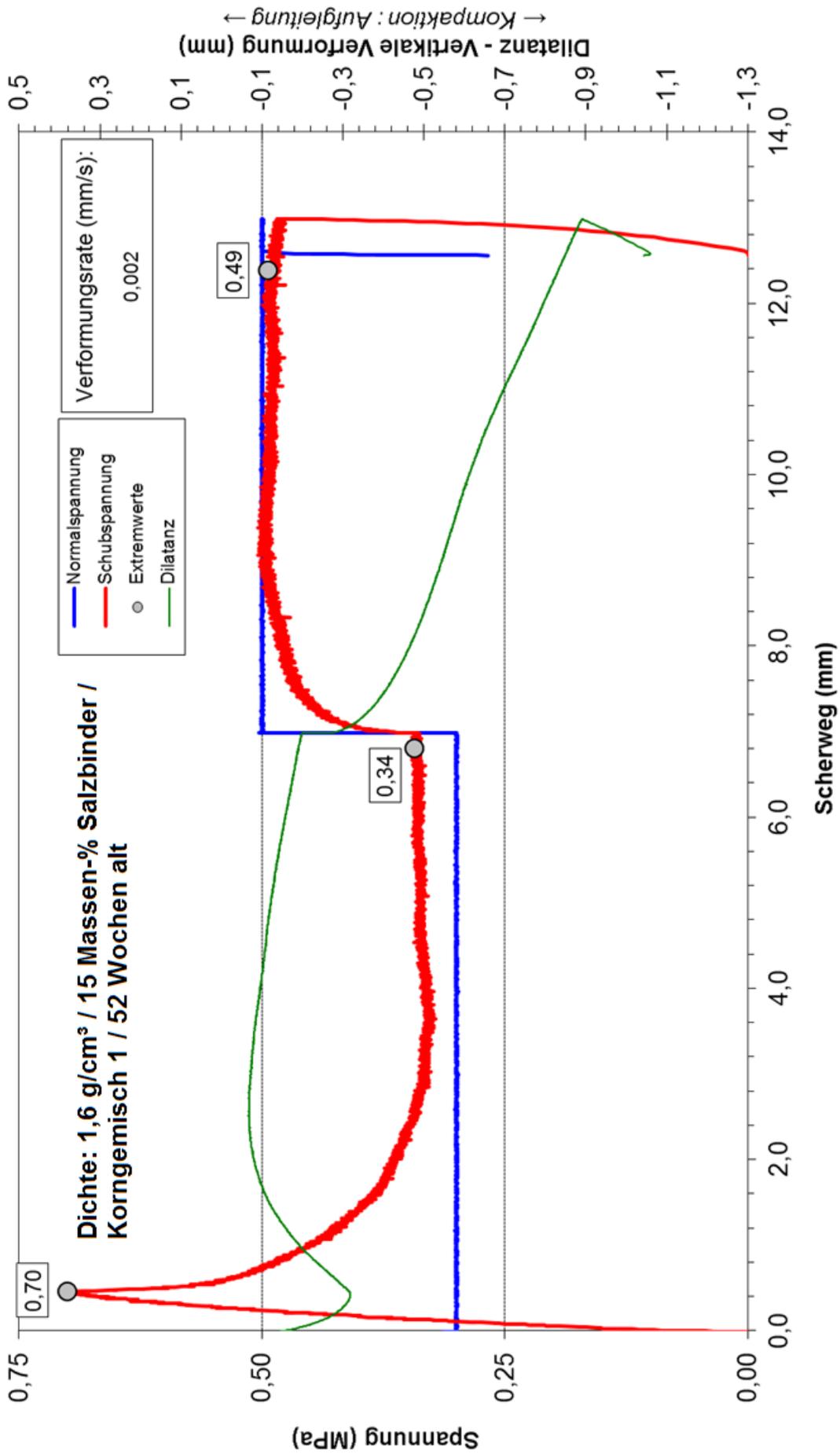


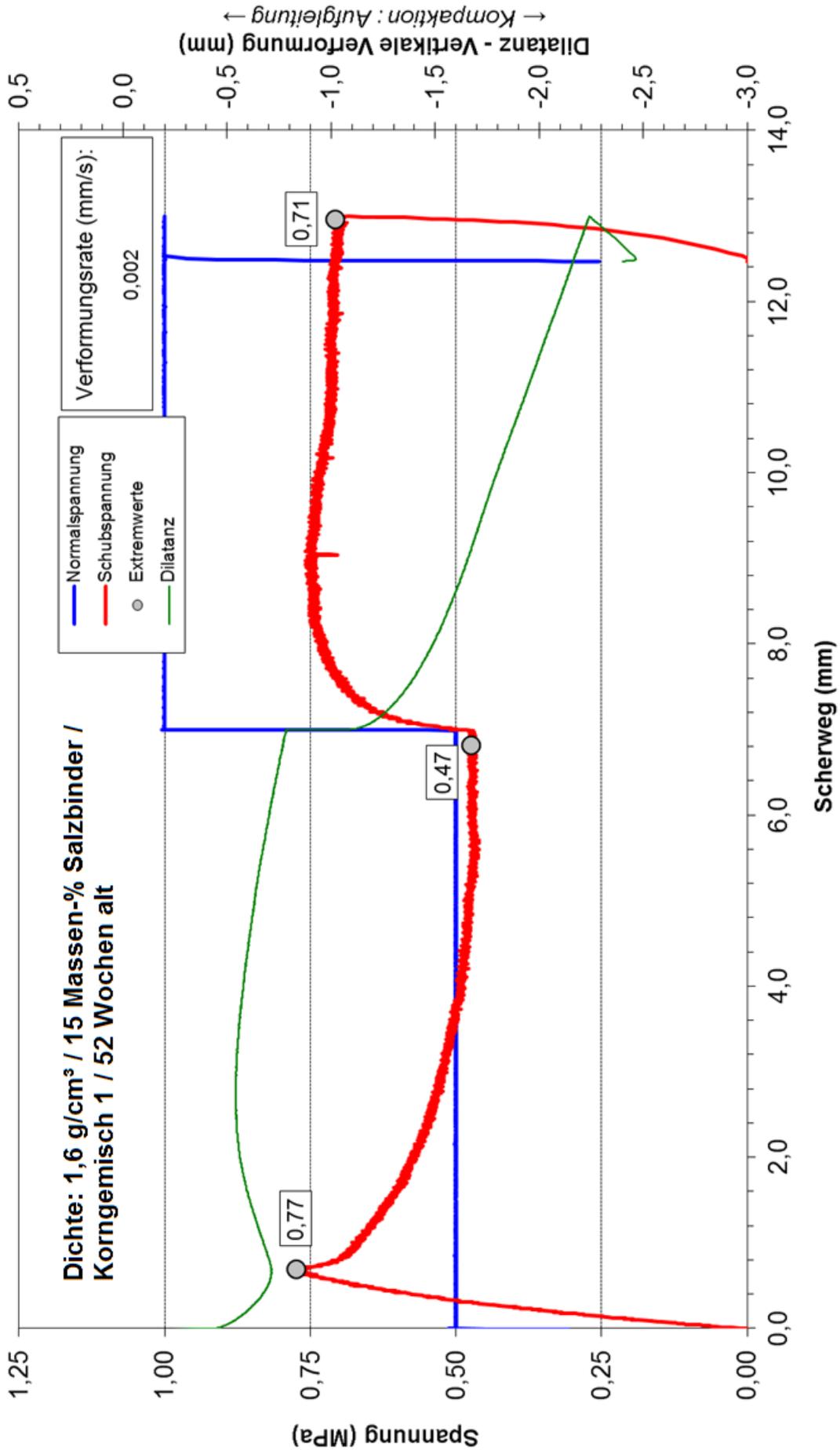


