

## Abschlussbericht

# Entwicklung eines salzgrusbasierten Versatzkonzepts unter der Option Rückholbarkeit

## Phase I

FKZ: 02E11961

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

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Louis Schaarschmidt  
Dr. rer. nat. Daniela Freyer  
Dr. rer. nat. Iris Paschke  
Dr. rer. nat. Till Popp

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

BETREUT VOM



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

---

Freiberg, 29.07.2024

**Folgende Partner waren am Forschungsvorhaben beteiligt:**

**TU Bergakademie Freiberg:**



Professur für Rohstoffabbau und Spezialverfahren unter Tage am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (Federführung, Labor und -in situ-Versuche)

Institut für Anorganische Chemie (Geochemische Begleitung und Laborversuche)

**Auftragnehmer:**

Institut für Gebirgsmechanik GmbH (In-situ-Messungen)



GSES mbH (in-situ-Versuche)



**Materialbezug:**

GSES mbH (Salzgrus)

K+S Minerals and Agriculture GmbH (Kieserit)

Leuna Carboxylation Plant GmbH (Kaliumsulfat)

Knauf Gips KG (Calciumsulfat-Halbhydrat)

DEUSA International GmbH (Magnesiumchlorid-Lösung)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen 02E11961 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Inhaltsverzeichnis.....  | I    |
| Abbildungsverzeichnis.....                                     | IV   |
| Tabellenverzeichnis.....                                       | VII  |
| Symbolverzeichnis .....  | VIII |
| Abkürzungsverzeichnis.....                                     | X    |
| Kurzfassung .....  | XI   |
| Abstract.....  | XII  |
| 1. Einleitung .....  | 1    |
| 2. Zielstellung und Arbeitsprogramm .....                      | 3    |
| 3. Technische Grundlagen .....                                 | 6    |
| 3.1. Konzepte der Endlagerung.....                             | 6    |
| 3.2. Versatzmaterialien.....                                   | 7    |
| 3.3. Durchgeführte Forschungsprojekte .....                    | 10   |
| 4. Kooperation mit dem Projekt „KOMPASS“ .....                 | 14   |
| 5. Untertägige Versuchsreihe .....                             | 15   |
| 5.1. Standort .....  | 15   |
| 5.2. Versuchsorte .....  | 17   |
| 5.2.1. Lage im Bergwerk .....                                  | 17   |
| 5.2.2. Geometrie und Aufbau der Versuchsorte .....             | 18   |
| 5.2.3. Vermessung der Versuchsorte .....                       | 22   |
| 5.3. Gebirgsmechanische Situation – Spannungssondierungen..... | 25   |
| 5.4. Konvergenz.....   | 28   |
| 5.5. Verwendete Versatzmaterialien.....                        | 29   |
| 5.5.1. GESAV-Material.....                                     | 29   |
| 5.5.2. KOMPASS-Material.....                                   | 32   |
| 5.5.3. Trockener Salzgrus .....                                | 33   |
| 5.6. Versatzkörperaufbau und Versuchsdimensionierung.....      | 34   |
| 5.6.1. Versatzkörper aus GESAV-Material .....                  | 35   |
| 5.6.2. Versatzkörper aus KOMPASS-Material.....                 | 36   |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 5.7.     | Entwicklung Behälterattrappe .....             | 37 |
| 5.8.     | Messkonzept .....                              | 41 |
| 5.8.1.   | Sensorverteilung .....                         | 43 |
| 5.8.2.   | Kalibrierung .....                             | 45 |
| 5.9.     | In-Situ-Probenkampagne .....                   | 46 |
| 5.10.    | Untersuchte Parameter .....                    | 47 |
| 5.10.1.  | Setzung .....                                  | 47 |
| 5.10.2.  | Temperatur .....                               | 48 |
| 5.10.3.  | Feuchtigkeit .....                             | 48 |
| 5.10.4.  | Druck .....                                    | 49 |
| 5.10.5.  | Phasenbestand Salzbinder .....                 | 50 |
| 5.10.6.  | Verfüllungsgrad .....                          | 50 |
| 5.10.7.  | Versatzfaktor .....                            | 51 |
| 5.10.8.  | Konvergenz .....                               | 51 |
| 5.10.9.  | Grubenklima .....                              | 51 |
| 5.10.10. | Einbaudichte .....                             | 52 |
| 5.10.11. | Korngrößenverteilung .....                     | 52 |
| 5.10.12. | Böschungswinkel .....                          | 53 |
| 5.11.    | Qualitätssicherung .....                       | 54 |
| 5.12.    | Einbauablauf KOMPASS-Versatzkörper .....       | 54 |
| 5.13.    | Einbauablauf GESAV-Versatzkörper .....         | 61 |
| 6.       | Auswertung der untertägigen Großversuche ..... | 65 |
| 6.1.     | Setzung .....                                  | 65 |
| 6.1.1.   | GESAV-Bauwerk .....                            | 65 |
| 6.2.     | Temperatur .....                               | 67 |
| 6.2.1.   | GESAV-Bauwerk .....                            | 67 |
| 6.2.2.   | KOMPASS-Bauwerk .....                          | 68 |
| 6.3.     | Feuchtigkeit .....                             | 69 |
| 6.3.1.   | GESAV-Bauwerk .....                            | 69 |
| 6.3.2.   | KOMPASS-Bauwerk .....                          | 70 |
| 6.4.     | Druck .....                                    | 72 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 6.4.1.  | Druckentwicklung im GESAV-Bauwerk .....                     | 72 |
| 6.4.2.  | Druckentwicklung im KOMPASS-Versatzkörper .....             | 73 |
| 6.5.    | Entwicklung des Phasenbestandes .....                       | 74 |
| 6.6.    | Verfüllungsgrad .....                                       | 77 |
| 6.7.    | Versatzfaktor .....   | 79 |
| 6.8.    | Spannungssituation .....                                    | 79 |
| 6.9.    | Konvergenz .....  | 81 |
| 6.10.   | Einbaudichte .....  | 81 |
| 6.11.   | Korngrößenverteilung .....                                  | 83 |
| 6.12.   | Böschungswinkel .....                                       | 84 |
| 6.13.   | Erfahrungen und Optimierungen beim Einbau .....             | 84 |
| 6.13.1. | Messtechnik .....   | 84 |
| 6.13.2. | Materialbeschaffung .....                                   | 85 |
| 6.13.3. | Mischprozess .....  | 85 |
| 6.13.4. | Einbau .....  | 85 |
| 7.      | Laborprogramm .....   | 87 |
| 7.1.    | Qualitätssicherung .....                                    | 87 |
| 7.1.1.  | Chemisch .....  | 87 |
| 7.1.2.  | Siebanalyse .....   | 91 |
| 7.2.    | Validierungsexperimente .....                               | 92 |
| 8.      | Zusammenfassung .....                                       | 94 |
| 9.      | Weiterer FuE-Bedarf und Ausblick auf SAVER-II-Projekt ..... | 95 |
| 10.     | Literaturverzeichnis .....                                  | 96 |

# Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Versatzmaterialien in Abhängigkeit von Teilbereichen [5], modifiziert nach T. Popp [6].....                            | 8  |
| Abbildung 2: Teststrecken im FuE-Projekt TSS [12].....  | 11 |
| Abbildung 3: Geographische Lage des Bergwerks "Glückauf" [14].....  | 15 |
| Abbildung 4: Geologische Schichtenabfolge im Bergwerk "Glückauf" [12].....  | 16 |
| Abbildung 5: Übersichtsriß der untertägigen Versuchsorte [2] (nach Unterlagen der GSES) .....                                       | 17 |
| Abbildung 6: Verlängerter Querschlag mit bereits eingebauter Vorrichtung zur Durchströmungsmessung (Foto Autor).....                | 19 |
| Abbildung 7: Einlagerungskonzept aus dem GENESIS-Projekt für die Lagerung in Tonsteinformationen [16].....                          | 19 |
| Abbildung 8: Typenschild der verwendeten Firstfräse (Foto Autor).....   | 20 |
| Abbildung 9: Dimensionen des Fräskopfes (Foto Autor).....   | 20 |
| Abbildung 10: Feinarbeiten an der Grabenkontur um Radien anzugleichen (Foto Autor).....   | 21 |
| Abbildung 11: Herstellung des Grabens (Foto Autor) .....  | 21 |
| Abbildung 12: Komponenten des ZEB-REVO Handscanners [17].....   | 22 |
| Abbildung 13: Mit Handscanner erfasster GESAV Querschnitt 1 (Darstellung mit CloudCompare).....                                     | 23 |
| Abbildung 14: Mit Handscanner erfasster GESAV Querschnitt in seitlicher Ansicht (Darstellung mit CloudCompare) .....                | 23 |
| Abbildung 15: Mit Handscanner erfasster KOMPASS Querschnitt (Darstellung mit CloudCompare).....                                     | 24 |
| Abbildung 16: Mit Handscanner erfasster KOMPASS Querschnitt in seitlicher Ansicht (Darstellung mit CloudCompare) .....              | 24 |
| Abbildung 17: Lage und Situation der Spannungssondierbohrungen im Versuchsfeld (Unterlagen GSES, Fotos IfG) .....                   | 25 |
| Abbildung 18: Typischer Ablauf einer Spannungssondierung: Strecke HU Versuchsort – 4 - HF-Bohrung B1 - Bohrlochtiefe = 15,00 m..... | 27 |
| Abbildung 19: Aufnahme von GESAV-Material unter Rasterelektronenmikroskop [18].....   | 31 |
| Abbildung 20: Korngrößenverteilung des KOMPASS-Referenzmaterials sowie Darstellung der einzelnen Kornfraktionen [6].....            | 32 |
| Abbildung 21: Spotpreis [US\$/t] Kali 2015 – 2024 [21] nach [22].....   | 34 |
| Abbildung 22: Querschnitt und schematischer Aufbau des GESAV-Bauwerks .....   | 35 |
| Abbildung 23: Querschnitt und schematischer Aufbau des KOMPASS-Bauwerks.....  | 36 |
| Abbildung 24: 6 m GFK-Druckrohr der Fa. HOBAS (Foto Autor) .....  | 38 |
| Abbildung 25: Wandstärke des GFK-Rohres und Querschnitt (Herstellerzeichnung).....  | 39 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 26: Zerlegen des GFK-Rohres in benötigte Stücke (Foto Jentzsch).....   | 39 |
| Abbildung 27: Aussteifung der Dummies mit Stahlspindeln (Foto Autor) .....   | 40 |
| Abbildung 28: Versiegelung des Ringraums zwischen Abdeckung und Dummy (Foto Autor)<br>.....  | 40 |
| Abbildung 29: Druckplattenaufbau auf POLLUX (Foto Autor) .....   | 43 |
| Abbildung 30: Messtechnik im GESAV-Bauwerk.....  | 44 |
| Abbildung 31: Messtechnik im KOMPASS-Bauwerk.....  | 44 |
| Abbildung 32: Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren im Labor der TUBAF (Foto Autor) ....  | 45 |
| Abbildung 33: Probenverteilung in den Bauwerken .....  | 46 |
| Abbildung 34: Probentypen 1 und 2 (rechts Realität; Foto Autor) .....  | 47 |
| Abbildung 35: Bosch GLM 80 Professional Lasermessgerät [26] .....  | 53 |
| Abbildung 36: 3-Punkt-Messung zur Bestimmung des Endböschungswinkels.....  | 53 |
| Abbildung 37: Aufhäufen der Salzgrusfraktionen zur Mischung auf Hauptstrecke (Foto Autor)<br>.....                                   | 54 |
| Abbildung 38: Mischung der Salzgrusfraktionen mit Kramer-Lader (Foto Autor).....   | 55 |
| Abbildung 39: Positionieren der QSV-Mischung für Schleudern (Foto Autor) .....   | 55 |
| Abbildung 40: Typenschild der Schleuderversatzmaschine (Foto Autor) .....  | 56 |
| Abbildung 41: Schleuderversatzmaschine in Position vor Ortsbrust (Foto Autor).....   | 56 |
| Abbildung 42: Verfüllung Ringraum um POLLUX-Dummy (Foto Autor) .....   | 57 |
| Abbildung 43: Endböschung des QSV-Bereichs in KOMPASS-Versatzkörper (Foto Autor)..   | 58 |
| Abbildung 44: Befeuchtung KOMPASS-Mischung mit Süßwasser (Foto Autor).....   | 58 |
| Abbildung 45: Erstböschung im KOMPASS-Bereich nach Rütteln (Foto Autor).....   | 59 |
| Abbildung 46: Oberflächliche Salzsollenbildung auf KOMPASS-Material (Foto Autor).....  | 60 |
| Abbildung 47: Gerissene Gummilagerung bei Vibrationsanbauplatte (Foto Autor).....  | 60 |
| Abbildung 48: Herstellung des Mischplatzes für die Mischung der Salzbinderkomponenten<br>(Foto Autor).....                           | 61 |
| Abbildung 49: Großtechnische Mischung der Salzbinderkomponenten (Foto Autor) .....   | 62 |
| Abbildung 50: Anbaumischer mit innenlaufender Mischschnecke (Foto Autor).....  | 62 |
| Abbildung 51: Typenschild des Anbaumischers (Foto Autor).....  | 63 |
| Abbildung 52: Abgefüllte Big Bags mit Salzbinderkomponenten; Markierung zur<br>Füllstandserfassung in roten Kästen (Foto Autor)..... | 63 |
| Abbildung 53: Befeuchtung mit Magnesiumchloridlösung (Foto Autor) .....  | 64 |
| Abbildung 54: Setzungen des QSV- und GESAV-Bereichs im GESAV-Bauwerk (GV03) .....  | 66 |
| Abbildung 55: Setzungen des QSV- und GESAV-Bereichs im KOMPASS-Bauwerk (GV04)  | 67 |
| Abbildung 56: Temperaturverlauf im GESAV-Versatzkörper (GV03) .....  | 68 |
| Abbildung 57: Temperaturverlauf im KOMPASS-Versatzkörper (GV04).....   | 68 |
| Abbildung 58: Feuchtigkeitsentwicklung im GESAV-Bauwerk (GV03).....  | 70 |
| Abbildung 59: Feuchtigkeitsentwicklung im KOMPASS-Bauwerk .....  | 71 |
| Abbildung 60: Entwicklung der gemessenen Druckdifferenzen im GESAV-Bauwerk (GV03)  | 73 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 61: Druckentwicklung im KOMPASS-Versatzkörper .....   | 74 |
| Abbildung 62: Ausschnitt der zeitabhängig aufgenommenen Pulverdiffraktogramme der GESAV-Versatzkörperproben (oberer, mittlerer bzw. unterer Bereich). ..... | 76 |
| Abbildung 63: Zeitabhängig aufgenommene Pulverdiffraktogramme der KOMPASS-Versatzkörperproben. ....   | 76 |
| Abbildung 64: Firstbündige Verfüllung mit GESAV-Material (Foto Autor).....  | 78 |
| Abbildung 65: Firstbündige Verfüllung mit QSV-Material (Foto Autor) .....   | 78 |
| Abbildung 66: Firstbündige Verfüllung mit KOMPASS-Material (Foto Autor) .....   | 78 |
| Abbildung 67: Verlauf der kleinsten Hauptspannung in der (gering beeinflussten) HU-Streckenkontur bzw. im Streckenpfeiler des Versuchsorts 4.....           | 79 |
| Abbildung 68: Siebanalyse von KOMPASS-Material aus verschiedenen Böschungshöhen .   | 83 |
| Abbildung 69: Pulverdiffraktogramme der K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -Proben von Leuna LCP.....   | 87 |
| Abbildung 70: Pulverdiffraktogramme der $\beta$ -Calciumhalbhydrat-Proben der Fa. Knauf. ....   | 88 |
| Abbildung 71: Pulverdiffraktogramm der Kieserit-Proben. ....  | 88 |
| Abbildung 72: Pulverdiffraktogramme der Salzgrus-Fractionen. ....   | 89 |
| Abbildung 73: Feuchtigkeitsverlauf im Validierungstest für gravitationsbedingte Feuchtigkeitsmigration.....   | 92 |
| Abbildung 74: Validierungsexperiment zur Korrelation von Feuchtigkeitszunahme und zunehmender Einbaudichte .....  | 93 |

# Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete.....  | 3  |
| Tabelle 2: Übersicht relevanter Online-Archive zum Thema HAW-Endlagerung.....                            | 10 |
| Tabelle 3: Durch 3D-Scan ermittelte zu Volumina .....  | 24 |
| Tabelle 4: Zusammensetzung GESAV-Material.....   | 30 |
| Tabelle 5: Salzbinderbildung im GESAV-Material.....  | 31 |
| Tabelle 6: Massenanteile der verschiedenen Steinsalzfraktionen im ELSA-Material [11].....                | 33 |
| Tabelle 7: Iterierte Dimensionen der POLLUX-Attrappe .....   | 38 |
| Tabelle 8: Verwendete Sensoren und Sonden .....  | 42 |
| Tabelle 9: Zeitpunkte der Probennahmen an den Versatzkörpern. ....                                       | 75 |
| Tabelle 10: Spannungskennwerte auf Basis der in den Bohrungen B1 und B2 durchgeführten HF-Messungen..... | 80 |
| Tabelle 11: Materialspezifische Einbaudichten .....  | 82 |
| Tabelle 12: Massenbilanz und Dichten der beiden Bauwerke im Gesamten.....                                | 82 |
| Tabelle 13: Qualitätskontrolle der noch vorhandenen DEUSA-Lösung .....                                   | 89 |
| Tabelle 14: Qualitätskontrolle der nachbestellen DEUSA-Lösung .....                                      | 90 |
| Tabelle 15: Vergleich der Sieblinien 2020 vs. 2022 (Grau Linien = Fullerkurven n=0,2; n=0,3)<br>.....    | 91 |

# Symbolverzeichnis

| Symbol                 | Bezeichnung                             | Einheit                             |
|------------------------|---|-------------------------------------|
| a                      | Versatzfaktor                           | [-]                                 |
| A                      | Querschnittsfläche                      | [m <sup>2</sup> ]                   |
| A <sub>Pr</sub>        | Probenquerschnitt                       | [m <sup>2</sup> ]                   |
| c                      | Kohäsion                                | [N/mm <sup>2</sup> ]                |
| d'                     | Dichtegrad                              | [-]                                 |
| E <sub>kin, Korn</sub> | Kinetische Energie des Einzelkorns      | [J]                                 |
| g                      | Erdbeschleunigung                       | [m/s <sup>2</sup> ]                 |
| h <sub>VK</sub>        | Höhe des Versatzkörpers                 | [m]                                 |
| h <sub>VK0</sub>       | Ausgangshöhe des Versatzkörpers         | [m]                                 |
| h <sub>VR</sub>        | Höhe des Versatzraums                   | [m]                                 |
| k                      | Permeabilität                           | [m <sup>2</sup> ]                   |
| k <sub>0</sub>         | Intrinsische Permeabilität bei $\Phi_0$ | [m <sup>2</sup> ]                   |
| l                      | Länge der Probe                         | [m]                                 |
| l <sub>Pr</sub>        | Probenlänge                             | [m]                                 |
| m <sub>gem</sub>       | Gemessene Masse                         | [t <sub>gem</sub> ]                 |
| m <sub>Korn</sub>      | Kornmasse                               | [kg]                                |
| m <sub>Lösung</sub>    | Masse der Lösung                        | [t <sub>Lösung</sub> ]              |
| m <sub>PK, b</sub>     | Masse des behandelten Probekörpers      | [kg]                                |
| m <sub>PK, u</sub>     | Masse des unbehandelten Probekörpers    | [kg]                                |
| m <sub>Pr, f</sub>     | Masse der feuchten Probe                | [t <sub>Lösung</sub> ]              |
| m <sub>Pr, t</sub>     | Masse der getrockneten Probe            | [t <sub>gem</sub> ]                 |
| m <sub>PW</sub>        | Gewicht des Probekörpers in Wasser      | [kg]                                |
| P                      | Druck                                   | [Pa <sup>2</sup> ]                  |
| p <sub>0</sub>         | Druck bei Gasdurchflussmessung          | [Pa]                                |
| p <sub>1</sub>         | Druck primärseitig                      | [Pa]                                |
| p <sub>2</sub>         | Druck sekundärseitig                    | [Pa]                                |
| p <sub>o</sub>         | Druck bei Durchflussmessung             | [Pa]                                |
| q <sub>0</sub>         | Flussrate unter Normaldruck             | [m <sup>3</sup> /s]                 |
| q <sub>0</sub>         | Flussrate unter Normaldruck             | [m <sup>3</sup> /s]                 |
| S                      | Setzung                                 | [%]                                 |
| v                      | Volumen                                 | [m <sup>3</sup> ]                   |
| v <sub>Austrag</sub>   | Korngeschwindigkeit am Düsenaustrag     | [m/s]                               |
| V <sub>F</sub>         | Volumen Flüssigkeit                     | [m <sup>3</sup> <sub>Lösung</sub> ] |
| V <sub>G</sub>         | Verfüllungsgrad                         | [-]                                 |
| V <sub>gem</sub>       | Gemessenes Volumen                      | [m <sup>3</sup> <sub>gem</sub> ]    |
| V <sub>PK</sub>        | Volumen des Probekörpers                | [m <sup>3</sup> ]                   |

|                 |                                     |   |
|-----------------|-------------------------------------|---|
| $V_{VK}$        | Volumen des Versatzkörpers          | [m <sup>3</sup> ]   |
| $V_{VR}$        | Volumen des Versatzraums            | [m <sup>3</sup> ]   |
| $\Delta h$      | Höhenreduzierung des Versatzkörpers | [m]   |
| $\eta$          | Dynamische Viskosität               | [Pa·s]  |
| $\eta$          | dynamische Viskosität               | [Pa · s]  |
| $\Theta_m$      | Massenbezogene Feuchte              | [t <sub>Lösung</sub> /t <sub>gemessen</sub> ]                           |
| $\Theta_m$      | Massenbezogene Feuchte              | [t <sub>Lösung</sub> /t <sub>gemessen</sub> ]                           |
| $\Theta_V$      | Volumetrische Feuchte               | [m <sup>3</sup> <sub>Lösung</sub> /m <sup>3</sup> <sub>gemessen</sub> ] |
| $\rho_E$        | Einbaudichte                        | [g/cm <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_L$        | Dichte der Latexfarbe               | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_{Lösung}$ | Dichte der Lösung                   | [t <sub>Lösung</sub> /m <sup>3</sup> ]                                  |
| $\rho_S$        | Korndichte                          | [g/cm <sup>3</sup> ]  |
| $\rho_W$        | Dichte von Wasser                   | [kg/m <sup>3</sup> ]  |
| $\sigma_n$      | Normalspannung                      | [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| $\sigma_{V1}$   | Vertikalspannung                    | [Pa]  |
| $T_{res}$       | Schubspannung                       | [N/mm <sup>2</sup> ]  |
| $\varphi$       | Reibungswinkel                      | [°]   |
| $\phi$          | Porosität                           | [%]   |
| $\Phi_0$        | Referenzporosität                   | [-]   |