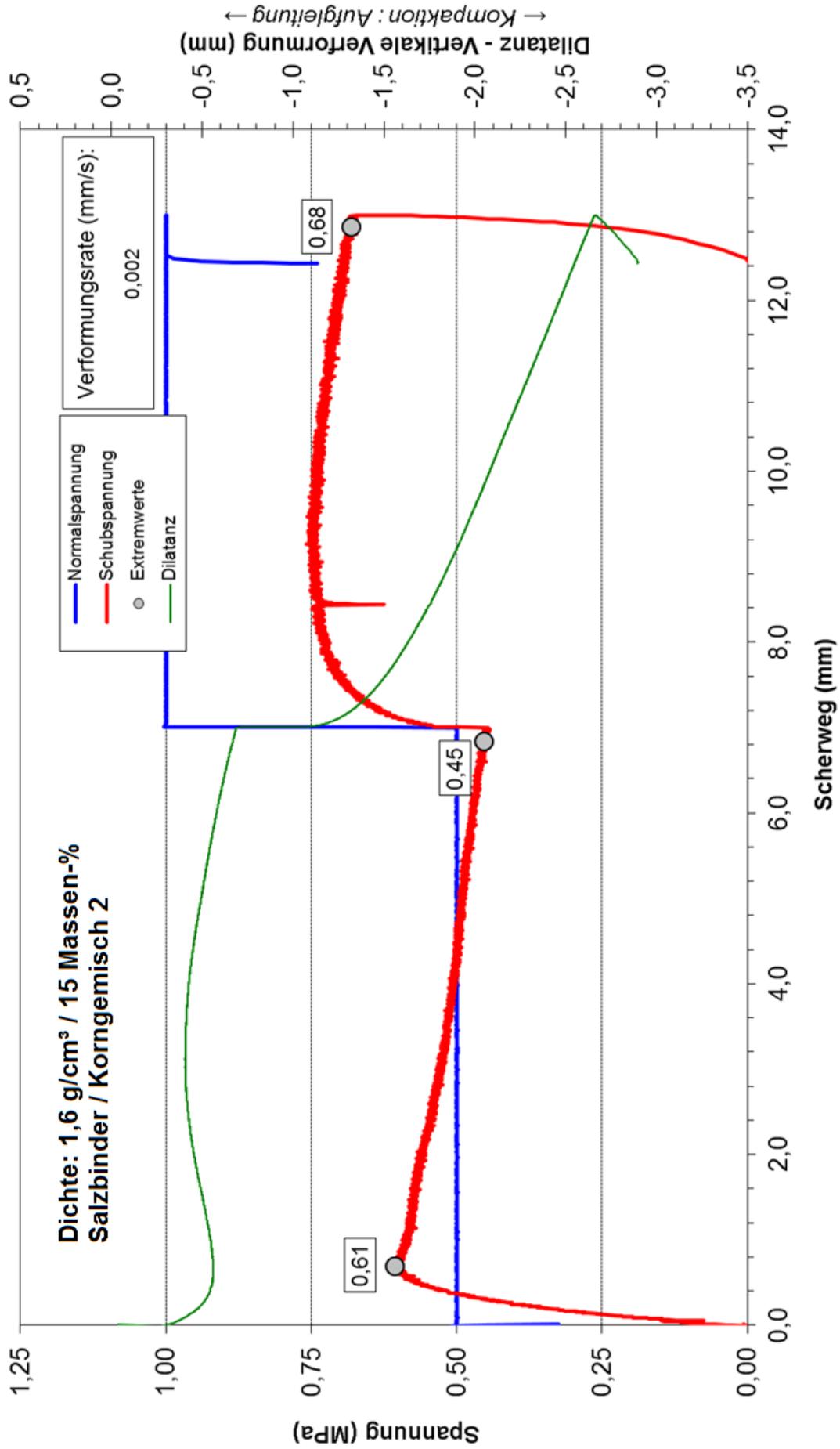


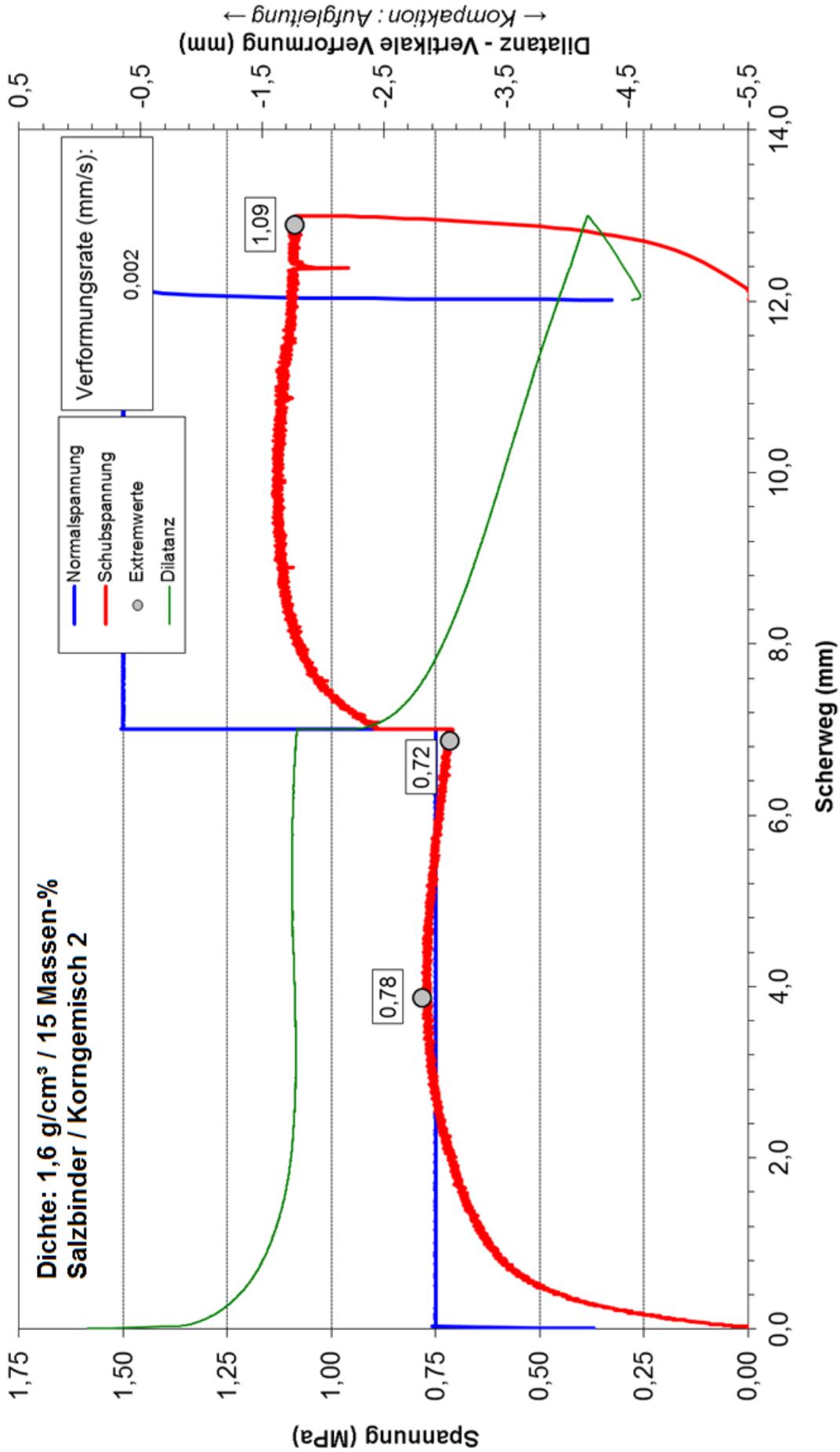


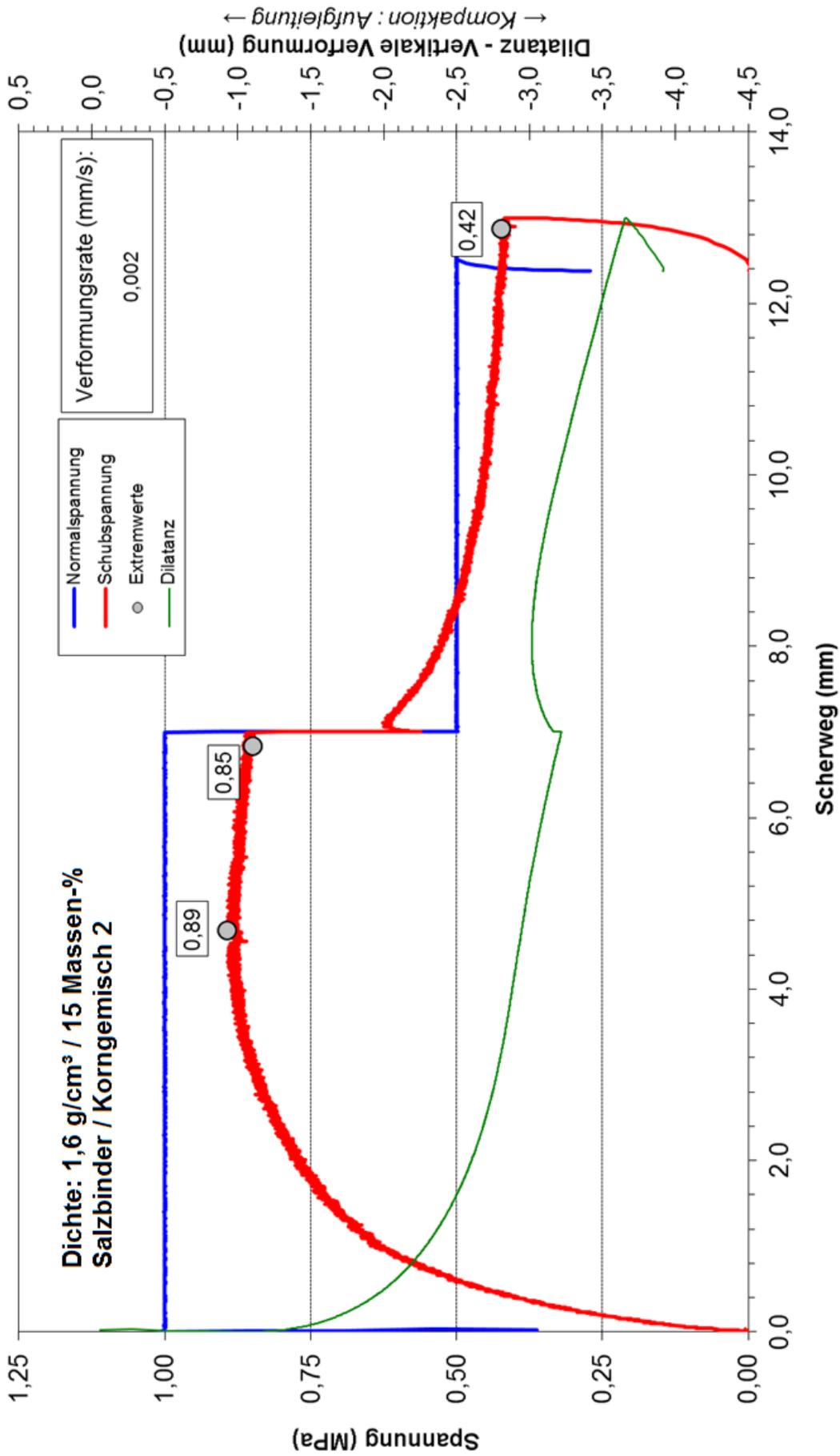