# Abkürzungsverzeichnis

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>                       |
|------------------|--|
| FuE              | Forschung und Entwicklung              |
| GESAV            | Gefügestabilisierter Salzgrusversatz   |
| GSF              | Gesellschaft für Strahlenforschung mbH |
| GV               | Großversuch                            |
| HAW              | High active waste                      |
| KG-Rohr          | Kanalgrundrohr                         |
| KGV              | Korngrößenverteilung                   |
| MTS              | Material Testing System                |
| P-XRD            | Röntgenpulverdiffraktometrie           |
| UC               | Einaxiale Druckversuche                |
| QSV              | Qualifizierter Salzgrusversatz         |

# Kurzfassung

Das vom BMUV finanzierte SAVER I - Projekt (Entwicklung eines Salzgrusbasierten Versatzkonzepts unter der Option Rückholbarkeit) wurde im Zeitraum vom 01.07.2021 bis 31.10.2023 durchgeführt.

Grundlegende Ziele des Projektes waren die Herstellung zweier untertägiger vollinstrumentierter Versatzkörper aus angefeuchtetem, qualifiziert eingebrachtem Salzgrus und sogenanntem GESAV-Material im Steinsalzbergwerk der GSES Beteiligungs GmbH in Sondershausen. Dies wurde erfolgreich ausgeführt unter Verwendung der im GESAV-II-Projekt entwickelten Kombinationsmethode aus Schleuderversatz mit anschließender Vibrationsverdichtung.

Als Material für den angefeuchteten Salzgrus wurde das KOMPASS-Referenzmaterial aus dem gleichnamigen Partnerprojekt genutzt. Das weiterhin verwendete GESAV-Material ist ein hinsichtlich seines Korngefüges (durch Zugabe von Bindemittel) sogenannter matrixstabilisierter und im salinaren Milieu langzeitstabiler Salzgrus, welcher sich in den ersten Tagen nach Einbau bereits durch die Bildung von intergranularen Salzbrücken stabilisiert. Vorläufige Untersuchungen ergaben eine realisierte Einbaudichte von  $1,62 \text{ t/m}^3$  beim KOMPASS-Referenzmaterial und  $1,5 \text{ t/m}^3$  für das GESAV-Material. Insgesamt wurden ca. 550 t Material versetzt.

Zur Steigerung des Realitätsgrades der Versuche und für spätere Untersuchungen zur Rückholbarkeit hat die TU Bergakademie Freiberg im Projekt eine POLLUX-Endlager-Behälter-Attrappe im Maßstab 1 : 1 entwickelt, welche in beiden Bauwerken verbaut wurde. Die Verwendung von befeuchteten Salzgrus in Einlagerungsbereichen wurde bisher wegen einer möglichen Migration von Feuchtigkeit in Richtung der Einlagerungsbehälter wegen der dadurch erhöhten Korrosion als kritisch angesehen. Durch die Verwendung verschiedener Salzgrusmischungen, welche gegenseitige Kontaktzonen hatten, konnte über die Instrumentierung der Versatzkörper im Betrachtungszeitraum nachweislich keine Fluidmigration in Richtung der POLLUX-Attrappen festgestellt werden, die eine Eignung der Materialien im Nahbereich zu Einlagerungsfeldern ausschließen würde. Die enge messtechnische Überwachung der Bauwerke validierte die in GESAV-II erhaltenen Messwerte und ermöglichte erstmals einen Erkenntnisgewinn über Materialverhalten des KOMPASS-Referenzmaterials unter großtechnischen In-Situ-Bedingungen.

Das geochemische Monitoring wurden parallel zur messtechnischen Überwachung ebenfalls in 4-wöchigen Intervallen durchgeführt und hat gezeigt, dass die Bildung des Polyhalits beim GESAV-Material bereits nach 8 Monaten abgeschlossen ist und nicht wie bisher angenommen nach 10 Monaten.

Das Projekt wird ab dem 01.11.2023 mit dem Folgeprojekt SAVER II fortgesetzt.

# Abstract

The SAVER project (Development of a matrix-stabilized backfill concept with respect to container retrievability) has been carried out at the Technische Universität Bergakademie Freiberg (TUBAF) between 1<sup>st</sup> July 2021 and 31<sup>st</sup> October 2023.

Fundamental goals of the project were the construction of two big-scale backfill bodies in the rock salt underground mine of the GSES Beteiligungs GmbH in Sondershausen (Thuringia, Germany). This has been successfully accomplished and it has been proven that the in the GESAV-II-project developed backfilling method can be applied to moist salt grit as well. The method utilizes conventional slinger backfill with a downstream application of a vibration plate to increase material density further.

The applied materials within the project are on the one hand conventional moist salt grit (KOMPASS reference material) with 1 M.-% moisture and on the other hand matrix-stabilized backfill (GESAV-Materia). GESAV material has been developed at the TUBAF and stabilizes already approximately 24 hours after building in by the formation of salt bridges between the grains. For the KOMPASS-material preliminary tests have shown a reached in-situ built-in density of 1.62 t/m<sup>3</sup> and for the GESAV-material 1.5 t/m<sup>3</sup>. In total, approximately 550 t of material has been backfilled in the project.

In order to increase the degree of reality a POLLUX high-level-waste container dummy was developed by TUBAF and implemented into each backfill body.

By applying different backfill materials, that also share contact zones, it could be proven that no fluid migration towards the container dummy occurred within the timeframe of the project.

With the implemented measuring setup, it was possible to further validate data derived in the GESAV-II-project. Moreover, a tighter geochemical sampling campaign highlighted that the previously presumed timeframe of 10 months in order for the polyhalite to fully develop is actually just 8 months.

The project will be succeeded by the SAVER II project that will be kicked off at 1<sup>st</sup> November 2023.

# 1. Einleitung

Aufgrund der kommerziellen Nutzung der Atomenergie sind weltweit in der Vergangenheit nicht unerhebliche Mengen von unterschiedlichen radioaktiven Abfällen (schwachradioaktive Abfälle (LAW), mittelradioaktive Abfälle (MAW) und hochradioaktive Abfälle (HAW)) entstanden, die dauerhaft sicher gelagert werden müssen. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle fallen vor allem beim Betrieb und Rückbau von Kernkraftwerken an, können aber auch aus Forschungseinrichtungen, der Industrie oder in geringen Mengen aus der Medizin stammen. Bei hochradioaktiven Abfällen handelt es sich vornehmlich um genutzte Kernbrennstoffe aus den Atomkraftwerken und aus der Wiederaufarbeitung. Nach aktuellem Stand von Wissenschaft und Technik kann nur die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen dem Ziel dienen, diese Abfälle langfristig und sicher aus unserem Lebensraum zu entfernen.

Da jedes EU-Land ein eigenes Konzept vorlegen muss<sup>1</sup>, hat auch die Bundesrepublik Deutschland die Aufgabe ein suffizientes Endlagerkonzept für radioaktive Abfälle zu erstellen. Eine grundlegende Frage ist dabei die nach einem geeigneten Wirtsgestein, insbesondere für die Endlagerung der wärmeentwickelnden HAW-Abfälle. Während für die LAW- und MAW-Abfälle mit dem Standort Konrad ein Endlager in der Vorbereitung ist, wurden im Jahr 2017 mit dem Standortauswahlgesetz (STandAG) drei Optionen definiert, die für ein zu errichtendes tiefes geologisches Endlager geeignet sind. Diese umfassen kristalline Formationen (z. B. Granit), Tonstein- sowie Steinsalzformationen. Ziel ist es die hochradioaktiven Abfälle (HAW, engl.: High-active waste) in geeigneten Behältern in bergmännisch hergestellten untertägigen Einlagerungsstrecken (und/oder Bohrlöchern) dauerhaft sicher einzulagern. Dafür ist jeweils ein wirtsgesteins-spezifisches geotechnisches Sicherungskonzept zu entwickeln, das durch das Zusammenwirken der vorhandenen geologischen Barrieren mit geotechnischen Bauwerken sicherstellt, dass ein robustes, gestaffeltes Barrieren-System um die Gebirgsbereiche vorliegt, in denen die Abfälle eingelagert sind. Dies bildet den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG).

Salzgesteine und vor allem Steinsalz, das hier als potenzielles Wirtsgestein im Fokus steht, bieten aufgrund ihrer günstigen Wirtsgesteinseigenschaften (u.a. hydraulische Dichtheit, Plastizität) hervorragende Voraussetzungen für den sicheren Einschluss von radioaktiven Abfällen in einer Salzstruktur mit Konzentration der Nuklide am Ort der Einlagerung. Als wichtiges Element des Sicherungskonzepts sind die erstellten Hohlräume nach bzw. bereits während des

---

<sup>1</sup> Mit der Europäischen Richtlinie 2011/70/Euratom des Rates der Europäischen Union wurde ein Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle geschaffen, um zu vermeiden, dass künftigen Generationen unangemessene Lasten aufgebürdet werden. Diese Europäische Richtlinie sieht vor, dass die in einem Mitgliedstaat anfallenden abgebrannten Brennelemente und radioaktiven Abfälle auch auf dessen Hoheitsgebiet sicher und umweltgerecht zu entsorgen sind.

Abschlusses der Einlagerung, u. a. zur Wiederherstellung der geologischen Barrierefunktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, zu verfüllen (versetzen). Abhängig vom Sicherungskonzept ergeben sich unterschiedliche Versatzziele, u.a. möglichst vollständige Hohlraumverfüllung, Reduzierung konvergenzbedingter Schädigungsprozesse in der Kontur, Verzögerung der Freisetzung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen). In der Konsequenz werden zur Erreichung der daraus resultierenden Versatzziele verschiedene Anforderungen an das Versatzmaterial und den Versatzkörper (z.B. möglichst vollständiger Hohlraumverfüllung mit Material geringer Porosität, ausreichender Tragwiderstand, Dichtheit gegenüber Fluidmigration) gestellt.

Mehrere Institute an der TU Bergakademie Freiberg (TUBAF) beschäftigen sich seit vielen Jahren mit einem breiten Spektrum an Fragen bezüglich Endlagerungs- und Verschlusskonzepten sowie darin eingesetzten Baustoffen. Am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau ist insbesondere der Aspekt der Verfüllung ein Schwerpunkt der Forschung. Durch umfassende Erfahrungen zum Thema des bergmännischen Versetzens von Hohlräumen fiel der Fokus auf die Optimierung der Streckenverfüllung. Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsprojekte „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Phase 1“ (GESAV I) [1] und „Gefügestabilisierter Salzgrusversatz – Phase 2“ (GESAV II) [2] wurde ein neuartiger matrixstabilisierender Salzgrus entwickelt und im Labor sowie untertägigen Großversuchen auf seine Eignung untersucht sowie patentiert. Dieses sogenannte GESAV-Material kennzeichnet sich insbesondere durch seine schnelle Lastaufnahme, einfache Verarbeitbarkeit, guten Rückbaueigenschaften sowie geringe Setzung aus. Dadurch kann die Spaltbildung zwischen Firste und Versatzkörper signifikant reduziert werden.

Die in GESAV II gegenüber dem einfachen Salzgrus festgestellten günstigeren Versatzeigenschaften und die gegenüber früheren Verfahren optimierte Versatztechnologie war Anlass für weiterführende Forschung zum praktischen Einsatz des GESAV-Materials. Das grundlegende Ziel für das Projekt SAVER Phase I war der Vergleich von herkömmlichen angefeuchteten Salzgrus zu GESAV-Material unter Verwendung der Versatzmethode aus GESAV II. Hierfür wurden neben Laboruntersuchungen zwei untertägige Großversuchsstände errichtet, welche ein Vielfaches der Größe der Versuchskörper aus GESAV II aufwiesen und damit dazu beitragen, Skalierungseffekte zu vermeiden. Die Errichtung dieser erfolgte im Steinsalzbergwerk der Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES), um gleiche Umgebungsbedingungen sowie Maschinen sichern zu können. Die Ergebnisse der In-Situ- und Laboruntersuchungen werden in diesem Bericht vorgestellt.

## 2. Zielstellung und Arbeitsprogramm

Für das FuE-Vorhaben SAVER I wurden drei wesentliche Arbeitspakete mit entsprechenden Teilpaketen definiert (Tabelle 1), welche in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert werden.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitspakete

|            |   |
|------------|---|
| <b>AP1</b> | <b>Versuchskonzeption</b>   |
| AP1.1      | Messkonzept für ein Langzeitmonitoring  |
| AP1.2      | Vorbereitung der großtechnischen Realisierung in der Grube Sondershausen                          |
| AP1.3      | Entwicklung einer geeigneten Behälterattrappe   |
| <b>AP2</b> | <b>Geochemie</b>  |
| AP2.1      | Qualitätssicherungssystem für die Ausgangsmaterialien   |
| AP2.2      | Verbesserung der Rezeptur des GESAV-Materials hinsichtlich einer möglichen geringeren Restfeuchte |
| <b>AP3</b> | <b>Untertageversuche</b>  |
| AP3.1      | Versatzkörper aus angefeuchteten Salzgrus (Referenzmaterial zu Vorhaben KOMPASS)                  |
| AP3.2      | Versatzkörper aus verbessertem GESAV-Material   |

Ziel von AP1 ist, die im FuE-Projekt GESAV II gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse zur messtechnischen Instrumentierung von Versatzkörpern hinsichtlich eines Langzeitmonitoring fortzuschreiben. Dazu soll insbesondere die Anordnung von Messinstrumenten im Versatzkörper für die Gewinnung von Messwerten für eine modelltechnische Prognose als Vorbereitung für SAVER – Phase 2 bestimmt werden.

Des Weiteren soll die aus dem FuE-Projekt GESAV II abgeleitete Vorzugsvariante zum Einbau in Zusammenarbeit mit der GSES zur Vorbereitung von AP3 großtechnisch realisiert werden.

Zusätzlich soll ein monolithischer/technischer Körper, welcher z. B. eine Behälterattrappe darstellen kann, entwickelt werden. Im Rahmen von AP1 wird dessen optimale Position für den

monolithischen/technischen Körper im zu erstellenden Versatzkörper bestimmt, um diese in AP3 zu realisieren. Voraussetzung dabei ist, dass keine anderen Vorgänge bzw. Vorhabensziele durch den Einbau des monolithischen/technischen Körpers beeinträchtigt werden.

Das Arbeitspaket 1 unterteilt sich dabei inhaltlich in die folgenden Arbeitsschritte:

- AP1.1 Messkonzept für ein Langzeitmonitoring
- AP1.2 Vorbereitung der großtechnischen Realisierung in der Grube Sondershausen
- AP1.3 Entwicklung einer geeigneten Behälterattrappe

Das geochemische Monitoring des Versatzes beginnt bei der Qualitätssicherung der Ausgangsmaterialien und setzt sich während des Einbaus sowie zeitabhängig nach dem Einbau aus Untersuchungen zur Phasenbestandsentwicklung des Salzbinders im Salzgrus fort. Damit im Zusammenhang steht der Nachweis, dass der Prozess der Polyhalitbildung (bewirkt Setzungsstabilität inkl. aller bisher belegten mechanischen Eigenschaften) nicht durch Randbedingungen bei der großtechnischen Umsetzung beeinflusst wird. Der mit angefeuchtetem Salzgrus erstellte Versatzkörper unterliegt demselben geochemischen Monitoring-Programm.

Zum Zeitpunkt der Antragstellung von SAVER Phase 1 (Juni/Juli 2020) deutete sich die Notwendigkeit zur Optimierung der Salzbinderrezeptur des GESAV-Materials an, da in den röntgenographischen Messungen zur Verfolgung der Entwicklung des Salzbinderphasenbestandes (Polyhalitbildung) von den drei Ausgangssalzen das Calciumsulfat-Halbhydrat nach Monaten immer noch neben kristallisiertem Polyhalit vorlag. Im Rahmen eines begleitenden Laborprogramms sollte daher untersucht werden, ob die Rezeptur durch Veränderung der Salzanteile im Trockenbinderansatz zum Abbau des Halbhydrat bzw. Erhöhung der Polyhalitbildung führen könnte, was auch eine weitere Festigkeitszunahme, ggf. auch eine weitere Reduzierung der schon geringen Restfeuchte bewirken könnte.

Im Zuge der GESAV-II-Verlängerung (09/2020 – 04/2021) hat sich allerdings mit dem weiteren Monitoring an den Versatzkörpern gezeigt, dass sich das  $\text{CaSO}_4$ -Halbhydrat nach maximal einem dreiviertel Jahr vollständig unter Polyhalitbildung umsetzt. Eine Anpassung bzw. Verbesserung der GESAV-Rezeptur war dahingehend nicht mehr notwendig. Die Rezeptur weist bereits die optimale Zusammensetzung auf, da nun auch nachweislich alle Ausgangskomponenten vollständig zu Polyhalit kristallisieren.

Die einzelnen Arbeitsschritte im Arbeitspaket 2 unterteilen sich in die folgenden Schritte:

- AP2.1 Qualitätssicherungssystem für die Ausgangsmaterialien

Im Rahmen der Untertage-Versuche in der Grube „Glückauf“ Sondershausen sollen zwei Versatzkörper aus verschiedenen Versatzmaterialien errichtet werden. Dabei soll nachgewiesen werden, dass Versatzkörper unter Anwendung von Verfahren und Materialien nach dem Stand von Wissenschaft und Technik errichtet werden können. Insbesondere soll untersucht werden, welchen Einfluss die nachgewiesene frühzeitige Stabilisierung des GESAV-Materials auf die Errichtungsgeschwindigkeit eines Versatzkörpers im Realmaßstab hat (zeitliche Abfolge der Vorgänge: Versetzen eines Abschnitts – Nachversetzen nach erfolgter Setzung – Versetzen des nächsten Abschnitts). Zum Vergleich soll die Errichtungsgeschwindigkeit und Qualität von Versatzkörpern aus angefeuchtetem Salzgrus untersucht werden, um die vermuteten längeren Setzungsvorgänge messen und quantifizieren zu können (Analyse der zeitabhängigen geometrischen Eigenschaften).