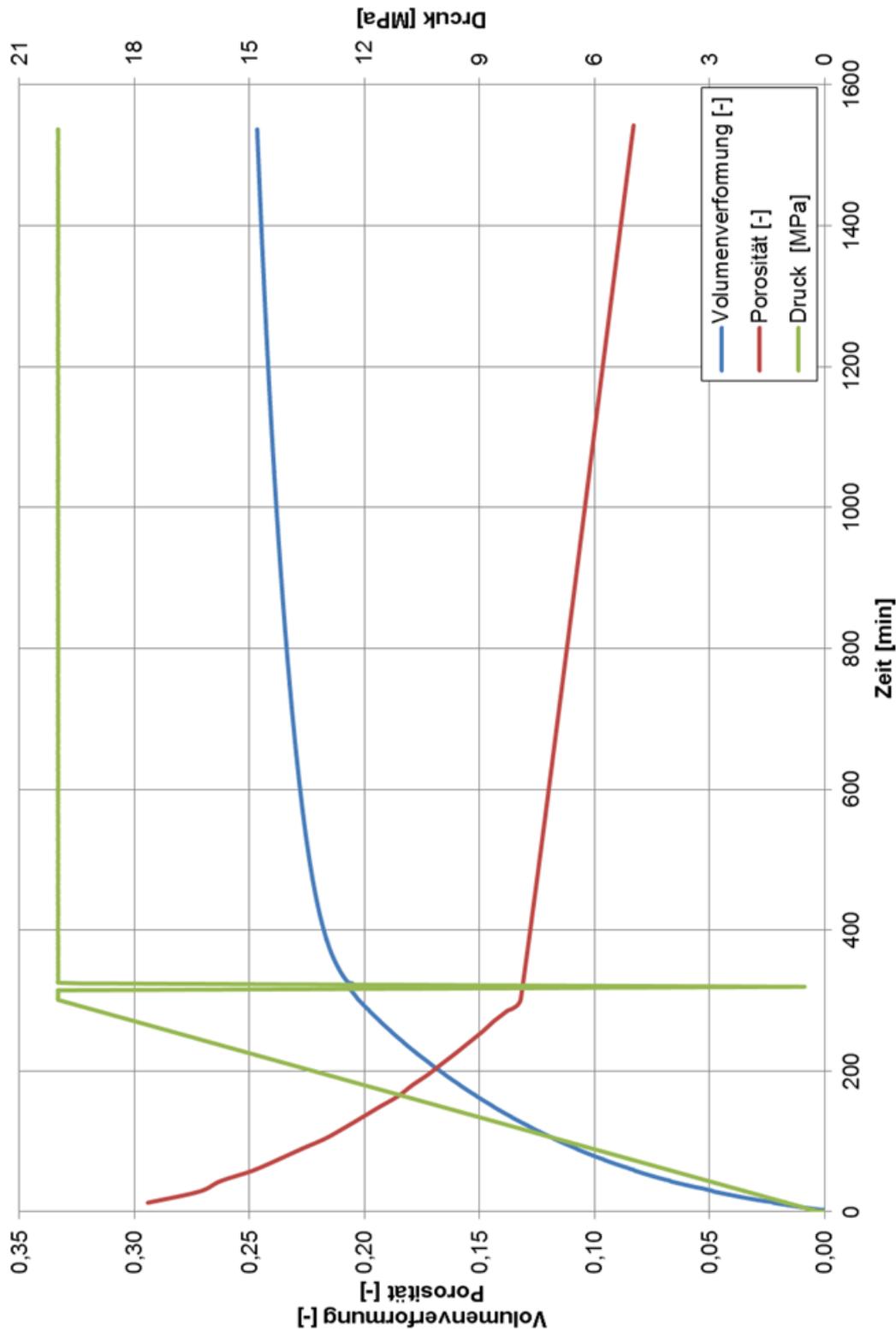




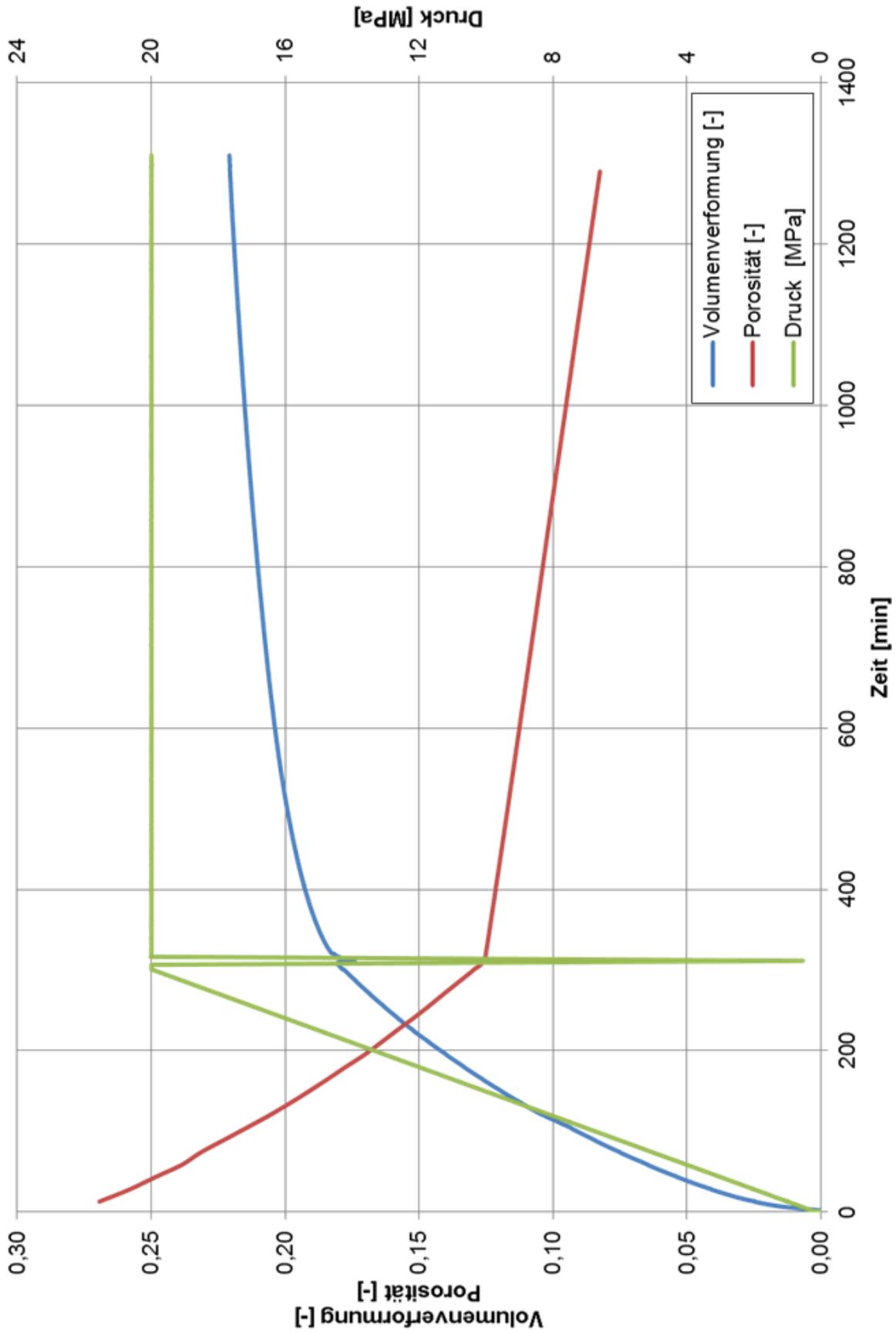