Das Arbeitspaket 3 unterteilt sich in die folgenden beiden Arbeitsschritte:

- AP3.1 Versatzkörper aus angefeuchteten Salzgrus (Referenzmaterial zu Vorhaben KOMPASS)
- AP3.2 Versatzkörper aus verbessertem GESAV-Material

## 3. Technische Grundlagen

Die technischen Grundlagen zur Endlagerung hochradioaktiver wärmeentwickelnder Abfälle sollen in den folgenden Abschnitten nochmals in kurzer Form dargestellt werden. Für genauere Ausführungen wird an dieser Stelle auf den GESAV-II-Abschlussbericht [2] verwiesen, in dem die theoretischen Grundlagen umfangreicher dargestellt wurden.

### 3.1. Konzepte der Endlagerung

In Endlager-Konzepten für die Entsorgung von hochradioaktivem wärmeerzeugendem Abfall in Salzformationen ist das Wirtsgestein Steinsalz, in dem das Endlager errichtet wird, die wichtigste geologische Barriere. Aufgrund der Plastizität und Selbstheilungseigenschaften von Steinsalz sollen aufgefahrene Hohlräume möglichst schnell versetzt werden, womit bereits während der Betriebszeit potenzielle Fließwege für Flüssigkeiten oder Gase unter dem Einfluss des lithostatischen Drucks zeitlich geschlossen werden. Dieser Prozess wird bei höheren Temperaturen beschleunigt. Um die sehr geringe Durchlässigkeit des Wirtsgesteins aufrechtzuerhalten, ist es wichtig, eine mechanische Schädigung und Entfestigung des angrenzenden Konturbereichs im umliegenden Gebirgsbereich zu vermeiden. Daher ist eine gleichmäßige Konvergenz der untertägigen Hohlräume mit Aufkriechen des Gebirges notwendig. Dies wird erreicht durch die frühestmögliche Verfüllung der untertägigen Grubenbaue mit geeignetem Material, was im Bergbau als „Versetzen“ bezeichnet wird. Das Versatzmaterial soll als Widerlager gegen das kriechende Salzgebirge wirken und wird im Laufe der Zeit durch die Konvergenz kompaktiert, so dass die Permeabilität des Versatzkörpers irgendwann der des umliegenden Gebirges entspricht. Zusätzlich zu den stabilisierenden und versiegelnden Funktionen hat das Versatzmaterial die Aufgabe die Zerfallswärme des hochradioaktiven Abfalls von den Abfallbehältern auf das Wirtsgestein zu übertragen.

Ein abschließendes Einlagerungskonzept für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle im Steinsalz als Wirtsgestein, das u.a. konkrete Einlagerungsbehälter sowie Einlagerungstechnologien mit Dimensionierung und Anordnung der Einlagerungsbereiche beinhaltet, existiert bis dato noch nicht. Der wissenschaftliche Konsens zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts sieht jedoch die Verwendung verschiedener Materialien für die Verfüllung der untertägigen Strecken und Schächte vor, die für generische Konzepte verwendet werden können.

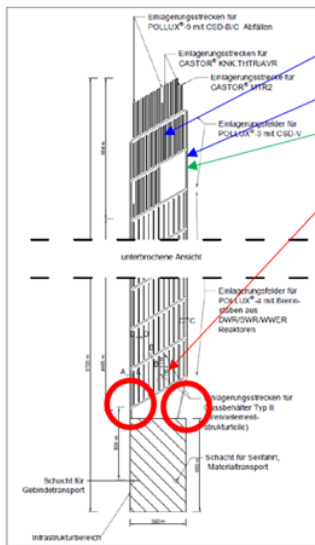
Im Zuge der vorläufigen Standortanalyse ehemals geplante Endlager „Gorleben“ (VSG) wurden zahlreiche mögliche bergbauliche und einlagerungstechnologische Konzepte analysiert. In der Veröffentlichung des Abschlussberichtes kristallisierte sich heraus, dass eine mögliche

Option (neben Bohrlochlagerung) der Transport und die Lagerung der Brennelemente in POLLUX-Behältern ist, welche in den Einlagerungsstrecken abgelegt und anschließend versetzt werden. Auf Grund der hohen Masse von 65 t der POLLUX-Behälter war ein gleisgebundener Transport vorgesehen [3]. Aktuelle Forschungsvorhaben nehmen teilweise eine Neubewertung des Themas vor, aufgrund z.B. von Fortschritten in der Entwicklung von Reifentechnik, die möglicherweise Transportsysteme mit einer flexibleren Einlagerungstechnologie ermöglichen [4]. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass durch kontinuierliche Forschung und Entwicklung bestehende Konzepte teilweise optimiert, überarbeitet oder validiert werden können oder müssen. Durch die hohe Anzahl an Stakeholdern, welche auf dem Feld der Endlagerung von HAW-Abfällen forschen, ist es schwierig zu einem Zeitpunkt den gesamten aktuellen Stand der Forschung für alle Teilbereiche wiederzugeben.

Die in den Einlagerungsstrecken platzierten POLLUX-Behälter sollen mit trockenem Salzgrus versetzt werden. Dieses Material soll keine definierte Korngrößenverteilung aufweisen, sondern aus bei der Streckenauffahrung anfallendem Schnittsalz bestehen. Bei diesem wird vor dem Einbringen in die Einlagerungsstrecken durch Siebung das Überkorn entfernt, so dass das Material verschleuderbar ist und im zeitlichen Verlauf unter dem konvergenzbedingten Gebirgsdruck gut kompaktieren kann. [5]

### 3.2. Versatzmaterialien

Ein Endlager besteht grundsätzlich aus verschiedenen Teilbereichen mit jeweils verschiedenen Aufgaben. Im Allgemeinen können diese Bereiche den Kategorien „Infrastruktur“ (z. B. Werkstätten), „Einlagerung“ (Einlagerungsstrecken- und -felder) und „Ausrichtungsgrubenbau“ (Schächte, Richtstrecken, etc.) zugeordnet werden (Abbildung 1). Um diese jeweiligen Teilbereiche wirksam und sicher zu verfüllen, müssen individuell verschiedene Materialien genutzt werden. Im Gegensatz zu den Einlagerungsfeldern ist es nicht vorgesehen die anderen Teilbereiche ausschließlich mit trockenem Salzgrus zu verfüllen. Da dort keine Behälter gelagert werden, ist keine Korrosionsgefahr vorhanden. Dies ermöglicht die Zugabe von Feuchtigkeit zu den Versatzstoffen oder bspw. die Verwendung von speziellen Zementen in Dichtelementen.



RESUS – flache Lagerung

- Einlagerungsbereich
- Querschläge und Richtstrecken
- **Querschläge und Richtstrecken**
- **zwei Streckenverschlüsse in Schachtnähe**  
(300 m x 3,8 m x 6,8 m x 2 = ca. 14.000 m<sup>3</sup>)
- **Tagesschächte - Schachtverschlüsse**

**Versatz:** naturtrockener Salzgrus (Schnittsalz aus Auffahrung)  
**GESAV-Material:** Salzgrus mit Mineralbinder  
**Qualifizierter Salzgrus:** (klassiert, befeuchtet)

- **Qualifizierter Salzgrus (= Baustoff) für Prognose der Langzeit - Eigenschaften**
  - Reproduzierbare Korngrößenverteilung
  - Definierte Feuchtigkeitsgehalte
- **Zulässige Variabilität Labor / in situ**

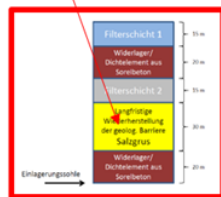


Abbildung 1: Versatzmaterialien in Abhängigkeit von Teilbereichen [5], modifiziert nach T. Popp [6]

## Einlagerungsbereiche

Wie in Abbildung 1 dargestellt sollen die Einlagerungsbereiche der Abfallbehälter mit naturtrockenem Salzgrus als Versatzmaterial verfüllt werden, der während der Strecken- und Hohlraumauffahrungen als Schnittsalz z.B. unter Einsatz von Teilschnittmaschinen gewonnen wird. Der Begriff „naturtrocken“ bedeutet, dass das Versatzmaterial mit seinem natürlichen Feuchtigkeitsgehalt verwendet wird. Durch die Konvergenz wird im Laufe der Zeit der eingebrachte Salzgrus so kompaktiert, dass zeitlich seine Permeabilität abnimmt, womit diese Salzgruspartien Eigenschaften erreichen, mit denen sie zunächst als Strömungsbarrieren wirksam werden, bis sie langfristig der Permeabilität des umliegenden Steinsalzgebirges entsprechen, womit letztendlich die Barrierewirksamkeit der geologischen Barriere insgesamt wieder hergestellt ist. Gleichzeitig wird der POLLUX-Behälter kraft- und volumenschlüssig im Salzgrus eingeschlossen, womit ein Widerlager gegenüber dem aufkriechenden Gebirge gebildet wird.

Die Feuchtigkeit von Salzgrus variiert dabei entsprechend des geologischen Ursprungs: So haben Salzstöcke einen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,2 Ma% (z. B. Gorleben-Hauptsalz) aber flache Salzlagerstätten mit 0,1-1 Ma% einen signifikant höheren Wert [6]. Die Verwendung von naturtrockenem Salzgrus ist favorisiert, um die Wahrscheinlichkeit der Behälterkorrosion zu minimieren. Für die Begrenzung des Grobkorns gibt es verschiedene Ansätze. So wurde in der Versuchsreihe zur thermischen Simulation der Streckenlagerung in den 90er Jahren in der Asse das Grobkorn auf < 64 mm begrenzt, während in anderen FuE-Projekten, wie z. B. bei REPOPERM [7] und DEBORA [8], die Grenze bei < 31,5 mm respektive < 8 mm lag. Durch die Nutzung von Schnittsalz aus der Auffahrung kann Versatzmaterial in großen Mengen mit

vergleichbar geringem Aufwand bereitgestellt werden, da dieses Material zwangsweise bei der Auffahrung der untertägigen Infrastruktur anfällt. Materialien, welche künstlich aus verschiedenen Fraktionen zu einer bestimmten Korngrößenverteilung gemischt werden, haben hingegen den Vorteil, dass sie genau reproduzierbar sind zu jeder gegebenen Zeit sowie der Feuchtigkeitsgehalt gesteuert werden kann. Das Material ist daher nicht abhängig von der verwendeten Fräse, Meißel oder der vor Ort anstehenden Geologie, aus der das Schnittsalz gewonnen wird. Bei reproduzierbaren Materialien ist aufgrund des Aufbereitungsaufwandes mit höheren assoziierten Bereitstellungskosten zu rechnen.

### **Querschläge und Richtstrecken**

Da in den Ausrichtungsrubenbauen keine Behälter eingelagert werden, ist dort das Risiko einer eventuellen Korrosion und der entsprechenden Bildung von Gasen nicht gegeben. Dies ermöglicht die Nutzung von Salzgrusmaterialien, welche höhere Feuchtigkeiten aufweisen als der naturtrockene Salzgrus oder reproduzierbarer Salzgrus mit festgelegter Feuchtigkeit. Dabei kann sowohl Süßwasser als auch Lauge dem Salzgrus zugegeben werden, um die für bessere Kompaktionseigenschaften nötige Feuchtigkeit zu erreichen. Aktuelle Konzepte sehen die Verwendung von trockenem Salzgrus in Richtstrecken in der Nähe von Einlagerungsfeldern vor und die Verwendung von angefeuchtetem Salzgrus in Kombination mit Dichtelementen in Schachtnähe [9].

In aktuellen FuE-Projekten werden für diese Bereiche geeignete Materialien erforscht. Zum einen wird im Verbundprojekt KOMPASS bzw. dem Nachfolgevorhaben MEASURES ein reproduzierbarer, angefeuchteter Salzgrus untersucht. Ziel ist durch Modellierungen und umfangreiche Laboruntersuchungen den Sealing Effect (Dichteffekt) des Materials vorherzusagen und so einen reproduzierbaren Salzgrus mit prognostizierbarer Entwicklung bereitzustellen. Zum anderen untersucht die TUBAF seit 2013 mit der GESAV- und SAVER-Projektreihe einen neuartigen matrixstabilisierten Salzgrus. Durch die Zugabe von Salzbinderkomponenten und Salzlösung wird das natürlich vorkommende und langzeitstabile Salzmineral Polyhalit gebildet, welches den Versatzkörper innerhalb kürzerer Zeit stabilisiert und die Setzung minimiert.

Da beide Materialien ähnliche Anwendungsgebiete haben, wurde die großtechnische Anwendung in einem direkten Vergleich in diesem Projekt durchgeführt.

### **Schachtverschlüsse**

Die Tagesschächte sind in einem Endlager die einzigen Ausrichtungsrubenbaue, welche den untertägigen Bereich direkt mit der Tagesoberfläche verbinden. Daher sind die sichere Verfüllung und Abdichtung besonders wichtig. Dies wird durch einen redundanten Aufbau unter Verwendung von verschiedenen langzeitstabilen Materialien und einem gestaffelten System aus Abdicht- und Tragelement [9] gewährleistet.

Die TUBAF hat im Zuge der FuE-Projekte ELSA I und II die Verfüllung von Schächten umfangreich im Labormaßstab sowie in untertägigen Großversuchen untersucht ([10] und [11]). Ein aktuelles Vorhaben auf dem Gebiet ist zudem das Mg-O-C3-Projekt (FKZ.: 02E12072).

### 3.3. Durchgeführte Forschungsprojekte

In den vorherigen Kapiteln wurde eine Auswahl von relevanten FuE-Projekten in Zusammenhang mit der Endlagerung von HAW bereits angeschnitten. Auf Grund des Umfangs und der langen Forschungshistorie in diesem Bereich ist es nicht zielbringend an dieser Stelle alle Projekte aufzulisten, daher wird im Folgenden tabellarisch eine Kurzübersicht zu relevanten Projekten vorgestellt. Für weitere Projektberichte und -informationen sei auf die Archive des Projektträgers Karlsruhe, der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit sowie der BGE Technology GmbH und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe verwiesen, welche unter folgenden Webauftritten erreichbar sind:

Tabelle 2: Übersicht relevanter Online-Archive zum Thema HAW-Endlagerung

| <b>Institution</b>                                    | <b>Archiv-Link</b>  |
|---|---|
| Projektträger Karlsruhe                               | <a href="https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/Abschlussberichte-E-Vorhaben.htm">https://www.ptka.kit.edu/ptka-alt/downloads/ptka-wte-e/Abschlussberichte-E-Vorhaben.htm</a> |
| Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH | <a href="https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen">https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen</a>   |
| BGE Technology GmbH                                   | <a href="https://www.bge-technology.de/media-thek/forschungsberichte/">https://www.bge-technology.de/media-thek/forschungsberichte/</a>   |
| Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe     | <a href="https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/projekte_node.html">https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Projekte/projekte_node.html</a>                             |

In vielen FuE-Projekten waren weitere Stakeholder beteiligt, welche jedoch kein eigenes Online-Archiv mit den Berichten führen, daher enthält Tabelle 2 lediglich für das Projekt relevante Ergebnisse.

Relevante bzw. thematisch verwandte FuE-Projekte für das SAVER-Projekt sind grundsätzlich diejenigen, die sich mit Grundlagenforschung sowie In-Situ-Versuchen zu Salzgrusversatzbauwerken und Endlagerkonzepten für die Einlagerung von HAW beschäftigt haben.

## Thermische Simulation der Streckenlagerung TSS (1985 – 1995)

Die ersten großen relevanten FuE- Projekte wurden in den 90er Jahren mit dem Versuch zur Thermischen Simulation der Streckenlagerung durchgeführt (siehe Abbildung 2). Bei dem Projekt wurden insgesamt 6 POLLUX-Dummies platziert, welche in ihrer Wärmeabgabe, Maßen und Gewicht den originalen Behältern nachempfunden wurden. Die Wärmegenerierung wurde durch in den Dummies verbaute Heizelemente realisiert. Anschließend wurden die Strecken mit Schnittsalz im Schleuderverfahren verfüllt. [12]

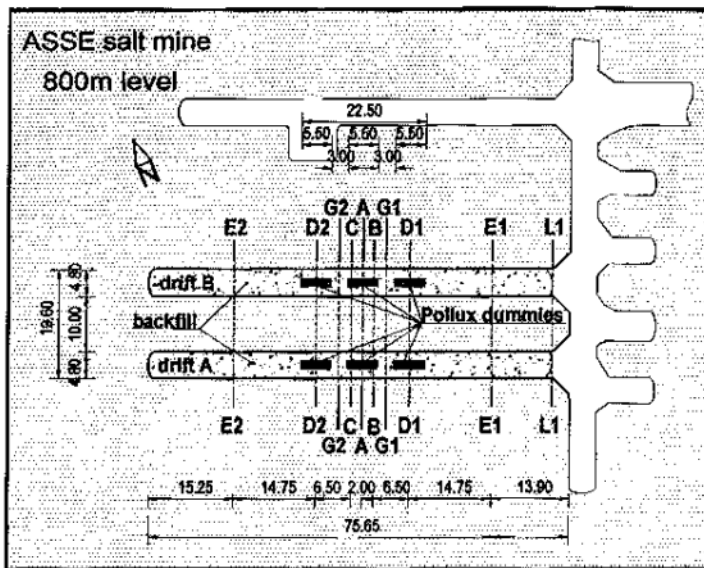


Abbildung 2: Teststrecken im FuE-Projekt TSS [12]

Im Umfeld der Strecken wurden im Vorlauf Bohrungen abgeteuft und mit Wärmesensoren ausgestattet. Die POLLUX-Dummies wurden über ca. 5 Jahre erhitzt und überwacht. Neben der Oberfläche der Dummies selbst wurde sowohl die Erwärmung des Versatzes als auch des umliegenden Gebirges überwacht. Durch die Anordnung der Sensoren in unterschiedlichen Entfernungen konnte so erstmals ein Einblick in die dreidimensionale Wärmefeldausbreitung gewonnen werden. Des Weiteren ermöglichte der TSS-Versuch Einblicke und Verständnisgewinne zu thermo-mechanischen Prozessen innerhalb der Versatzkörper. [12]

## BAMBUS I und II - Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (1996 – 1998; 2000 – 2003)

Die im TSS-Versuch gewonnenen Datensätze ermöglichten erstmalig die umfangreiche Analyse und Entwicklung von thermomechanischen- und Materialmodellen. So konnten im Projekt BAMBUS I bspw. thermo-mechanische Modelle entwickelt werden, welche den Zusammenhang zwischen Wärmeentwicklung, Versatzkompaktion und Permeabilität herstellen. Neben der Auswertung der TSS-Ergebnisse und der Modellerstellung wurden zudem verschiedene Laborversuche durchgeführt zur Ergebnisvalidierung und- vergleich. [13]

Das Folgeprojekt BAMBUS II beschäftigt sich weiterhin mit den Ergebnissen aus dem TSS-Versuch und der Optimierung bei der Auslegung eines potenziellen HAW-Endlagers im Steinsalz. Zudem sollten Modelle entwickelt werden, welche die Voraussage für die Langzeitentwicklung von Barrieren im Steinsalz voraussagen können. Die Projektarbeiten umfassten In-Situ- und Laboruntersuchungen, forensische Analysen sowie Computersimulationen und Schreibtischstudien. [14]

### **GESAV I – Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (2012 – 2017)**

Die Motivation für das GESAV-I-Projekt lag darin konventionellen Salzgrusversatz weiterzuentwickeln, so dass eine Gefügestabilisierung eintritt. Nach Einbau von Salzbinderkomponenten setzt eine Salzmineralneubildung ein, bei der langzeitbeständiger Polyhalit entsteht, welcher die Salzgrus-Matrix stabilisiert. Bei den Salzbinderkomponenten handelt es sich um Kieserit, Kaliumsulfat, Calciumsulfat-Halbhydrat sowie Magnesiumchloridlösung.

Im Projekt wurde durch umfangreiche Laborversuche ein optimales Korngemisch sowie das entsprechende Mischungsverhältnis mit den Salzbinderkomponenten definiert. Die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Versatzmaterials, bedingt durch Salzmineralneubildungen an den Kontaktflächen der Halitkörner, konnte erfolgreich nachgewiesen werden.

Die Anforderungen an das Material umfassten u. A. einen Verfüllungsgrad, der so nah wie möglich an 100 % liegen sollte, keine oder möglichst geringe Setzung nach Einbau des Materials, gleiche Einbaueigenschaften wie herkömmlicher angefeuchteter Versatz sowie eine vergleichbar geringe Permeabilität.

Diese Anforderungen konnten nachweislich durch das entwickelte GESAV-Material erfüllt werden, so dass der Bedarf für ein Folgeprojekt entstand, in dem die Anwendbarkeit unter realistischen bergmännischen Bedingungen erprobt sowie eine Versatzmethode definiert wird.

### **GESAV II - Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (2017 – 2021)**

Die sich aus GESAV I ergebenden Fragestellungen wurden im Folgeprojekt GESAV II aufgegriffen. Zielstellung war die Entwicklung einer Vorzugsmethode für untertägige Einbringen des Materials. Durch umfangreiche In-Situ-Versuche im Realmaßstab im Steinsalzbergwerk der Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH sowie entsprechende Begleitung durch ein dafür ausgelegtes Laborprogramm wurde eine Versatzmethode definiert, welche die Anforderungen erfüllt. Diese Anforderungen enthielten das Erfüllen der Permeabilitätsforderungen, die Vermeidung von Materialentmischung, das Erzielen einer möglichst hohen Einbaudichte sowie die Möglichkeit des zügigen Verarbeitens.

Nach einer Vorselektion aus allen bekannten im Bergbau anwendbaren Versatzverfahren wurden zunächst das Blasen, Schleudern und Schieben hinsichtlich ihrer Eignung in 3

untertägigen Großversuchen getestet. Da keine der Varianten die Anforderungen erfüllen konnte, wurde das Schiebeversatzverfahren durch das Rüttelversatzverfahren optimiert. Die hieraus definierte Vorzugsmethode, welche die Anforderungen erfüllt, ist somit die Nutzung des Schleuderversatzverfahrens mit anschließender lagenweiser Rüttelplattenverdichtung. Mit dieser Kombinationsmethode wurde eine Einbaudichte von  $1,62 \text{ g/cm}^3$  sowie ein Versatzfaktor von 0,99 erreicht. Auch bei der Aufskalierung des GESAV-Materials vom Labormaßstab (GESAV I) auf Realmaßstab (GESAV II) konnte durch über den Projektzeitraum parallel durchgeführte röntgenographische Messungen die Polyhalitbildung erfolgreich nachgewiesen werden.

### **SAVER - Entwicklung eines Salzgrusbasierten Versatzkonzepts unter der Option Rückholbarkeit - Phase 1 (2021 – 2023)**

Da nachgewiesen werden konnte, dass GESAV-Material für den Einsatz in HAW-Endlagern im Salinar geeignet ist, entstand die Frage nach einem direkten Vergleich mit angefeuchtetem Salzgrus, welcher bis dato als Referenzmaterial zur Verfüllung von Richtstrecken gedacht war. Damit entstand die Idee für das Projekt SAVER in dem beide Materialien durch identische Großversuche einem direkten Vergleich unterzogen werden sollen. Des Weiteren sollte die Möglichkeit der Optimierung der verwendeten Salzbinderkomponenten und Maschinenteknik evaluiert werden. Die Realitätsnähe galt es weiter zu steigern durch die Konzeption und Einbau einer POLLUX-Behälterattrappe, an der im weiteren Verlauf die Rückholbarkeit untersucht werden soll.

## 4. Kooperation mit dem Projekt „KOMPASS“

Im Zuge des SAVER-Projektes wurde eine Kooperation mit dem ebenfalls vom PTKA geförderten KOMPASS-Projekt initiiert. Die Kooperation entstand aufgrund der Idee eine Symbiose zu nutzen, da KOMPASS-Material in die Kategorie „angefeuchteter qualifizierter Steinsalzgrus“ eingeteilt werden kann. Dadurch, dass im SAVER-Projekt solch ein Material genutzt werden sollte und im KOMPASS-Projekt lediglich Realversuche im Labormaßstab durchgeführt wurden, konnte man so unter effizienter Budgetausnutzung Benefits und zusätzliche Inputs in beiden Projekten gewinnen. Die TUBAF konnte einen Salzgrus verwenden über den umfassende Labor- und Modellierungsdaten bekannt sind, während für das KOMPASS-Projekt, durch die Verwendung des Materials in einem Versatzkörper in Realmaßstab, Ausgangsdaten für Modellierungen aus der untertägigen Praxis abgeleitet werden konnten.

Die Kooperation wurde mit Beginn des SAVER-Projektes und dem Kick-Off von KOMPASS- II im September 2021 begonnen und aktiv über den gesamten Projekt-Zeitraum vorangetrieben. Durch die Vernetzung wurden beide Projekte in Vorträgen auf internationaler Ebene vorgestellt und der Forschungscommunity wichtige Kenntnisse und Erfahrungen aus der Zusammenarbeit übermittelt. Durch die untertägigen Versuchsstände der TUBAF mit zwei Versatzkörpern in Realmaßstab konnten erstmal Werte außerhalb des Labors für die praktische Anwendung von KOMPASS-Material generiert, bereitgestellt und ausgewertet werden. Diese sollen zukünftig als Ausgangswerte für Modellierungen genutzt werden, um so einen Vergleich zwischen im Labor und aus der Praxis ermittelten Werten zu ziehen und ggf. Modellanpassungen vorzunehmen.

Diese erstmalige Zusammenarbeit zweier Projekte und deren starker Kopplung, welche ihren Fokus auf zwei verschiedene Bereiche richteten, ermöglichte nicht nur einen Kompetenzgewinn aller beteiligten Stakeholder, sondern stieß auch national sowie international auf hohes Interesse und Zuspruch.

Die Kooperation zwischen beiden Projektpartnern wird im Zuge des Projektes „SAVER – Phase II“ und dem KOMPASS-II-Nachfolgeprojekt „MEASURES“ fortgesetzt.

## 5. Untertägige Versuchsreihe

Um die in GESAV II erhaltenen Ergebnisse zu validieren und die Projektziele für SAVER zu realisieren, war die Durchführung von erneuten untertägigen In-Situ-Versuchen elementarer Projektschwerpunkt. Im SAVER-Projekt wurden insgesamt 2 untertägige Versatzkörper in Re-algröße hergestellt, mit einem signifikant größeren Volumen im Vergleich zum GESAV-II-Projekt. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, wurden bis auf die eingebrachten Versatzmaterialien die Ausführung beider Versuche identisch gehalten.

### 5.1. Standort

Die In-Situ-Großversuche werden im Bergwerk „Glückauf“ der Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES) durchgeführt (Roter Punkt in Abbildung 3). Das Grubenfeld liegt im Thüringer Becken und damit im Staßfurt-Steinsalz. Das Südharz-Kalirevier weist eine charakteristische salinare Zechsteinabfolge von Gesteinen der Ablagerungen der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formationen auf (Abbildung 4). Das Ausscheidungsbecken wird durch paläogeographisch wirksame Schwellen und Senken (sowie kleinere Sulfat- und Karbonatwälder) lokal untergliedert. Dadurch können signifikante vertikale und laterale Veränderungen von Mächtigkeit und Fazies innerhalb der Schichtenfolge mit moderater Salinartektonik auftreten. Insgesamt gehört es zum Salzlagerstättentyp „flache Lagerung“.

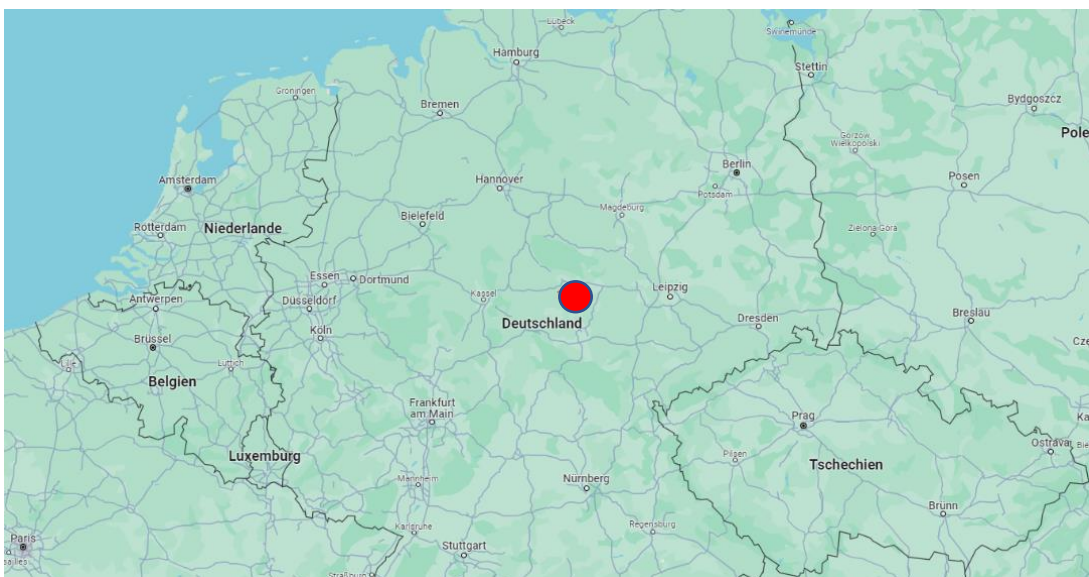


Abbildung 3: Geographische Lage des Bergwerks "Glückauf" [14]

In der Grube wurde bis 1990 Kalisalz abgebaut. Seit 2005 wird Staßfurt-Steinsalz abgebaut, welches hauptsächlich als Streusalz verkauft wird, und eine Untertage-Deponie der Klasse IV betrieben [15] [2]. Die Lagerstätte wird im für den untertägigen Salzbergbau typischen Kammer-Pfeiler-Bau abgebaut.

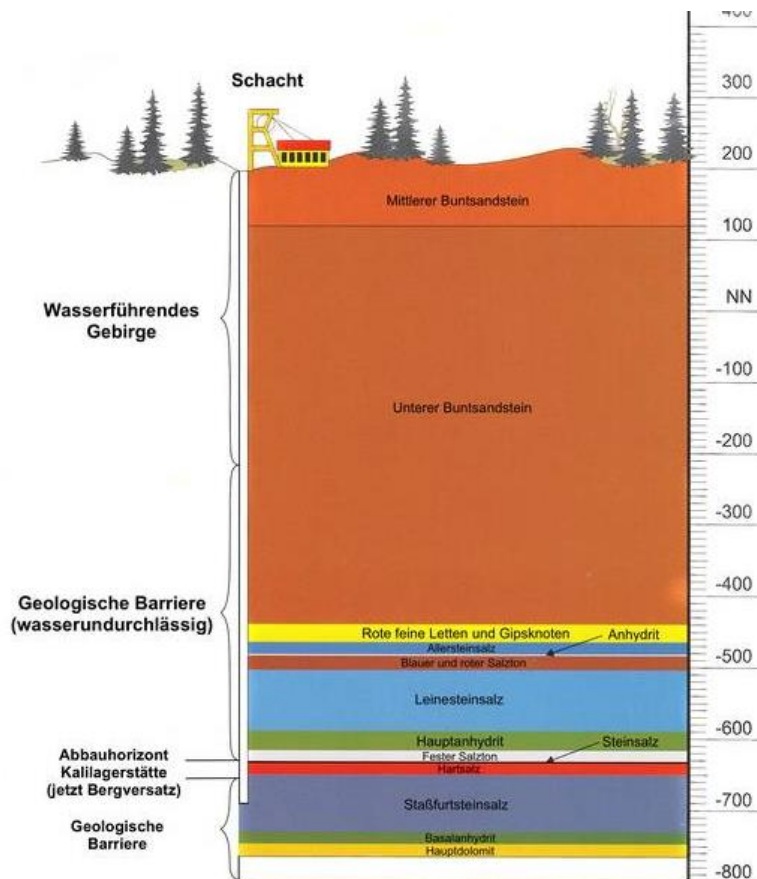


Abbildung 4: Geologische Schichtenabfolge im Bergwerk "Glückauf" [12]

Das bergmännisch gewonnene Staßfurt-Steinsalz wird unter Tage aufbereitet, zwischengelagert und über den Schacht I nach über Tage transportiert. Die Gewinnung findet südlich vom Schacht 1 innerhalb des Bewilligungsfeldes „Am Frauenberg“ als Kammer-Pfeiler-Abbauverfahren im Staßfurt-Steinsalz ( $\text{z2Na}$ ) statt. Dieses besitzt im Bereich der Lagerstätte eine nach Norden zum Beckenrand hin abnehmende Mächtigkeit von 120 m bis auf 40 m. Der Halit-Anteil des anstehenden Steinsalzes beträgt im Bereich der Abbaue etwa 98%, womit es als sehr rein gilt.

Durch die industrielle Produktion von Steinsalz durch die GSES fungiert das Bergwerk „Glückauf“ nicht nur als Standort für die Durchführung der In-Situ-Großversuche, sondern gleichzeitig als Zulieferer für den dafür benötigten Salzgrus. Das Bergwerk besitzt eine untertägige Siebanlage, in der verschiedene Fraktionen abgesiebt werden können. Anschließend kann das Material untertägig zwischengelagert oder über den Schacht I ausgefördert werden. Die Anlieferung der Abfälle zur Einlagerung in die Deponie erfolgt über Schacht II. Für die GESAV- und SAVER-Projekte wurde das Material in Form von abgefüllten Big Bags bereitgestellt.



Zum Ende von GESAV-II befanden sich in allen 3 Versuchsorten noch Versatzkörper aus GESAV-Material. Im SAVER-Kick-Off-Meeting wurde entschieden, dass 2 der 3 Versatzkörper zurückgebaut werden, um Platz für die Versatzkörper in SAVER zu schaffen. Als einziger verbleibender Versatzkörper wurde das im kombinierten Schleuder-Rüttel-Verfahren erstellte Bauwerk in GV 05 belassen. Da mit diesem Verfahren die Anforderungen erfüllt wurden, wurde entschieden, dass dieser Versatzkörper für Langzeituntersuchungen und zur Gewinnung von In-Situ-Proben zu Verfügung bleibt.

### 5.2.2. Geometrie und Aufbau der Versuchsorte

Da die Versatzkörper im SAVER-Projekt weitaus größere Volumina aufweisen sollten als im GESAV-II-Projekt (85 t Material/Bauwerk in GESAV II; 270 t Material/Bauwerk SAVER I), mussten GV 03 und GV 04 um 5 m und 10 m verlängert werden. GV 04 musste um 10 m verlängert werden, da im vorderen Bereich ein ausreichender Bereich freibleiben musste für die Errichtung der Konvergenzmessstelle des IfG Leipzig. Die Auffahrung der Verlängerung wurden im Bohr- und Sprengverfahren ausgeführt mit anschließendem partiellen Konturnachschnitt. Es wurde entschieden, dass lediglich die Länge entsprechend den geforderten Volumina angepasst wird, da in zahlreichen FuE-Projekten von einem mittlerweile als aktuellen Standard anzusehenden Querschnitt von 5 m Breite und 3 m Streckenhöhe ausgegangen wird.

Da die Querschläge aus GESAV II weitergenutzt wurden und in SAVER die Technologie u. A. validiert werden sollte, war es zudem wichtig, dass die Dimensionen von Breite und Höhe gleichbleiben.

Aufgrund unsauberer Bohrarbeiten entstanden bei den Sprengungen zur Verlängerung der beiden Querschläge unebene Sohlen, welche nachträglich mit einer Fräse geebnet werden mussten. Für den Versuchsaufbau war eine möglichst gleichmäßige Sohle wichtig. Durch das Nachfräsen sind beide Querschläge im verlängerten Bereich minimal einfallend in Richtung Ortsbrust. Abbildung 6 zeigt die Spuren des Nachschnittes sowie einen der verlängerten Querschläge.



Abbildung 6: Verlängerter Querschlag mit bereits eingebauter Vorrichtung zur Durchströmungsmessung (Foto Autor)

Durch Literaturrecherche stellte sich heraus, dass der Grad der bergmännischen Detailplanung in den vordem durchgeführten FuE-Projekten nicht als hoch anzusehen war. In allen FuE-Arbeiten wurde die ursprüngliche Annahme für die Einlagerung im Steinsalz übernommen, dass der POLLUX-Behälter auf die Sohle abgelegt wird. Um eine bessere Stabilität zu erreichen und das Handling zu vereinfachen, wurde entschieden mit der Firstfräse einen Graben herzurichten, der in etwa die Länge der verwendeten POLLUX-Attrappen aufweist (Länge: 2,5 m; Durchmesser: 1,3 m, genauere Beschreibung in Kapitel 5.7 S. 37).

Andere Forschungsprojekte, wie z. B. das GENESIS-Projekt, untersuchten bereits theoretisch alternative Positionierungen der Behälter auf der Sohle für die Einlagerung in Tonsteinformationen [16]. Darin wurden Konzepte untersucht für die alternative Positionierung von POLLUX-Behältern für das Konzept der Streckenlagerung (vgl. Abbildung 7) untersucht.

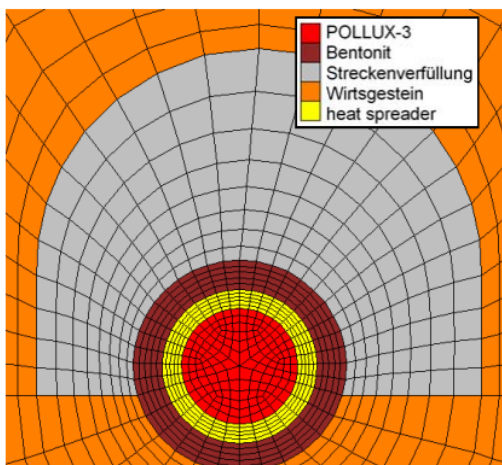


Abbildung 7: Einlagerungskonzept aus dem GENESIS-Projekt für die Lagerung in Tonsteinformationen [16]

In anderen Projekten, wie z. B. bei der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) in der Schweiz, wurde in den 90er Jahren die Möglichkeit zur Lagerung der Behälter auf vorgeformten Bentonitblöcken untersucht [17]. Beide der genannten Einlagerungsvarianten beziehen sich jedoch nicht auf die Lagerung in Steinsalzformationen.

Der Graben in jedem Querschlag wurde mit einer zu einer Firstfräse umgebauten LTF 10 (S10000) der Firma Dietlas hergestellt (Abbildung 8). Die GSES hat den ursprünglichen Untertagelader durch Anbringen eines Fräskopfes (Abbildung 9) und entsprechenden hydraulischen Umbauten zu einer Fräse umgerüstet, welche zum Konturnachscheiden oder Spezialarbeiten genutzt werden kann.



Abbildung 8: Typenschild der verwendeten Firstfräse (Foto Autor)

Der Fräskopf der Maschine hat einen von ca. 40 cm und eine Breite von ca. 70 cm.

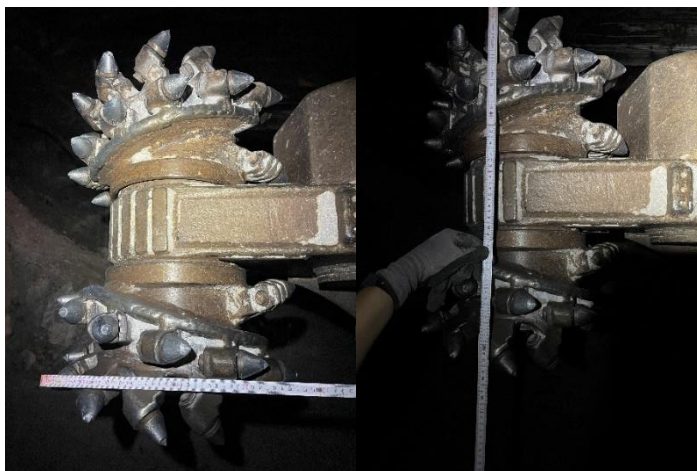


Abbildung 9: Dimensionen des Fräskopfes (Foto Autor)

Die Abmessungen des gefrästen Grabens richteten sich dabei nach denen der entworfenen POLLUX-Behälterattrappe (siehe Kapitel 5.7 S.37). Um die größtmögliche Genauigkeit zu erzielen, wurde der Grabenbereich vorher ausgemessen und anschließend mit Markierspray gekennzeichnet, so dass der Fräsenbediener visuelle Grenzen hat (Abb. 10-11).



Abbildung 10: Feinarbeiten an der Grabenkontur um Radien anzugleichen (Foto Autor)



Abbildung 11. Herstellung des Grabens (Foto Autor)

Das entstehende Schnittsalz wurde zum größten Teil mit dem Fräskopf herausgefördert. Die verbleibenden Reste wurden händisch mit Schaufeln entfernt, so dass die gefräste Oberfläche des Grabens komplett freigelegt wird und rein ist von verbleibenden Schnittsalz. Da die Behälterattrappen in den Graben gebettet werden, ist die Ebenheit der Oberfläche wichtig, um Druckspitzen zu vermeiden, welche durch Unebenheiten der Grabensohle in den POLLUX-Dummy induziert werden können und eine Materialschädigung oder Versatzkörperbeeinflussung erwirken. Die Größe der Fräse war für die Grabenherstellung nicht optimal, daher mussten die Feinarbeiten zusätzlich händisch durchgeführt werden, so dass der Grabenradius dem

Radius der POLLUX-Attrappe so nah wie möglich gleicht. Verbleibende Unebenheiten wurden mit partieller, geringer Auffüllung von Feinsalz ausgeebnet.