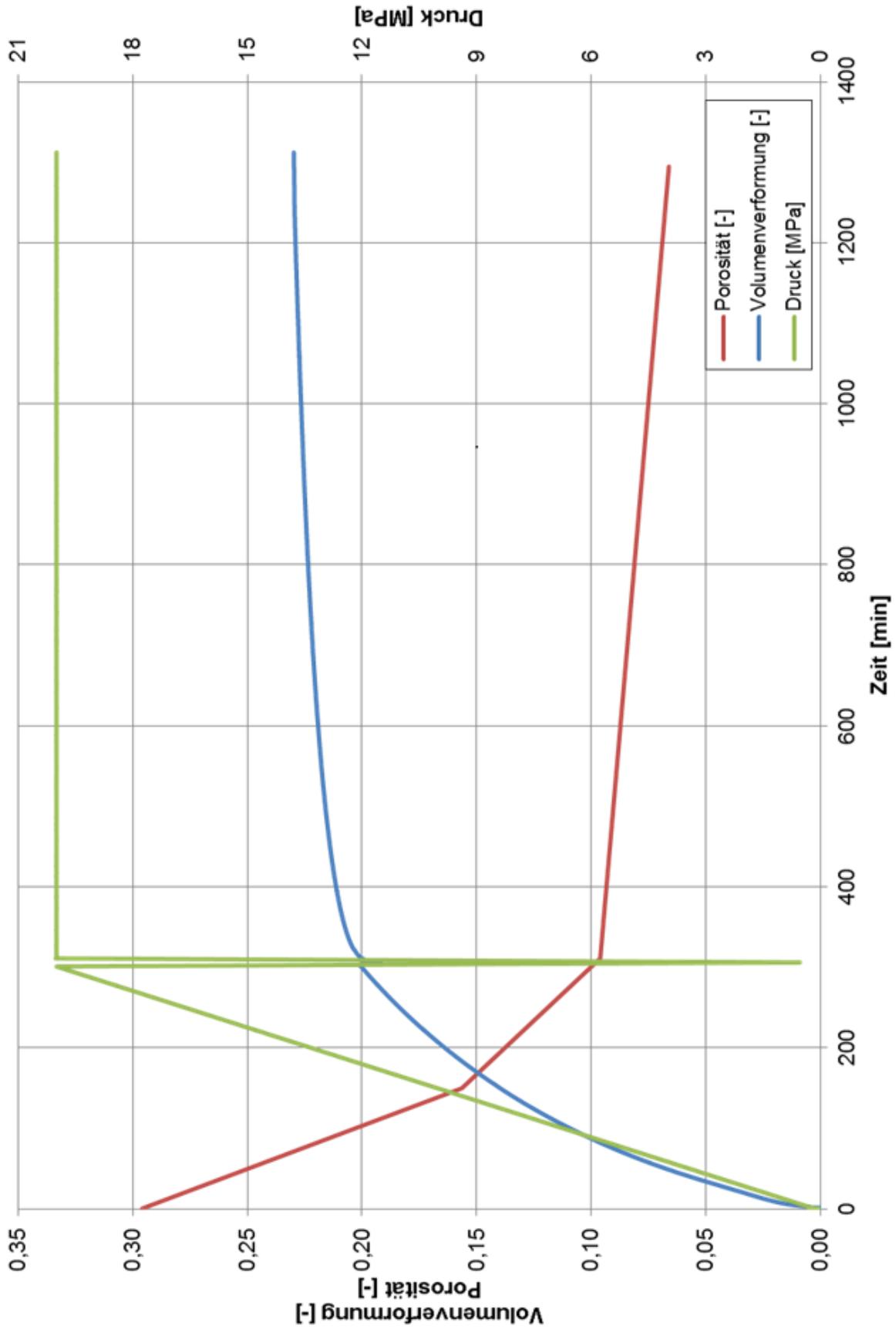
Anhang J: Ergebnisse der Untersuchungen des Kompaktions- und Kriechverhaltens am Institut für Gebirgsmechanik (IfG) in Leipzig [Pop15]