### 5.2.3. Vermessung der Versuchsorte

Für die spätere Erstellung der Massenbilanz und der Einbaudichte der Versatzkörper wurden 3D-Laserscans beider Querschläge erstellt. Dies wurde mit einem „ZEB-REVO“-Hand-Laserscanner der Firma GeoSLAM Ltd. (vgl. Abbildung 12) durchgeführt, welcher vom Markscheideinstitut der TU Bergakademie Freiberg bereitgestellt wurde.



Abbildung 12: Komponenten des ZEB-REVO Handscanners [17]

Nach der Initialisierung des Handscanners erstellt dieser kontinuierlich 3D-Punktwolken, während sich der Nutzer im zu vermessenden Raum bewegt. Diese Daten können anschließend ausgelesen werden und mit spezieller Software digital dargestellt, interpretiert und ausgewertet werden.

Dies wurde für beide Querschläge mit zwei verschiedenen Softwares durchgeführt. Die dabei ermittelten Volumina sind leicht voneinander abweichend, was wahrscheinlich bedingt ist, durch die individuelle Fähigkeit der Programme unerwünschte Punktwolken zu entfernen und herauszurendern und -rechnen. Die beiden verwendeten Softwares waren „CloudCompare“ und „RiSCAN PRO“.

Während „CloudCompare“ als Freeware erhältlich ist, erfordert „RiSCAN PRO“ eine Lizenz aber weist dementsprechend auch mehr Features auf. Die Software beinhaltet einen Punktwolkenausdünnungsfilter, welcher bspw. in der Luft befindliche Staubkörner herausrendern kann. Für den untertägigen Bereich, insbesondere im Salzbergbau oder anderen staubintensiven Lagerstätten und in der Nähe von Hauptwetterwegen, ist eine Staubbelastung der Grubenwetter nur schwierig zu vermeiden.

Generell können bei solchen Scans Ungenauigkeiten bei Überhängen durch die genutzten Auswertungs-Programme entstehen, da der Algorithmus vertikal projiziert, d. h. es entstehen unter Überhängen sog. Toträume. Des Weiteren kann bei Messung selbst eine Ungenauigkeit entstehen, z. B. durch beim Ablaufen der Messschleifen, oder später am Computer bei der manuellen Entfernung falscher Messpunkte in der entsprechenden Software.

Die Vermessungen wurden durchgeführt nachdem die POLLUX-Dummies in den Querschlängen abgesetzt wurden. Um das Versatzkörpervolumina für die Materialkalkulierung abschätzen zu können, wurde vom vermessenen Volumen das theoretische Böschungsvolumen abgezogen. Die Visualisierungen der Scans sind in den Abbildungen 13 – 16 dargestellt.

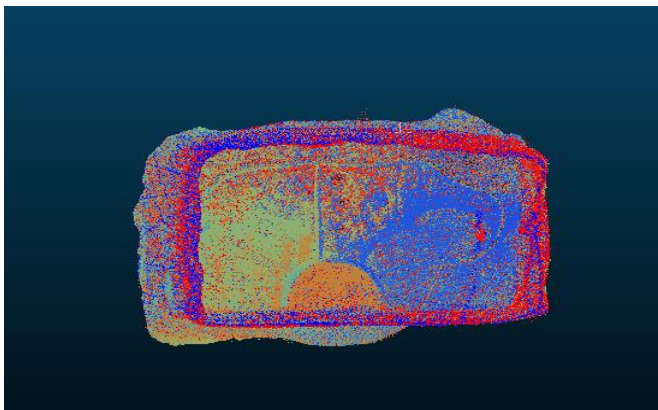


Abbildung 13: Mit Handscanner erfasster GESAV Querschnitt 1 (Darstellung mit CloudCompare)

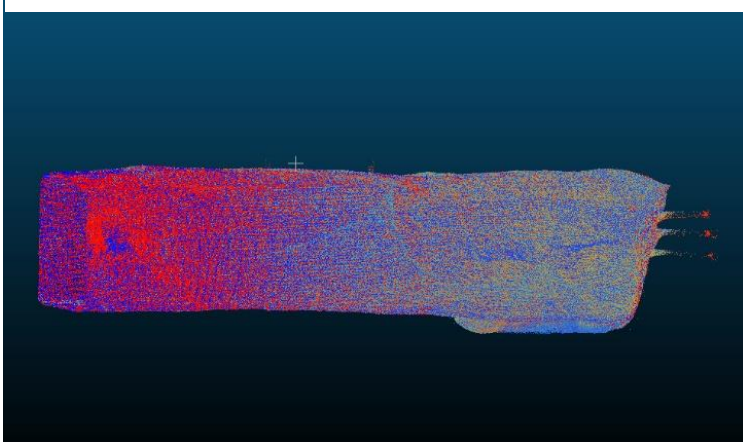


Abbildung 14: Mit Handscanner erfasster GESAV Querschnitt in seitlicher Ansicht (Darstellung mit CloudCompare)

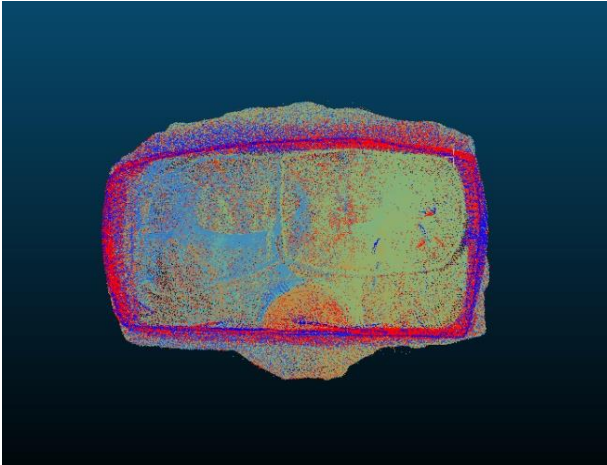


Abbildung 15: Mit Handscanner erfasster KOMPASS Querschnitt (Darstellung mit CloudCompare)

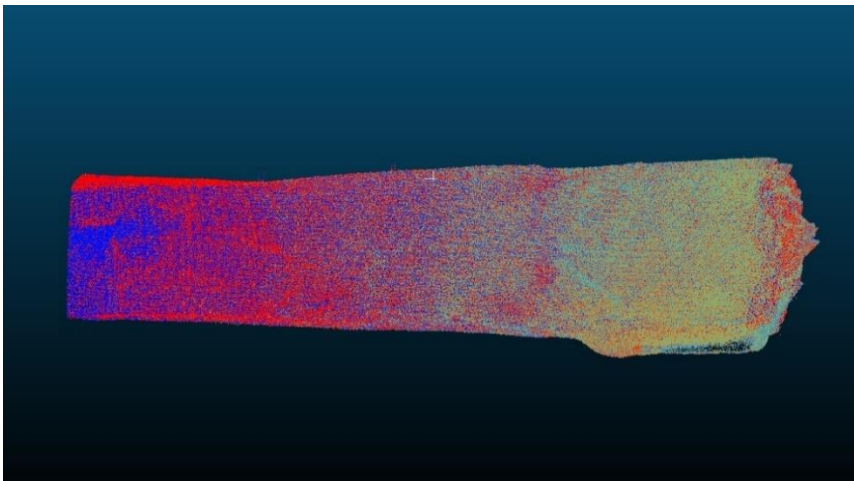


Abbildung 16: Mit Handscanner erfasster KOMPASS Querschnitt in seitlicher Ansicht (Darstellung mit CloudCompare)

Die ermittelten zu verfüllenden Volumina wurden unter Verwendung des in GESAV II labor-technisch ermittelten Böschungswinkels von 33 ° errechnet und sind in Tabelle 3 aufgeführt. Für die Berechnungen wurden lediglich die mit RiSCAN PRO ermittelten Volumina berücksichtigt, da das Programm mehr Filteroptionen geboten hat und die manuelle Entfernung von fehlerhaften Punkten manuell vom Markscheideinstitut der TUBAF durchgeführt wurde. Auf Grund dessen sind die Werte als genauer anzusehen als die durch CloudCompare bestimmten.

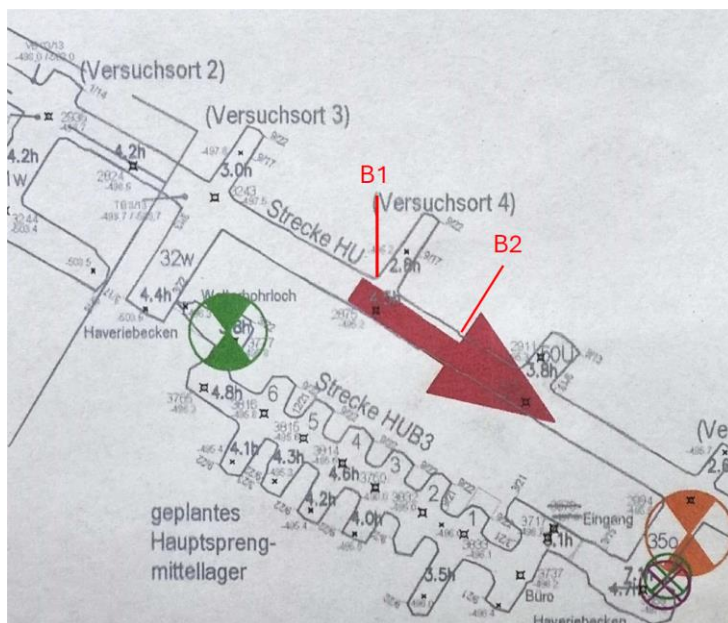
Tabelle 3: Durch 3D-Scan ermittelte zu Volumina

|              | <b>GV 03 (GESAV) [m<sup>3</sup>]</b> | <b>GV 04 (KOMPASS) [m<sup>3</sup>]</b> |
|--------------|--------------------------------------|--|
| CloudCompare | 204,3                                | 241,6                                  |
| RiSCAN PRO   | 208                                  | 239,5                                  |

### 5.3. Gebirgsmechanische Situation – Spannungssondierungen

Die Versuchsabbaue wurden am äußersten Rand des aktuellen Abbaubereiches von der Strecke HU, als Verlängerung der Abbaue 32, 33 und 35 in Richtung Norden aufgefahren (vgl. Abbildung 5). Infolge dieser exponierten Randlage ist die unmittelbare bergbauliche Beeinflussung (Entlastung) durch größere Hohlräume weitgehend vernachlässigbar, im Gegenteil sind in den angrenzenden Pfeilern infolge von Spannungsumlagerungen auf den Baufeldrand etwas höhere Lasten bzw. Gebirgsspannungen zu erwarten. Unabhängig davon stellt der Versuchsort mit seinen 3 Nischen aus gebirgsmechanischer Sicht (Einzelstrecke ohne Beeinflussung durch benachbarte Abbaue) sowie aufgrund der geringen bergbaulichen Störungen (z.B. kein Laderbetrieb) eine optimale Lokalität für das Vorhaben dar.

Aufgrund der Kriecheigenschaften des umgebenden Steinsalzes unterliegen die erstellten Versuchsabbaue Konvergenzprozessen, die zu Spannungsumlagerungen und somit im langzeitigen Verlauf (über mehrere Jahrhunderte) zu einer Verdichtung der eingebrachten Salzgrusmaterialien führen. Somit kann die zu beobachtete, verzögerte zeitliche Zunahme der mit Druckkissen gemessenen Versatzdrücke (an der Basis der Versatzkörper) bzw. relative Änderungen der Versatzhöhe (scheinbare Hebung) hauptsächlich auf wirkende Konvergenzprozesse mit Sohlenhebung bzw. Firstsenkung erklärt werden. Gleichzeitig sind die einsetzenden Verformungen aber zunächst noch klein.



Ausschnitt aus dem Risswerk



Bohrung B2: Erstellung Messbohrung



Bohrung B1: Lage der Bohrung im Pfeiler mit HF-Mess

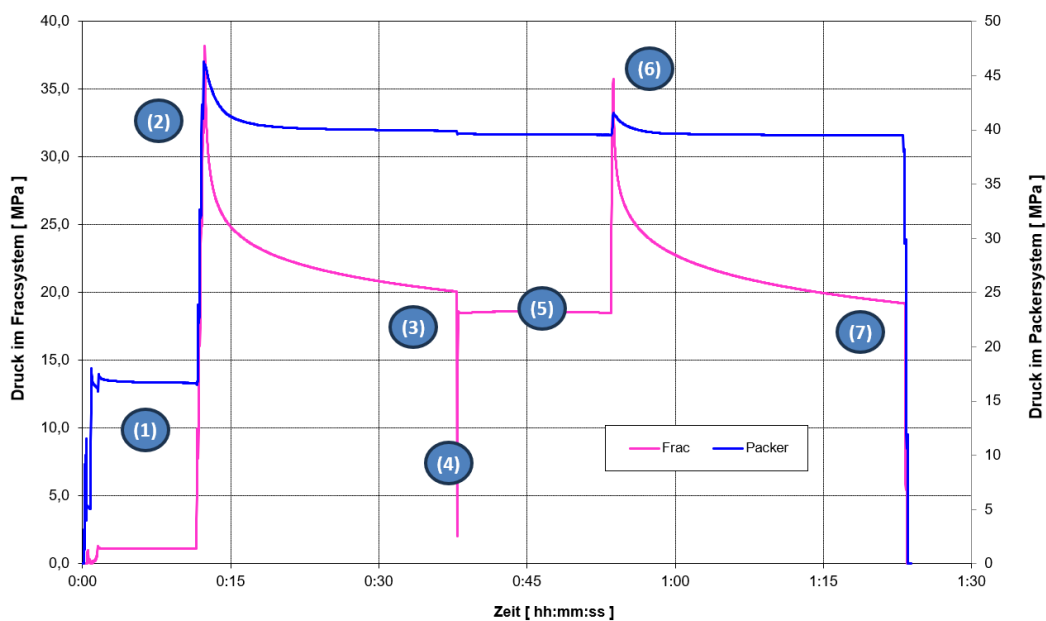
Abbildung 17: Lage und Situation der Spannungssondierbohrungen im Versuchsfeld (Unterlagen GSES, Fotos IfG)

Das bedeutet, diese geomechanischen Randbedingungen sind als Teil der notwendigen Standortcharakterisierung zumindest repräsentativ zu bestimmen, wofür neben der Hohlraumkonvergenz auch Spannungsmessungen durchzuführen sind.

Dafür wurden durch IfG zwei annähernd sählig verlaufende und ca. 25 m lange 42mm-Messbohrungen (sowohl in den Pfeiler zwischen zwei Versuchsstrecken (relativ gering Hohlraumbeeinflusster Bereich) erstellt, als auch in den Pfeiler, unmittelbar an den Streckenstummel angrenzend). In beiden Bohrungen wurden punktuell, in Abhängigkeit vom Konturabstand, jeweils 6 Spannungsmessungen nach dem Hydrofrac-Verfahren durchgeführt (Abbildung 17)

Das Prinzip des „hydraulic fracturing“ – also des hydraulischen Aufreißens – besteht in der künstlichen Risserzeugung im Gebirge in der Umgebung eines abgepackerten Bohrlochabschnittes und der Ermittlung des Druckgleichgewichtes zwischen Innendruck (Riss) und des senkrecht zur Rissfläche wirkenden Gebirgsdruckes.

Nach dem Einbau der Sonde in der vorgegebenen Bohrlochtiefe wurden die beiden Packer zur Abdichtung des zu untersuchenden Bohrungsabschnitts mit Öldruck beaufschlagt. Der anschließende Versuchsablauf umfasst, zum Nachweis der technischen Dichtheit des Messsystems für die Messung sowie zur Gewährleistung einer möglichst zuverlässigen Bestimmung der kleinsten Hauptspannung verschiedene Versuchsphasen.



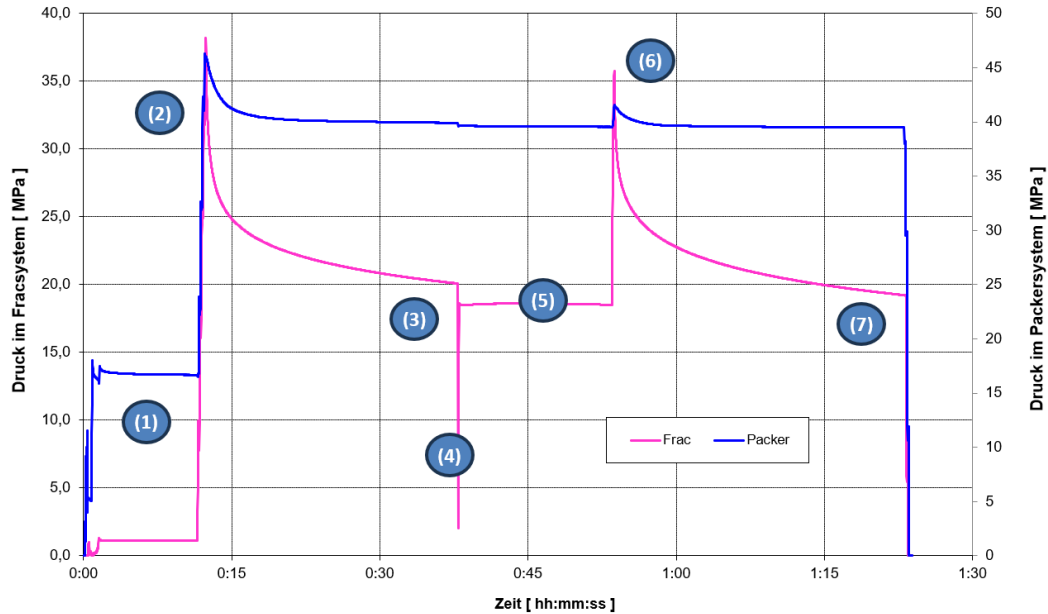


Abbildung 18: Typischer Ablauf einer Spannungs sondierung: Strecke HU Versuchsort – 4 - HF-Bohrung B1 - Bohrlochteufe = 15,00 m

Abbildung 18 zeigt für die Bohrlochmessung B1 - Bohrlochteufe = 15,00 m ein typischen Verlauf der Druckkurve im Fracsystem bei einer Spannungs sondierung mit einem Refrac (als Messparameter werden für jede Phase die jeweiligen Hydraulikdrücke  $p$  ausgewiese (die entsprechenden Werte sind in der Auswertedatei für jeden Versuch dokumentiert):

- (1) Dichtheitstest mit 20 – 50 % des primären Überlagerungsdrucks zur Überprüfung der primären Dichtheit des Systems bei ca. 20 % des primären Überlagerungsdruckes – Dauer 15 min – 30 min: **Beginn primäre Dichtheit – Ende primäre Dichtheit = Diff. primäre Dichtheit**

Beim Dichtheitstest kommt es zunächst zu einer Aufsättigung des fluidzugänglichen Porenraums, was mit einem signifikanten Druckabfall verbunden ist. Danach stabilisiert sich der Druckwert auf einem konstanten Niveau, womit der Messausführende entscheiden kann, ob das Messsystem ausreichend dicht ist oder ob Undichtigkeiten vorliegen.

- (2) Druckerhöhung im Fracraum bis zum abrupten Aufreißen (Frac) des abgepackerten Bohrlochabschnittes (innerhalb weniger Sekunden): **Überpumpdruck 1**

Zum Zeitpunkt des Aufreißens des Gebirges (Fraczeitpunkt) wurden zur Vermeidung eines plötzlichen Druckabfalls infolge Volumenvergrößerung durch die Rissbildung noch einige Volumenteile Öl nachgepresst.

- (3) Nach dem Aufreißen wurde jeweils das Pumpenventil geschlossen und der sich (bis auf einen quasi-stationären Wert einstellende) Druckabfall beobachtet – Dauer 30 – 60 min: **Ruhedruck 1 (0,5h)**
- (4) Entspannung des Systems.
- (5) Dichtheitstest bei etwa 90 % des Endwertes der Druckabfallkurve (sekundäre Dichtheit) – Dauer ca. 15 min: **Beginn sekundäre Dichtheit – Ende sekundäre Dichtheit = Diff. sekundäre Dichtheit**
- Beim 2. Dichtheitstest kommt es in der Regel zu einem Rückströmen aus der hydraulisch aufgeweiteten Rissfläche, d. h. der gemessene Druck steigt an und nähert sich dem Ruhedruck, was im Weiteren zur Eingrenzung des Ruhedruckes (= kleinste Minimalspannung) herangezogen wird.
- (6) Erneutes Aufreißen (innerhalb weniger Sekunden) und Risserweiterung (1. Refrac):  
**Überpumpdruck 2**
- (7) Beobachtung des Druckabfalls – Dauer 30 min: **Ruhedruck 2 (0,5h)**

Die kleinste Hauptnormalspannung ergibt sich aus dem Mittel von Ruhedruck 1 und 2.