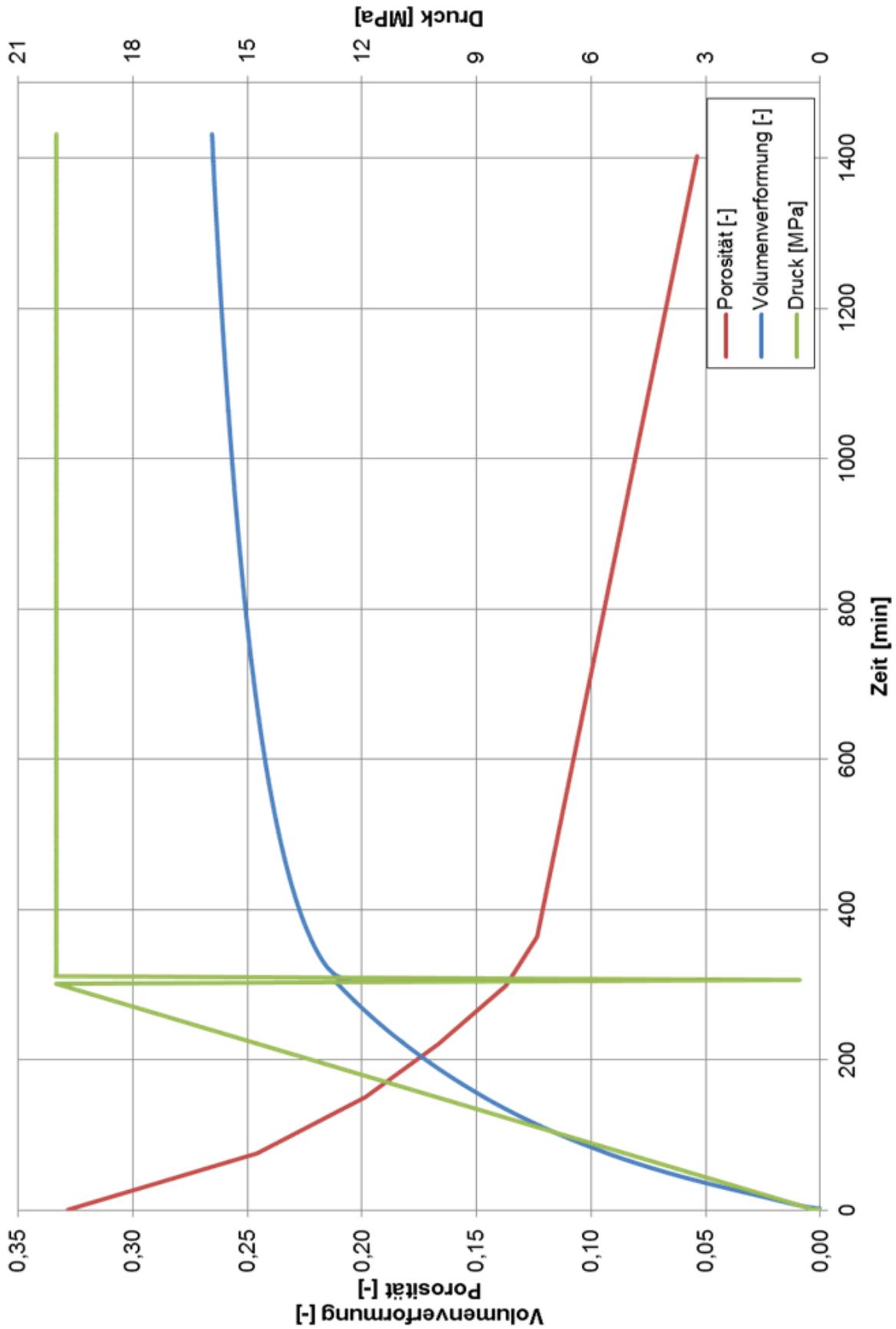
Dichte: 1,61 g/cm³ / 10 Massen-% Salzbinder / Korngemisch 1