Im Detail kann die Zeitdauer der Versuche individuell variieren und hängt im Wesentlichen von den geologischen Rahmenbedingungen ab (Homogenität des Salzgesteins, kristalliner Aufbau, Permeationsverhalten).

Ergänzend sollte während der Versuchszeit noch Konvergenzmessungen durchgeführt werden.

#### 5.4. Konvergenz

Der Untersuchungsort für das SAVER-Vorhaben liegt im Staßfurt-Steinsalz in einer Teufe von ca. 750 m, weshalb mit einer signifikanten jährlichen Strecken Konvergenz in der Größenordnung von 5-10 mm/Jahr zu rechnen war. Zur genaueren Bestimmung wurde begleitende in-situ-Messungen zur Bestimmung der Streckenkonvergenz bereits für das GESAV II-Vorhaben am Versuchsort durchgeführt. Dafür wurde vom IfG im November 2017 im Übergang der Strecke zum Streckenstummel 3 eine Konvergenzmessstelle mit jeweils zwei Festpunkt-Messstrecken zur Bestimmung von Vertikal- und Horizontalkonvergenz eingerichtet.

Die notwendigen Messbolzen wurden jeweils gegenüberliegend in der Mitte der Firste und auf halber Höhe der Stöße verankert. Der Messpunkt in der Sohle wurde zur Vermeidung von

Störungen in einer kurzen Sohlbohrung verankert. Die Messungen wurden in unregelmäßigen Abständen manuell durchgeführt.

Die Messungen wurden bis 2022 in größeren Abständen fortgesetzt (womit sich eine bessere Aussagefähigkeit), allerdings kam es bei den beim Rückbau zu einer (katastrophalen) Zerstörung der Messbolzen am Stoß,

, weshalb diese am 15.01.2024 neu installiert und vermessen werden mussten. Damit kann mittelfristig an die vorliegende Messreihe angeschlossen und langfristig fortgesetzt werden. Aktuell liegen dafür aber noch keine belastbaren Messreihen vor.

## 5.5. Verwendete Versatzmaterialien

Um das grundlegende Projektziel eines Materialvergleichs zu erfüllen unter Einhaltung des bereits bestehenden Konzepts (vgl. Abbildung 1, S. 8) wurden insgesamt 3 Materialien für die untertägigen Versuchsorte ausgewählt. Die 3 Materialien lassen sich in die Kategorien „Matrixstabilisierender Salzgrus“ (GESAV-Material), „Angefeuchteter Salzgrus“ (KOMPASS-Material) und „Trockener Salzgrus“ [Qualifizierter Salzgrusversatz (QSV)] einteilen und sind daher für die Verwendung geeignet.

### 5.5.1. GESAV-Material

GESAV-Material ist ein speziell im FuE-Projekt GESAV I entwickeltes Salzgrusgemisch, welches folgende Kriterien erfüllt:

- Optimierte Kornverteilungskurve an Fuller-Kurve für eine optimale Verdichtbarkeit zur Erreichung hohen Einbaudichte
- Setzungsstabilität
- Definierte Zusammensetzung aus ausschließlich arteigenen Komponenten, welche die Bildung einer thermodynamisch stabilen, damit langzeitbeständigen, Binderphase ermöglichen
- Minimaler Flüssigkeitsgehalt zur Vermeidung potenzieller Lösungspfade

Die Anwendbarkeit und die Bestimmung einer optimalen Versatzmethode wurden im GESAV-II-Projekt evaluiert. In dem FuE-Vorhaben, welches von 2017 bis 2021 durchgeführt wurde,

wurde die Kombination von Schleuderversatz mit anschließender Rüttelverdichtung als geeignet gewertet.

Mit der genannten Versatzmethode konnte ein Versatzfaktor von 0,99 sowie eine Einbaudichte von 1,62 t/m<sup>3</sup> erreicht werden. Durch die Verwendung des Materials im SAVER-Projekt können somit nicht nur die Ergebnisse validiert und mit anderen Materialien verglichen werden, sondern weitere Erkenntnisse über das In-Situ-Verhalten durch Versuche im Real-Maßstab gewonnen werden.

Das GESAV-Material besteht zu 85 Ma% aus Steinsalzgrus und zu 15 Ma% aus Salzbinderkomponenten. Die nach dem Erfolg vom GESAV-I-Projekt patentierte Zusammensetzung enthält folgende Komponenten:

Tabelle 4: Zusammensetzung GESAV-Material

| Komponente                                | Komponentengruppe        |            | Chemische Formel                         | Ger. Anteil in Massen-% | Lieferant im FuE-Vorhaben GESAV II |
|---|--------------------------|------------|--|-------------------------|------------------------------------|
| Steinsalzgrus-Fraktion 1 (FS)<br>0 – 1 mm | Salzgrus-Körnung         |            | NaCl                                     | 17,0                    | GSES mbH                           |
| Steinsalzgrus-Fraktion 2<br>0,1 – 2,0 mm  |                          |            | NaCl                                     | 29,9                    | GSES mbH                           |
| Steinsalzgrus-Fraktion 3<br>0,2 – 8,0 mm  |                          |            | NaCl                                     | 18,4                    | GSES mbH                           |
| Steinsalzgrus-Fraktion 4<br>2,0 – 12,0 mm |                          |            | NaCl                                     | 19,7                    | GSES mbH                           |
| Kieserit                                  | Polyhalit-Trockengemisch | Salzbinder | MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O     | 2,6                     | K+S Kali GmbH                      |
| Arkanit                                   |                          |            | K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>           | 3,3                     | Leuna Carboxylation Plant GmbH     |
| Calciumsulfat-Halbhydrat                  |                          |            | CaSO <sub>4</sub> · 0,5 H <sub>2</sub> O | 5,4                     | Knauf Gips KG                      |
| konz. Magnesiumchlorid-Lösung (5-molal)   |                          |            | MgCl <sub>2(aq)</sub>                    | 3,8                     | Deusa International GmbH           |

Durch Zugabe der Magnesiumchloridlösung wird eine Salzmineralneubildung initiiert, welche aus den Komponenten des Polyhalittrockengemischs über Primärkristallite (Syngenit und Kainit) die langzeitbeständige Binderphase Polyhalit bildet. Der respektive zeitliche Ablauf dieses Prozesses ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Salzbindebildung im GESAV-Material

| Zeithorizont                     | Ausgangszustand                  | Stunden – Tage   | Wochen – Monate                                |
|----------------------------------|----------------------------------|--|--|
| <b>Phasenbestand</b>             | Halit<br>Polyhalittrockengemisch | Halit →<br>Polyhalittrockengemisch ↓<br>Primärkristallinat ↑ | Halit →<br>Primärkristallinat ↓<br>Polyhalit ↑ |
| <b>Materialcharakterisierung</b> | Erdfeuchtes Schüttgut            | Verfestigtes Schüttgut                                       | Poröser Festkörper                             |

Eine Visualisierung des Prozesses bzw. des erwünschten Ergebnisses ist in Abbildung 19 dargestellt. Zwischen den Halitkörnern des Salzgruses bilden sich durch den Salzbinde Brücke und tragen so zur Matrixstabilisierung des gesamten Bauwerks bei. Die Salzbindebrücken füllen dabei nicht vollständig den Kornzwischenraum aus, sondern bilden Brücken zwischen den Körnern.

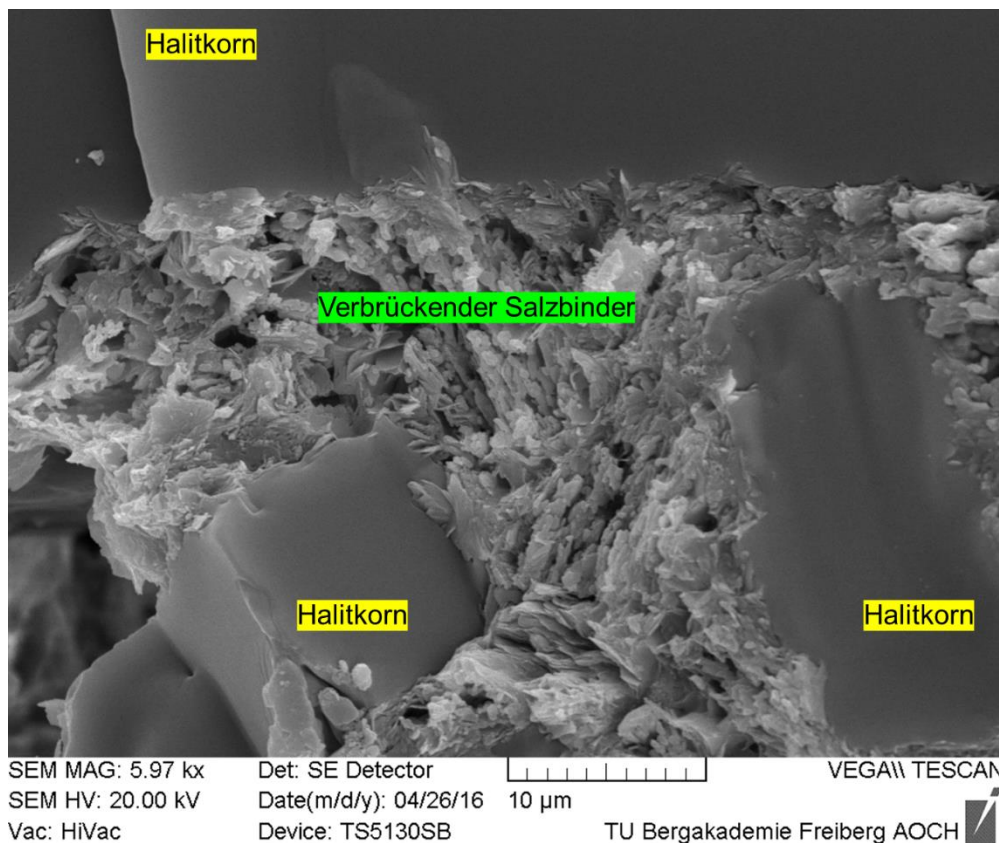


Abbildung 19: Aufnahme von GESAV-Material unter Rasterelektronenmikroskop [18]

## 5.5.2. KOMPASS-Material

Als KOMPASS-Material wird das Referenzmaterial aus dem KOMPASS-I-Vorhaben bezeichnet, welches ausschließlich aus Steinsalzgrus besteht und mit Süßwasser befeuchtet wird. Im KOMPASS-Projekt war die Zielstellung mehr Erkenntnisse über die Kompaktion von Salzgrus zu erhalten durch Laborexperimente und Modellierungen.

Bei der Auswahl des Salzgruses für das Vorhaben waren vor allen Dingen die Faktoren der Verfügbarkeit, Reproduzierbarkeit sowie die Herkunft aus dem Staßfurt-Steinsalz von besonderem Interesse. Als Zulieferer für das Material wurde ebenfalls die GSES ausgewählt, was ein weiterer Grund ist für die Symbiosemöglichkeit zwischen SAVER und KOMPASS. Die schlussendlich für das KOMPASS-Referenzmaterial charakteristische Korngrößenverteilung ist in Abbildung 20 dargestellt.

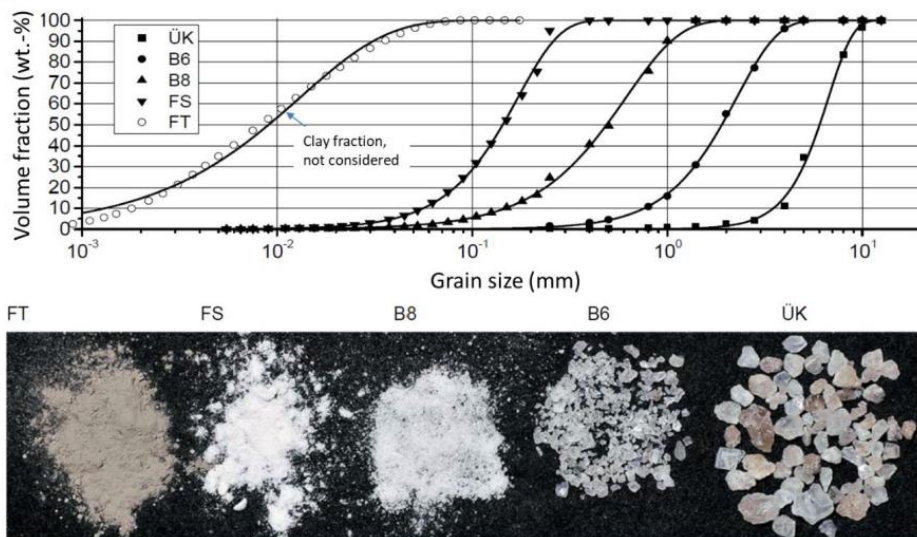


Abbildung 20: Korngrößenverteilung des KOMPASS-Referenzmaterials sowie Darstellung der einzelnen Kornfraktionen [6]

Da das KOMPASS-Material leicht bereitgestellt werden kann am Versuchsstandort in Sondershausen und es ein angefeuchteter Salzgrus ist, wurde es für die Verwendung im SAVER-Projekt ausgewählt. Da das KOMPASS-I-Projekt vor dem Beginn von SAVER abgeschlossen war, konnte somit ein Salzgrus genutzt werden über den bereits umfangreichen Kenntnissen aus Labortests und Modellierungen vorliegen. Durch die Verwendung in einem In-Situ-Großversuch unter realen Bedingungen können für das KOMPASS-Folgeprojekt wichtige Realdaten generiert werden, welche als Eingangsdaten für weitere Modellierungen genutzt und so ein Vergleich von Labor- zu In-Situ-Versuchen durchgeführt werden kann. Das KOMPASS-Material wird mit 1 Ma% Süßwasser angefeuchtet.

### 5.5.3. Trockener Salzgrus

In verschiedenen Projekten wurde Schnittsalz aus der Auffahrung der untertägigen Grubenbaue vorgesehen für die Verfüllung der Einlagerungsstrecken [13] [14] [3]. Dieses Material wird als naturtrocken bezeichnet, d. h. es beinhaltet lediglich seinen natürlichen Feuchtigkeitsgehalt und ist daher nahezu komplett trocken. In Hinblick auf eine Korrosionsvermeidung an der Behälteroberfläche der POLLUX-Container ist dies ein wichtiges Kriterium, damit der POLLUX über einen möglichst langen Zeitraum seine Barrierewirkung erfüllen kann.

Aus logistischen Gründen sowie durch das gegebene Budget ist es nicht möglich durch die GSES Schnittsalz in entsprechenden Mengen bereitzustellen, um in beiden Versuchsorten den Nahbereich um die POLLUX-Attrappen zu verfüllen. Da die Fräse meist in anderen Bereich im Bergwerk steht und sehr langsame Fahrgeschwindigkeiten aufweist, wäre eine Nutzung für das Projekt wirtschaftlich nicht umsetzbar gewesen. Zudem wären die Eingriffe in den regulären Grubenbetrieb damit zu groß gewesen. Daher wurde entschieden, dass ein Referenzmaterial genutzt wird, welches die Anforderungen an Feuchtigkeitsgehalt, Reproduzierbarkeit, Bereitstellbarkeit und Verdichtbarkeit erfüllt. Dementsprechend wurde eine Orientierung an der Fuller-Kurve mit einem Exponenten von 0,5 als geeignet erachtet, entsprechend den Ergebnissen im FuE-Projekt ELSA II [11]. Das in ELSA vorgeschlagene Material entspricht in seiner Korngrößenverteilung einer Fuller-Verteilung. Die Fuller-Verteilung sichert die dichteste Lagerung und gute Verdichtbarkeit bei stetigen Körnungen (keine vermeidbaren Lücken). Bei dem ELSA-Material handelt es sich um eine Mischung, die immer genau reproduziert werden kann, weil es aus einzelnen Fraktionen zusammen gemischt werden kann [18]. Die genauen Massenanteile der jeweiligen Kornfraktionen können Tabelle 6 entnommen werden. Im Projekt SAVER wurde das genutzte ELSA-Material als „Qualifizierter Salzgrusversatz“ bezeichnet, da es reproduzierbar ist und einen definierten Feuchtigkeitsgehalt aufweist (vgl. Abbildung 1, S.8). Das Material wurde im Nahbereich um die POLLUX-Dummies verwendet, da es das Kriterium des naturtrockenen Salzgruses erfüllt.

Tabelle 6: Massenanteile der verschiedenen Steinsalzfraktionen im ELSA-Material [11]

| <b>Mischungskomponenten</b> | <b>Anteile [Ma%]</b> |
|-----------------------------|----------------------|
| Überkorn (ÜK)               | 52,3                 |
| Band 6 (B6)                 | 21,4                 |
| Band 8 (B8)                 | 11,8                 |
| Feinsalz (FS)               | 14,5                 |

## 5.6. Versatzkörperaufbau und Versuchsdimensionierung

Der Entwurf des In-Situ-Versuchskonzeptes war ein zentraler Bestandteil des FuE-Projektes SAVER. Dabei war der Versuch so zu dimensionieren und entwerfen, dass die Versatzkörper möglichst realitätsnah erstellt werden, insbesondere in Hinblick auf den Einbau einer Behälterattrappe.

Durch den Einbau der Attrappe war es nötig insgesamt 3 Salzgrusmaterialien zu nutzen, um diese Anforderungen zu erfüllen. Entsprechend des Budgets wurde eine Kalkulation vorgenommen, um die maximale Versatzkörpergröße bestimmen zu können. Dieser Prozess wurde iterativ durchgeführt. Dabei war der bestimmende Leitfaktor die Größe des GESAV-Bauerwerkes, d. h. das Versatzkörpervolumen des KOMPASS-Versatzkörpers hat sich nach der des GESAV-Versatzkörpers gerichtet, da das GESAV-Material durch den Anteil an Salzbinderkomponenten signifikant teurer ist als reine Salzgrusmaterialien wie das KOMPASS-Material, das ausschließlich aus Steinsalzfraktionen besteht, ohne Zusatz von Salzbindern.

Auf Grund der geopolitischen Lage zum Zeitpunkt der Materialbeschaffung im Jahr 2022 waren die Preise im Vergleich zum Zeitpunkt der Projektkalkulation (2020) massiv angestiegen. Die Nachfolgen der COVID-Pandemie allein haben zu einem generellen Anstieg geführt, kritischer war jedoch der Beginn des Krieges in der Ukraine. In Europa sind Deutschland, Russland sowie Belarus die größten Kaliproduzenten [19]. Durch die Sanktionen und entsprechende Verknappung des Angebotes von Kali auf dem freien europäischen Markt war im

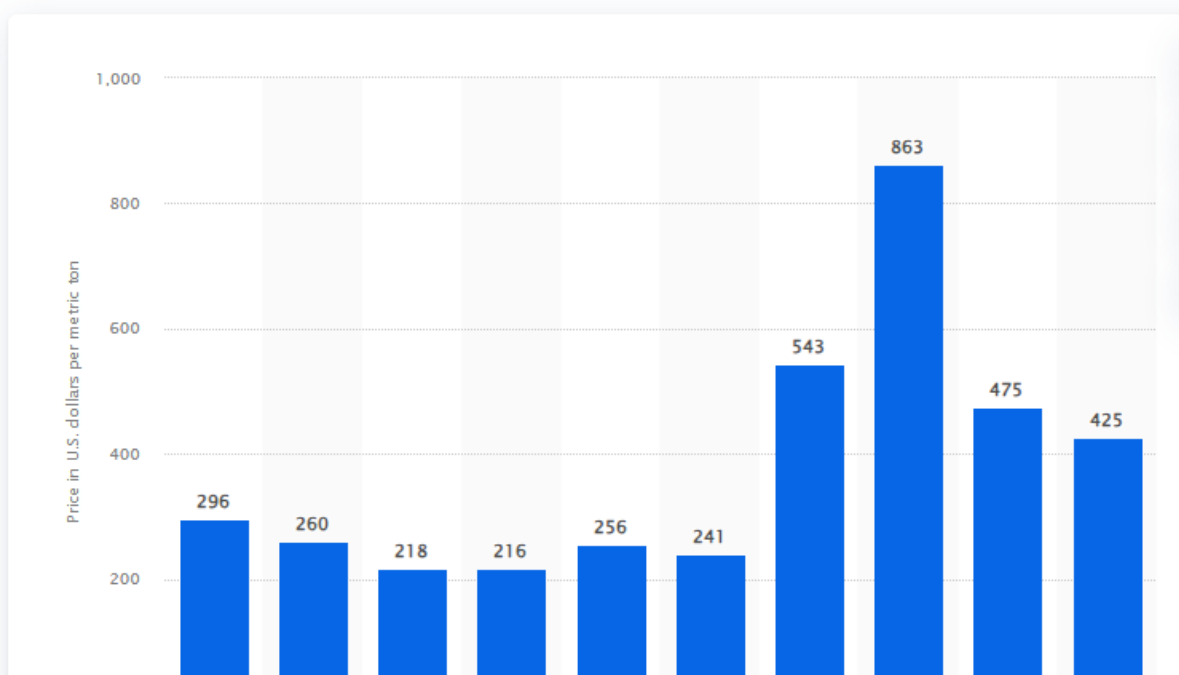


Abbildung 21: Spotpreis [US\$/t] Kali 2015 – 2024 [21] nach [22]

Vergleich zu 2020 eine ungefähre Vervielfachung des Spot-Preises auf dem Kalimarkt im Jahr 2022 zu verzeichnen (Abbildung 21).

Da die Salzbinder in einem festen Mischverhältnis zum Steinsalzgrus stehen, richtete sich die Dimensionierung des GESAV-Bauwerks, und damit auch die des KOMPASS-Bauwerks, nach der Marktlage 2022. Die genaue Dimensionierung sowie der Aufbau werden in folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

### 5.6.1. Versatzkörper aus GESAV-Material

Der GESAV-Versatzkörper besteht aus 2 Materialzonen (Abbildung 22). Im hinteren Bereich des POLLUX-Dummies wird QSV für die Verfüllung im Schleuderverfahren eingesetzt. Der Abstand der Böschung des QSV-Bereichs zum nächsten POLLUX-Kante wurde auf 1 m in einem 90° Winkel zur Böschung festgelegt. Dementsprechend ergibt sich eine geplante Gesamthorizontallänge 6,6 m im QSV-Bereich. 1 m Abstand entspricht der doppelten in-situ-ermittelten Verdichtungstiefe der Rüttelplatte, somit ist eine Vibrationsbeeinflussung des Dummies ausgeschlossen.

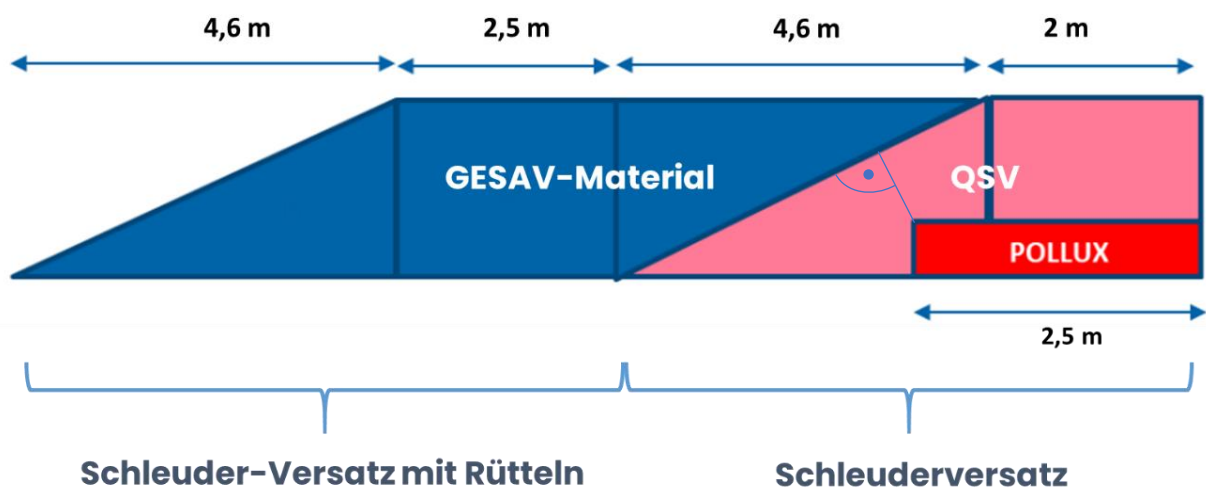


Abbildung 22: Querschnitt und schematischer Aufbau des GESAV-Bauwerks

Für den Bereich des GESAV-Materials wurde festgelegt, dass die Länge des mittleren Teils, also des Verschlusses über den gesamten Querschnitt, mind. 2,5 m betragen soll, da dort eine Setzungssonde und weitere Messtechnik positioniert werden.

Unter Berücksichtigung des zu erwartenden Böschungswinkels wurde dementsprechend die Gesamtlänge des Bauwerks auf 13,7 m festgelegt. In Kombination mit den 3D-Laserscans konnten damit präzise die zu bestellenden Mengen an Salzgrus und Salzbinderkomponenten ermittelt werden. Eine Materialabschätzung allein über den theoretischen Querschnitt von 5 m 3 m wäre zu ungenau gewesen, da bedingt durch das Nachfräsen der Querschnitt nicht durchgängig über den ganzen Querschlag identisch ist. Dadurch muss davon ausgegangen werden, dass im hinteren Bereich des QSV mehr Material eingebracht werden muss. Die für die Massenberechnung angenommenen Dichten wurden für das QSV-Material aus dem BAMBUS-II-Bericht (Schnittsalz  $1,4 \text{ t/m}^3$ ) und für das GESAV-Material aus dem GESAV-II-Bericht übernommen ( $1,55 \text{ t/m}^3$ ) [14] [2].

### 5.6.2. Versatzkörper aus KOMPASS-Material

Auf Grund der unter 5.6 beschriebenen Rahmenbedingungen wird die Dimensionierung des KOMPASS-Bauwerks analog zum GESAV-Bauwerk durchgeführt. Dadurch ergibt sich ebenfalls eine geplante Gesamtlänge von 13,7 mit jeweils gleichen Größen der 2 Teilbereiche aus KOMPASS und QSV (Abbildung 23).

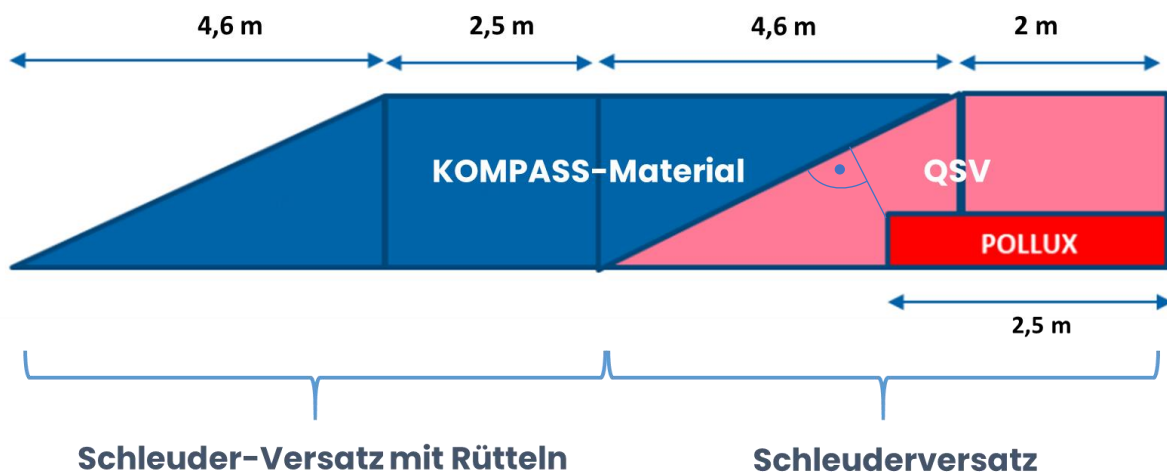


Abbildung 23: Querschnitt und schematischer Aufbau des KOMPASS-Bauwerks

Da für GESAV-Material der erzielbare Böschungswinkel bekannt ist und es sich zum Einbauzeitpunkt wie ein Schüttgut verhält (die initiale Stabilisierung tritt erst nach ca. 24 h ein), wurde derselbe Böschungswinkel für die Berechnung des KOMPASS-Bauwerks angenommen.

Analog zur Berechnung beim GESAV-Versatzkörper wurde die zu verfüllende Materialmenge an QSV über die 3D-Laserscans berechnet sowie die Annahme der Dichte aus dem BAMBUS-II-Projekt.

Für die Abschätzung der Menge an benötigtem KOMPASS-Material wurde dieselbe Dichte wie für GESAV angenommen, da beide Materialien einen Feuchtigkeitsanteil aufweisen und für KOMPASS-Material noch keine In-Situ-Daten zur realisierbaren Einbaudichte vorliegen.

## 5.7. Entwicklung Behälterattrappe

Da ein originaler, beladener POLLUX-Container bis zu 65 t wiegen kann und die Herstellungspreise hoch sind, war es im SAVER-Projekt vorgesehen eine maßstabsgetreue Attrappe zu entwerfen und zu bauen [20]. Dies geschah unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Transportbarkeit durch vorhandene Technik (Schacht und Teleskoplader)
- Vergleichbare Geometrie wie ein originaler POLLUX-Behälter
- Keine Wechselwirkungen mit dem Salzgrus
- Korrosionsbeständigkeit
- Mechanisch stabil gegenüber Belastung durch Eigengewicht des Versatzes
- Beibehaltung der Form unter Eigengewicht des Versatzes
- Erfüllung oben genannter Kriterien und Einhaltung des zugeteilten Budgets

Durch den Einbau eines POLLUX-Dummies soll der Realitätsgrad der untertägigen In-Situ-Versuche erhöht werden, um so Informationen über ggf. vorhandenen mechanische Wechselwirkungen zu generieren und in der Zukunft die Rückholbarkeit der Attrappe zu simulieren für die 3 verwendeten Salzgrusmaterialien.

Auf Grund der gesamten horizontalen Bauwerkslänge von 13,7 m (gemessen von Ortsbrust bis Böschungsfuß) sowie der Einschränkungen durch die Schachtkapazität der GSES konnte die Länge von 5,5 m eines tatsächlichen POLLUX-Behälters nicht eingehalten werden [20]. Je nach Beladung können die Dimensionierungen der Behälter laut aktuellem Stand anders ausfallen, d. h. es sind noch keine abschließenden, verbindlich festgelegten Maße für POLLUX-Container vorhanden. Konzepte sehen Durchmesser von 1,2 m bis 2 m als möglich an [21] [20]. Somit konnten unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Forschung, den Einschränkungen beim Transport (Max. förderbarer Durchmesser im Schacht der GSES ohne Einschränkung des Regelbetriebes sind 1,3 m und 2,5 m Länge), der Berücksichtigung des Budgets, der verfügbaren Materialien sowie den oben genannten Kriterien die in Tabelle 7 aufgeführten Dimensionen ermittelt werden.

Tabelle 7: Iterierte Dimensionen der POLLUX-Attrappe

|                        | <b>Original</b> | <b>Attrappe</b> |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Durchmesser [m]</b> | 1,2 – 2,0       | 1,3             |
| <b>Länge [m]</b>       | 5,5             | 2,5             |

Die Länge der Attrappen entspricht ca. 50 % des Originals. Dies ist jedoch nicht einschränkend, da trotzdem noch repräsentativ untersucht werden kann, wie die Druckverteilung und Wechselwirkung zwischen POLLUX-Attrappe und umliegenden Versatzkörper sind, da der Durchmesser der entscheidendere Faktor ist und dieser im Realbereich liegt. Nach Festlegen der Dimensionen wurde kategorisch nach geeigneten Materialien gesucht, welche die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich der Verformungen erfüllen. Es wurde festgestellt, dass glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) geeignet sein kann. Typische, zylindrisch geformte GFK-Rohre finden häufig Anwendung im Spezialtiefbau zur Herstellung von Wasser- und Abwasserkanälen. Dementsprechend wurde eine Vorauswahl an Herstellern kontaktiert. Für die Anwendung im Entwässerungsbau gelten hohe Qualitätsstandards, weshalb teilweise Rohre in B-Qualitäten aussortiert werden. B-Qualität bedeutet in diesem Fall, dass die Oberfläche der Rohre bspw. zerkratzt ist oder die GFK-Textur teilweise Abweichungen aufweist, was für den Anwendungsfall im Projekt aber keine negativen Einschränkungen bedeuten würde. Die Firma HOBAS hat ein 6 m langes GFK-Druckrohr aus der Flowtite-Serie bereitgestellt, welches leichte Oberflächenkratzer aufwies (Abbildung 24).

Nach Anlieferung bei der GSES in Sondershausen wurde das 6 m lange und 1,3 m hohe Rohr in 2 Stücken zu jeweils 2,5 m und einem Stück zu 1 m zerlegt (Abbildung 26; S. 39). Das Zerschneiden wurde mit einem handelsüblichen Winkelschleifer vorgenommen. Nachdem die geforderten Stücke geschnitten wurden, fand der Transport nach unter Tage durch die GSES statt.



Abbildung 24: 6 m GFK-Druckrohr der Fa. HOBAS (Foto Autor)

Trotz der Wandstärke (Abbildung 25) und der zertifizierten Stabilität des Materials von 5000 N/m<sup>2</sup> [22] wurde entschieden, dass für erhöhte Sicherheit gegen Verformung zudem jeweils 3 Spindeln aus Stahl pro Segment eingebracht werden.

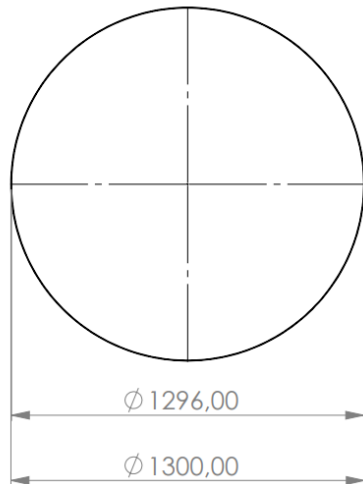


Abbildung 25: Wandstärke des GFK-Rohres und Querschnitt (Herstellerzeichnung)



Abbildung 26: Zerlegen des GFK-Rohres in benötigte Stücke (Foto Jentzsch)



Abbildung 27: Aussteifung der Dummies mit Stahlspindeln (Foto Autor)



Abbildung 28: Versiegelung des Ringraums zwischen Abdeckung und Dummy (Foto Autor)

Die Stahlspindeln wurden über Kreuz verschweißt und mit einem Gewinde an den Enden versehen auf denen Ankerplatten aufgeschraubt waren. Damit konnten die Spindeln form- und kraftschlüssig in das Innere der POLLUX-Dummies eingesetzt und verspannt werden (Abbildung 27). Anschließend wurden passgenaue und längsverstärkte Pressspannabdeckungen in die offenen Enden eingesetzt, damit nach dem Einbau kein Material in den Hohlraum im Rohr rutscht. Der Ringspalt zwischen den Deckeln und dem Rohr wurde mit Bauschaum verschlossen (Abbildung 28). Die 3 Spindeln wurden jeweils am Anfang, Ende und unter der später montierten Druckplatte eingebracht, um maximale Stabilität zu erreichen.

## 5.8. Messkonzept

Da im SAVER-Projekt der Aufbau der untertägigen Versatzkörper von denen im GESAV-II-Projekt abweicht, war es nötig ein darauf abgestimmtes Messkonzept zu entwickeln, welches die zu messenden Parameter effektiv erfassen kann. Dabei soll es möglich sein aus den Teilbereichen, die mit verschiedenen Materialien versetzt sind, individuelle Ergebnisse zu erhalten und ggf. Wechselwirkungen analysieren zu können.

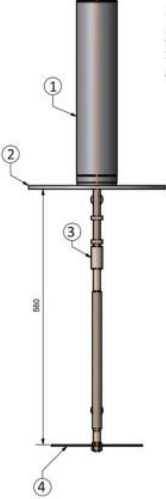



Die grundsätzlich verwendete Technik wurde aus dem GESAV-II-Projekt übernommen, d. h. es wurden die gleichen Sensor- und Sondentypen verwendet, da diese sich bereits über mehrere Jahre im Salz bewährt haben.

Das Messkonzept und die Sensorverteilung wurde in beiden Versatzkörpern gleich ausgeführt. Insgesamt enthält jedes Bauwerk 10 Feuchtigkeits- und Temperatursensoren, 2 Setzungssonden, 2 Druckplatten und 1 Messkarte zum Überwachen des Grubenklimas.

Die benötigte Technik wurde teilweise zurückgewonnen, zu Teilen neu bestellt und zu Teilen repariert. Die gesamte verwendete Messtechnik wurde vor dem untertägigen Einbau im Labor oder in-situ auf Funktionalität überprüft. Die Daten aller Sensoren und Sonden werden in 30-Minuten-Intervallen durch die jeweilig angeschlossenen Datenlogger erfasst. Das Auslesen der Daten aus den Loggern erfolgt über Ethernet (IMKO) oder USB-C (Glötzl). Nach lokaler Speicherung auf einem Laptop, werden diese in Freiberg ausgewertet und in die bauwerkspezifische Datenbank eingepflegt. Die Aufbereitung, Darstellung und Analyse erfolgten unter Verwendung von Microsoft Excel.

In Tabelle 8 auf Seite 42 sind die verwendeten Sensor- und Sondentypen in einer Übersicht dargestellt mit einer Zuordnung zu den jeweiligen Herstellern und den gemessenen Parametern. Die dort gelisteten Geräte haben über den gesamten Projektzeitraum zuverlässig gemessen. Messausfälle waren lediglich den Datenloggern geschuldet. Bei dem IMKO-Logger mussten die Notstrombatterien gewechselt werden, welche für ein kontrolliertes Herunterfahren des Loggers sorgen bei einem Stromausfall im Grubengebäude. Sind diese leer oder entladen fährt der Logger unverzüglich herunter, was zu einem Totalverlust der Daten führt, welche zwischen dem Zeitpunkt des letzten Auslesens und des Stromausfalls aufgezeichnet wurden.

Tabelle 8: Verwendete Sensoren und Sonden

| Hersteller         | Typ                             | Anzahl/Bauwerk | Erfasste Werte  | Bild   |
|--------------------|---------------------------------|----------------|---|--|
| Glötzl GmbH        | Wegaufnehmer GWLO 22/250        | 2              | Setzung in mm   |  <p>1 Gehäuse für Wegsensor<br/>2 Firstanschlussplatte<br/>3 Messgestänge<br/>4 Messplatte</p> <p>(Fa. Glötzl)</p> |
| Glötzl GmbH        | Druckmessgeber Typ E25/25 AU Z4 | 2              | Druckdifferenz in bar   |  <p>Abb.: Ele<br/>Kis</p> <p>(Fa. Glötzl)</p>   |
| IMKO GmbH          | PICO32                          | 10             | Temperatur in °C<br><br>Feuchtigkeit in %<br><br>Leitfähigkeit in mS/cm |  <p>(Fa. IMKO)</p>   |
| CiK Solutions GmbH | HAXO-8                          | 1              | Temperatur der Grubenwetter in °C und relative Luftfeuchtigkeit in %    |  <p>(Fa. CiK-Solutions)</p>  |

### 5.8.1. Sensorverteilung

Die Feuchtigkeits- und Temperatursensoren sind zu gleichen Teilen in den beiden Materialbereichen verteilt, um sowohl die Kontaktzone zu überwachen, als auch eine eventuelle Feuchtigkeitsmigration hin zum POLLUX-Dummy. Durch die Platzierung von insgesamt 4 Sensoren an der Kontaktzone zwischen GESAV-bzw. KOMPASS-Material zum QSV, können wichtige Daten aufgenommen werden.

Die Setzungssonden wurden in beiden Bereichen in die Firste eingesetzt und messen die Setzung der einzelnen Bereiche, womit Aussagen getroffen werden können über die jeweilige materialspezifische bzw. bereichsspezifische Setzung.

Die Druckplatten wurden im vorderen Bereich direkt auf die Sohle gesetzt und im hinteren Bereich auf den POLLUX. Zwischen POLLUX und Druckplatte wurden an den Radius des POLLUX-Dummies angepasste Kunststoffplatten gesetzt, damit eine ebene Auflagefläche generiert wird (Abbildung 29). Unter der Druckplatte befindet sich jeweils eine Stahlspindel, welche als festes Widerlager zusätzlich zum Dummy selbst funktioniert. Die Druckplatten befinden sich in allen Materialzonen senkrecht unter den Setzungssonden (Abbildung 30 und Abbildung 31).