538: Salzgrus / Korngemisch 1

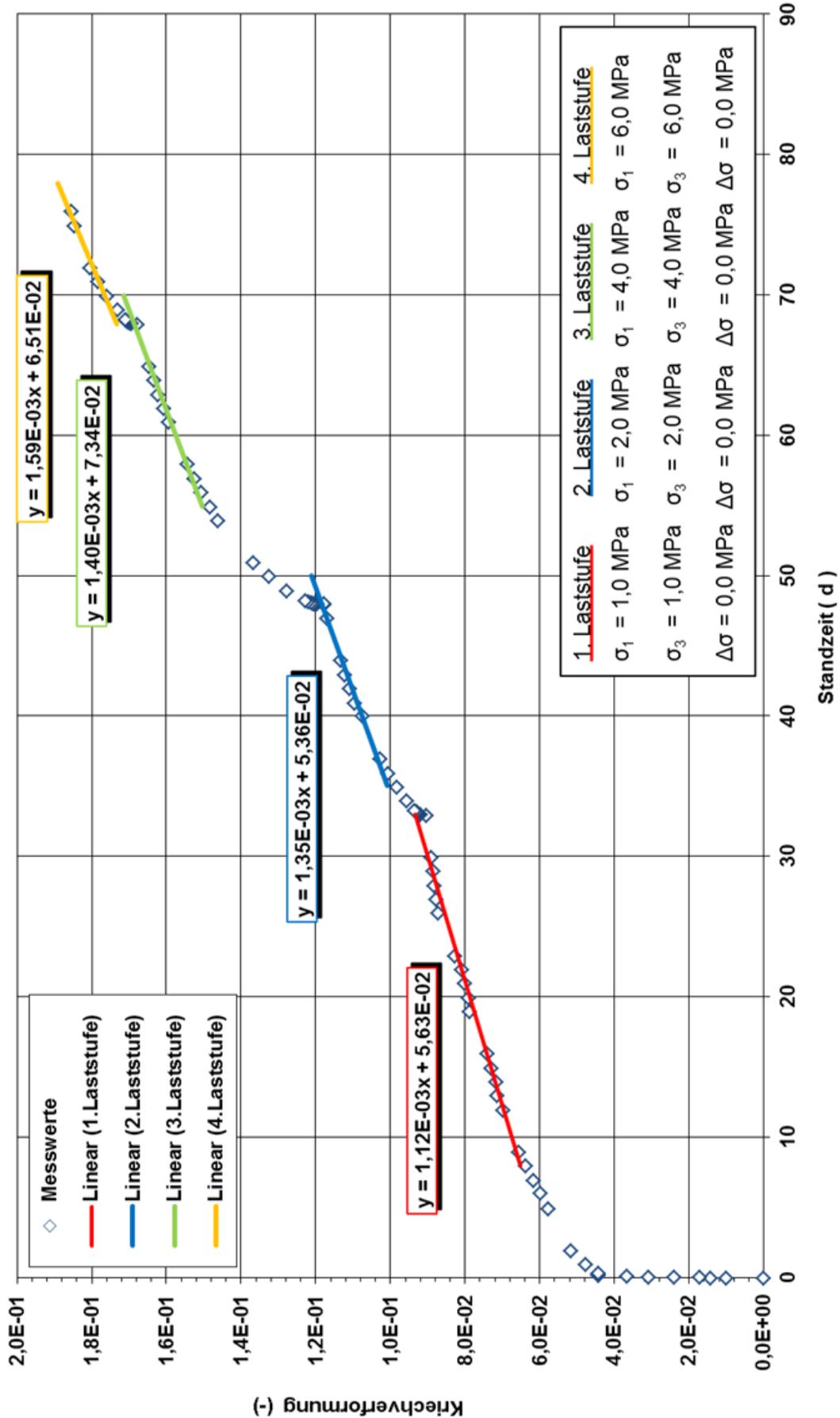


Dichte: 1,55 g/cm³ / 15 Massen-% Salzbinder / Korngemisch 1

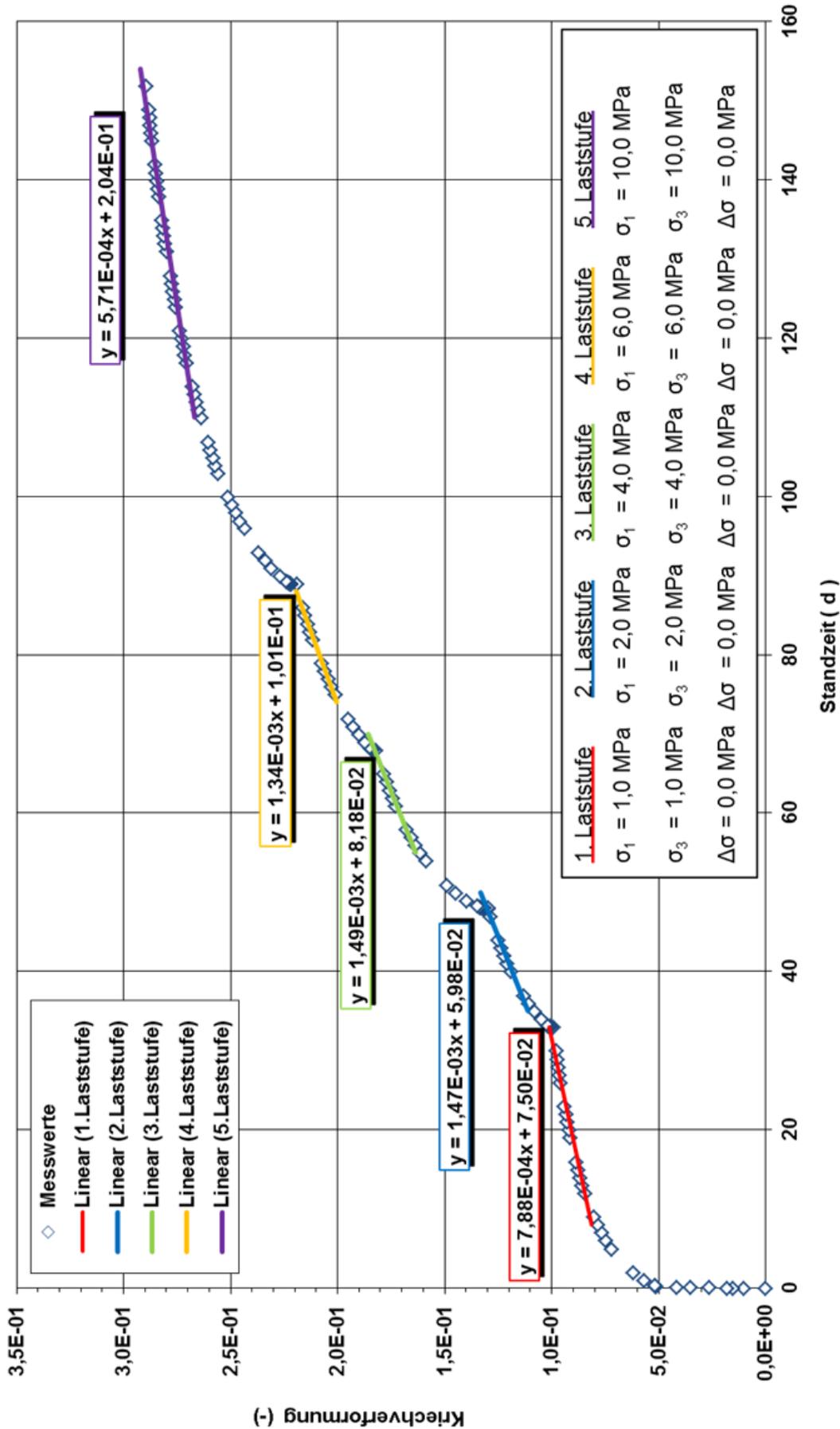