Abbildung 29: Druckplattenaufbau auf POLLUX (Foto Autor)

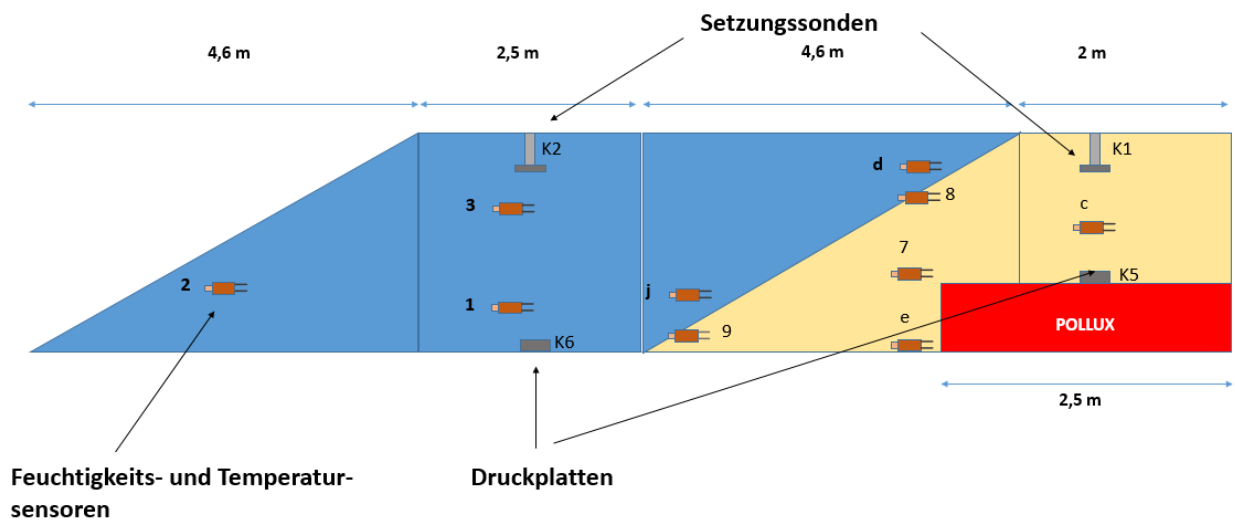


Abbildung 30: Messtechnik im GESAV-Bauwerk

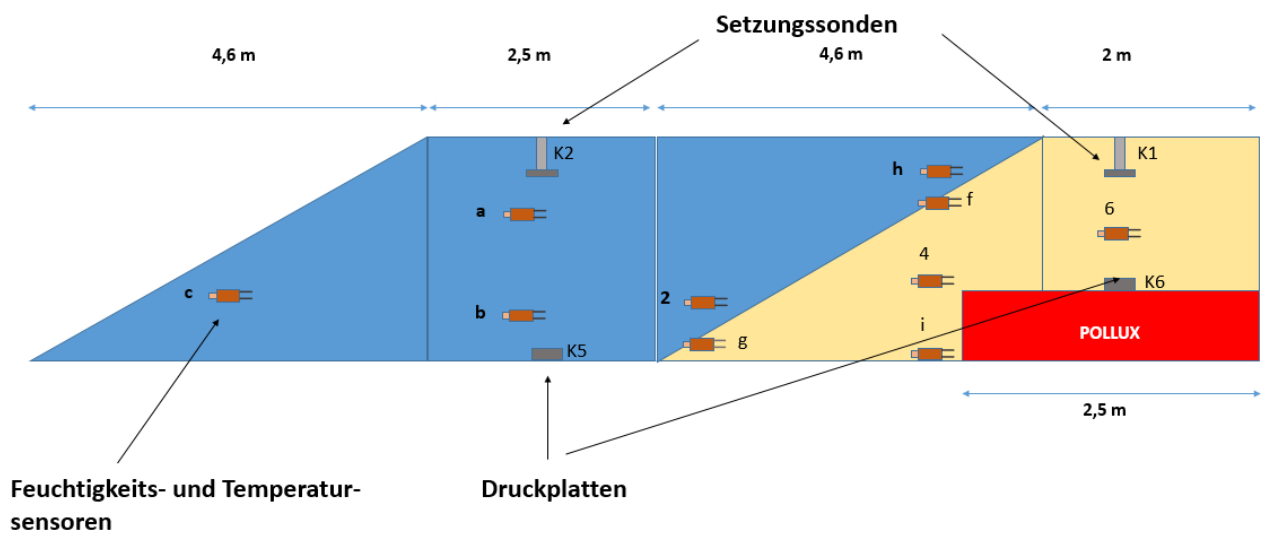


Abbildung 31: Messtechnik im KOMPASS-Bauwerk

## 5.8.2. Kalibrierung

Aus den Versatzkörpern des GESAV-II-Projektes konnten 4 Setzungssonden erfolgreich zurückgebaut werden, weshalb eine erneute Kalibrierung nicht notwendig war. Von den zurückgewonnenen Sonden wurde eine zur Reparatur an den Hersteller Glötzl eingeschickt. Bei den Setzungssonden ist keine materialspezifische Kalibrierung nötig, sondern lediglich das Nullen beim Auslesen durch den Datenlogger.

Die Druckplatten wurden beim Rückbau der Versatzbauwerke zerstört, woraufhin 4 neue bestellt wurden, welche vom Hersteller (Glötzl) kalibriert wurden. Bei Erhalt durch die TUBAF wurde durch Verwendung von Gewichten und einer Schwerlastwaage diese Kalibrierung validiert.

Für die Feuchtigkeits- und Temperatursonden war für GESAV-Material bereits eine Kalibrierungskurve vorhanden, welche vor der Auslieferung durch den Hersteller IMKO auf die Sensoren aufgespielt wurde. Für das KOMPASS- und QSV-Material wurde die Kalibrierung in Zusammenarbeit mit IMKO im Labor der TUBAF durchgeführt (Abbildung 32). Dafür wurden die Sensoren in das jeweilige Material eingeführt und die Feuchtigkeit gemessen. Da die natürliche Feuchtigkeit für das Steinsalz vom Standort Sondershausen bekannt ist, konnte die Kalibrierung erstellt werden. Beim KOMPASS-Material wird 1 Ma.-% Süßwasser hinzugegeben und der QSV wird naturtrocken eingebaut. Die gemessenen Werte und theoretisch zu erzielenden Werte wurden digital an IMKO-Ansprechpartner übermittelt, welche dann die Kalibrierungskurve erstellt haben und einen Korrekturfaktor berechnet haben. D. h. alle Sensoren haben die Kalibrierung auf GESAV-Material, jedoch wird bei der Auswertung der Daten aus den KOMPASS- und QSV-Bereichen, der individuelle materialspezifische Korrekturfaktor berücksichtigt, wodurch die genauen Feuchtigkeiten ermittelt werden können.



Abbildung 32: Kalibrierung der Feuchtigkeitssensoren im Labor der TUBAF (Foto Autor)

## 5.9. In-Situ-Probenkampagne

Da in GESAV II keine Proben aus dem gesamten Bauwerk während des Einbauvorgangs gewonnen wurden, wurde im SAVER-Projekt ein entsprechendes Konzept erarbeitet. Ziel ist dabei aus den verschiedenen Materialbereichen In-Situ-Proben zu generieren und so Erkenntnisse über die initialen materialspezifischen Einbaudichten, Permeabilitäten sowie Festigkeiten zu erhalten.

Dabei wurden für jeden Versatzkörper 4 Ebenen festgelegt, aus denen Proben entnommen werden sollen (Abbildung 33). Pro Ebene waren 12 Proben vorgesehen, was in Summe eine theoretische Probenzahl von 48 Proben pro Bauwerk ergibt. Dabei befindet sich eine Entnahmeebene im QSV-Bereich, eine in der Kontaktzone und 2 im GESAV- bzw. KOMPASS-Materialbereich.

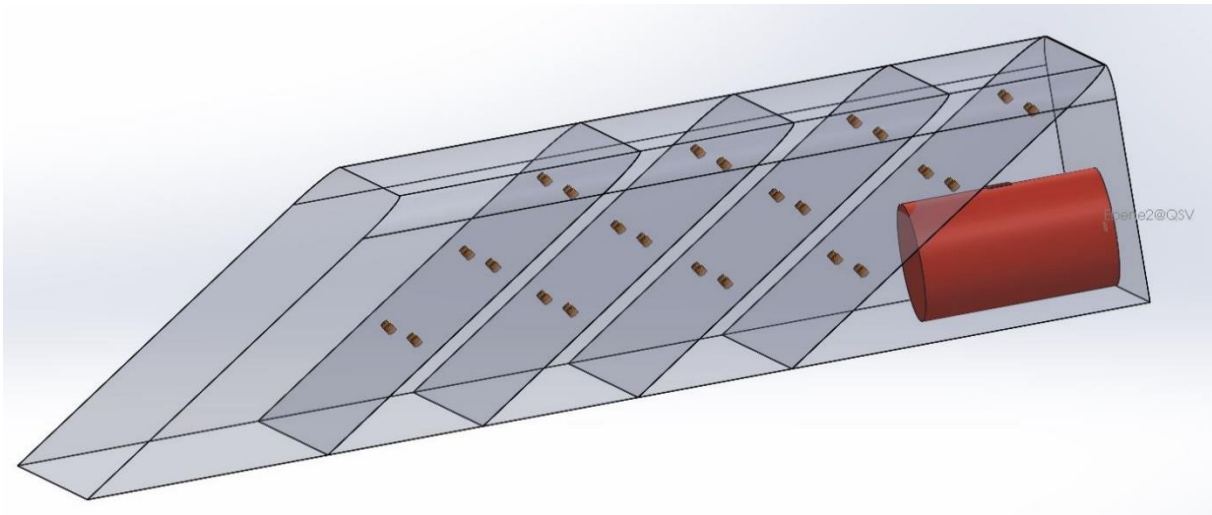


Abbildung 33: Probenverteilung in den Bauwerken

Pro Ebene war es vorgesehen, dass 50 % der Proben im Bauwerk verbleiben und zu einem zukünftigen Zeitpunkt gezogen werden, während 50 % direkt beim Einbau gewonnen werden. Die Probengefäße wurden aus KG-Rohren hergestellt und weisen daher durch ihre Nicht-Verformbarkeit Zwangsflächen auf. Um einen Einfluss dieser ausschließen bzw. quantifizieren zu können, wurden verschiedene Probegefäße konzipiert und eingebaut. Insgesamt wurden 2 Typen verbaut (Abbildung 34). Typ 1 war ein KG-Rohrstück mit 150 mm Länge und 100 mm Durchmesser, welches an beiden Seiten offengelassen wurde. Typ 2 war ein KG-Rohrstück mit 100 mm Länge und 100 mm Durchmesser, welches beim Einsetzen (vor dem Verfüllen) auf der einer Seite durch einen Deckel verschlossen war. Pro Ebene sollten von den 12 Proben 3 der initial gezogenen Proben von Typ 1 und 3 Stück von Typ 2 sein, so dass dementsprechend 3 vom Typ 1 und 3 vom Typ 2 im Bauwerk verbleiben.

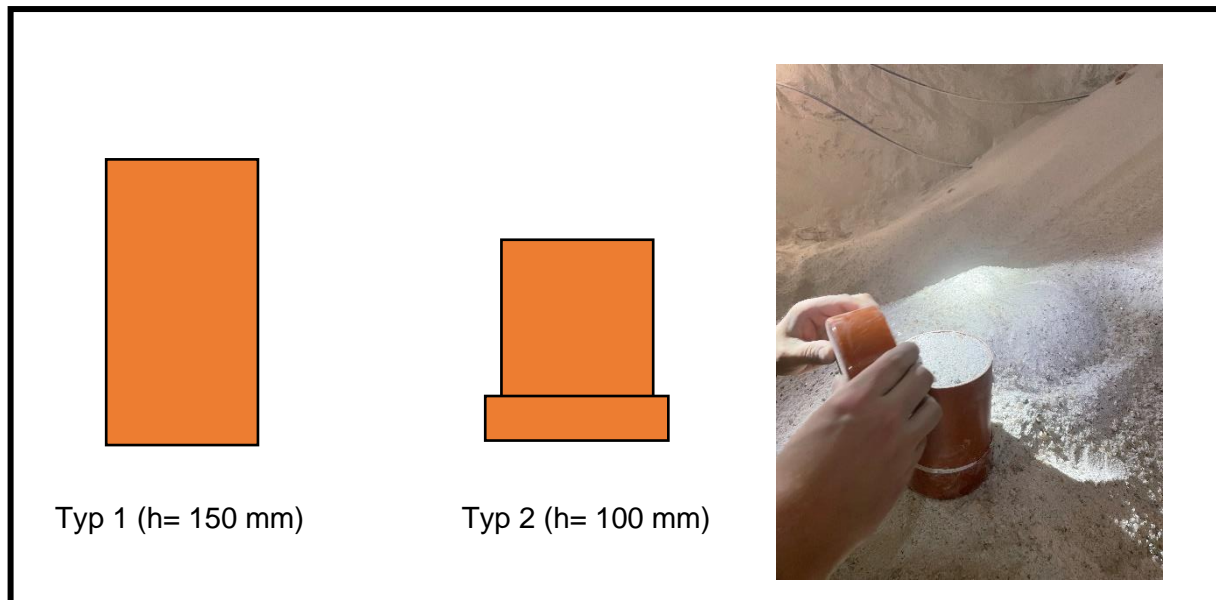


Abbildung 34: Probentypen 1 und 2 (rechts Realität; Foto Autor)

## 5.10. Untersuchte Parameter

Um einen Vergleich der Materialeigenschaften durchzuführen, wurden zu Projektbeginn im Zuge der Versatzbauwerkkonzeptionierung die zu messenden Parameter definiert. Diese sollen in beiden Versuchsbauwerken überwacht werden und nach der anschließenden Auswertung verglichen werden. Da im SAVER-Projekt zu großen Teilen die zu messenden Eigenschaften aus dem GESAV-II-Projekt übernommen wurden, ermöglicht dies nicht nur den Vergleich von den 3 Versatzmaterialien, sondern auch eine Verifizierung der in GESAV II generierten Daten.

Grundsätzlich sollen die Daten einen Aufschluss darüber geben, wie sich der jeweilige Versatzkörper hinsichtlich seiner geometrischen, mechanischen und geochemischen Eigenschaften im zeitlichen Verlauf entwickelt. Falls möglich, sollen damit Aussagen zur Langzeitentwicklung getroffen werden, was insbesondere in Hinblick auf die geologischen Zeithorizonte in der Endlagerung von großem Interesse ist.

### 5.10.1. Setzung

Die Setzung des Materials beschreibt, wie groß der Abstand zwischen Firste und Oberfläche des Versatzbauwerkes im zeitlichen Verlauf wächst. Grundsätzlich ist ein möglichst geringer Firstspalt anzustreben und dementsprechend auch eine Minimierung der Setzung, insofern materialspezifisch überhaupt möglich. Eine möglichst kleiner Firstspalt führt nicht nur

Hohlraumreduzierung, und damit zu einer Reduktion von möglicher Feuchtigkeitsmigration, sondern auch zu einem früheren Auflaufen des Gebirges auf den Versatzkörper, bedingt durch die natürliche Konvergenz. [2]

Die Setzung der untertägigen Versatzkörper wird mit Setzungs-Sonden der Firma GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH überwacht (vgl. Tabelle 8 S.42). Pro Versatzkörper wurden 2 Sonden verbaut. Beim Einbau wird das Gehäuse für den Wegsensor komplett in die Firste eingebracht in ein vorher gebohrtes Kernbohrloch. Die Sonde wird so weit in das Kernbohrloch eingeführt, bis das Gehäuse komplett darin verschwunden ist und die Firstanschlussplatte am Gebirge anliegt. Zur Befestigung der Sonde wird die Firstanschlussplatte mit Schrauben in die Firste geschraubt. Die Messplatte und das Gestänge an dem diese befestigt ist, ist frei beweglich und folgt der Bewegung des Versatzkörpers.

#### 5.10.2. Temperatur

Die Überwachung der Temperaturentwicklung innerhalb der Versatzkörper wird mit Sonden der Firma IMKO Micromodultechnik GmbH ausgeführt (vgl. Tabelle 8 S.42). Da die verbauten POLLUX-Attrappen nicht wärmegenerierend sind, wie z. B. im TSS-Projekt, wird erwartet, dass die gemessenen Temperaturen in einem Bereich zwischen den Temperaturen der Grubenwetter und der natürlichen Gebirgstemperatur liegen.

In jedem Versatzkörper wurden in jeden der jeweiligen 2 Materialzonen 5 dieser Sensoren eingebracht. Die Positionen und Anordnung wurde vorher im Messkonzept definiert. Durch eine fest definierte Verteilung über den gesamten Querschnitt, können detaillierte Werte aus dem gesamten Bauwerk aufgenommen und einer genauen Position zugeordnet werden. Die Sensoren werden in das bereits verschleuderte bzw. verdichtete Material eingebracht.

#### 5.10.3. Feuchtigkeit

Die PICO32-Sensoren zur Temperaturmessung erfassen ebenfalls die Feuchtigkeit sowie Leitfähigkeit. Durch die beschriebene gleichmäßige Verteilung in den Bauwerken können Einblicke in Feuchtigkeitsmigrations- oder- Trocknungsprozesse gewonnen werden. Die strategische Anordnung der Sensoren übereinander wurde gewählt, um ggf. Migrationsprozesse innerhalb des Bauwerks in Richtung des Gravitationsvektors zu erfassen. Zudem wurden gezielt Sensoren an und um die POLLUX-Attrappen angeordnet, um somit zu kontrollieren, ob

Feuchtigkeit aus den vorderen Materialbereichen in den QSV-Bereich migriert und so ein potentielles Korrosionsrisiko für einen realen POLLUX darstellen kann.

Durch die Sensorkonzentration an den Materialkontaktzonen sowie der gleichen Verteilung in beiden Bauwerken können Feuchtigkeitsentwicklung und potentielle Wechselwirkungsprozesse innerhalb der Versatzkörper detailliert in einem dreidimensionalen Raum erfasst, ausgewertet und bauwerksabhängig verglichen werden.

#### 5.10.4. Druck

Im GESAV-II-Projekt haben sich die Druckmessgeberplatten der Firma GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH (vgl. Tabelle 8 S. 42) als geeignete Instrumente bewährt, um die Entwicklung innerhalb des GESAV-Materials nachvollziehen zu können, da die Matrixstabilisierung den Auflagerdruck des Versatzkörpers beeinflusst und dieser somit messtechnisch erfasst werden kann. Auf Grund dessen wurden diese in das SAVER-Projekt übernommen. Nicht nur können damit die intern im GESAV-Materialbereich stattfindenden Umbildungsprozesse nachvollzogen werden, sondern für alle Materialbereiche und die beiden Versatzkörper der Einfluss der natürlichen Konvergenz.

Die Druckplatten wurden in beiden Bauwerken einmal auf der Sohle aufgesetzt und mit Schrauben befestigt (vorderer Bereich, also im GESAV- bzw. KOMPASS-Bereich) sowie in den hinteren Bereichen auf den POLLUX-Dummies in einer Flucht mit der sich in der Firste befindenden Setzungssonde. Da die Dummies auf Grund Ihrer zylindrischen Form keine ebene Auflagefläche bieten für die horizontalen Druckplatten, wurden speziell angepasste Platten aus Polyoxymethylen auf die POLLUX-Dummies aufgebracht. Diese hatten auf einer Seite den Radius der Dummies und auf der anderen eine ebene Auflagefläche, so dass die Platten damit formschlüssig angebracht werden konnten (Abbildung 29 S. 43).

Da in allen Materialbereichen Druckplatten verbaut wurden können bereichsabhängig Konvergenzeinflüsse innerhalb der Bauwerke untersucht werden sowie potentielle gegenseitige Beeinflussungen. Da die Böschungslänge 4,6 m in den Materialübergangsbereichen beträgt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass bspw. verschiedene Konvergenzen und Materialeigenschaften (wie z. B. Stabilisierung bei GESAV-Material) die Druckverteilung im QSV-Bereich beeinflusst.

### 5.10.5. Phasenbestand Salzbinder

Zur Bestimmung des Mineralphasenbestandes des Salzbinders wurde die Röntgenpulverdiffraktometrie eingesetzt. Anhand stoffspezifischer Röntgenbeugungsmuster (Referenzdaten) wird so qualitativ der kristalline Phasenbestand einer Probe ermittelt. Die Messungen erfolgten an fein pulverisierten Proben aus den Versatzprobekörpern. Die Messungen wurden mit einem Röntgendiffraktometer D8 Discover (Fa. Bruker) mit Cu-K $\alpha$ -Strahlung ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) durchgeführt (Geräteparameter: Festblende mit 0,6 mm Blendenöffnung und 2,5° primärer Soller; 5,6mm sekundärseitige Blende und 2,5° Soller, Lineardetektor Lynx-Eye XE-T; Generatorleistung 40 kV / 40 mA). Die Proben wurden als Flachpräparat in Reflexion im 2-Theta-Bereich von 5 - 70° mit einer Schrittweite von 0,0203° und 1s Zählzeit vermessen, was einer Messzeit pro Probe von ca. 1h entspricht.

### 5.10.6. Verfüllungsgrad

Das