Dichte 1,58 g/cm³ / 15 Massen-% Salzbinder / Korngemisch 2

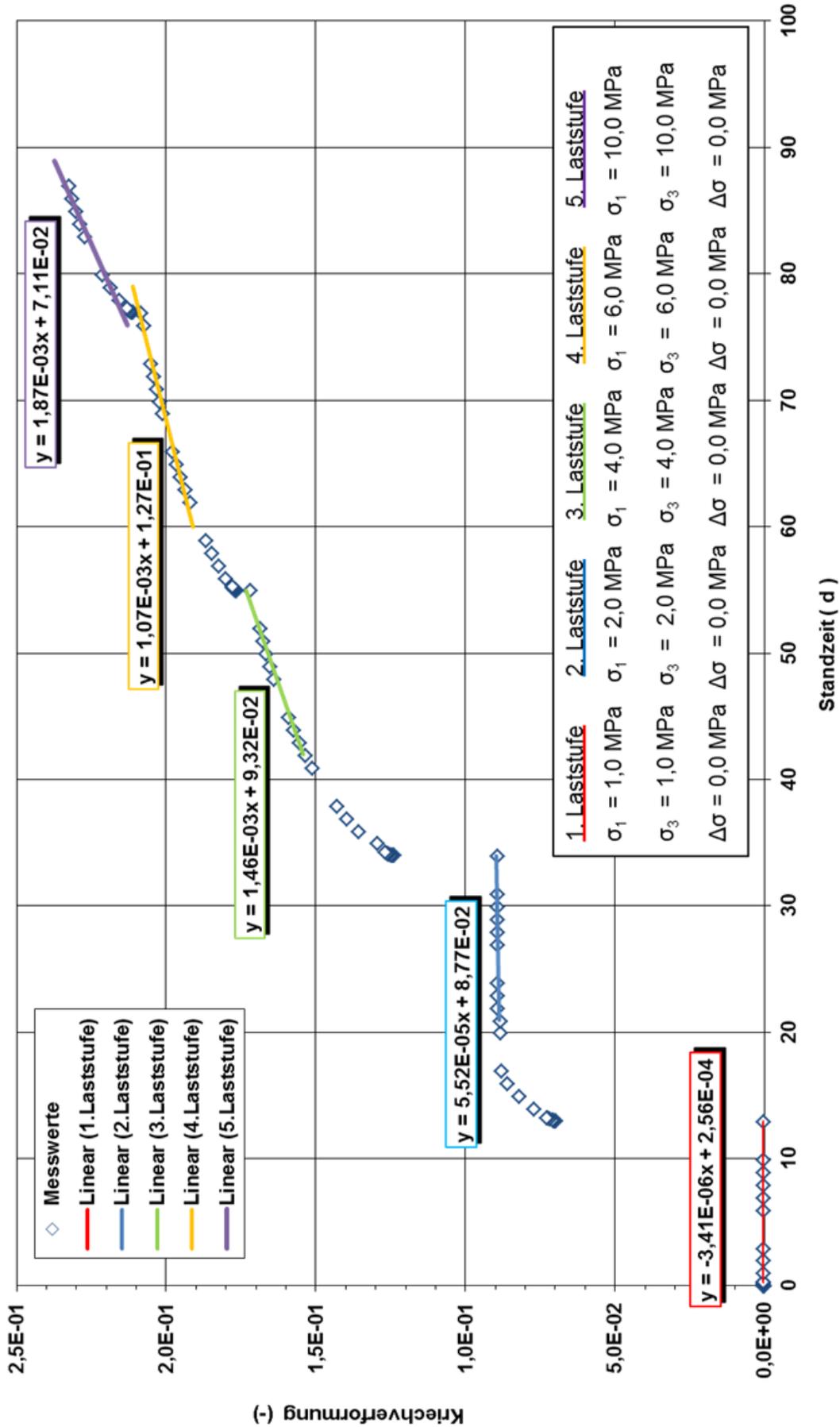
538/TCC 1



538/TCC2



538/TCC4



538/TCC5

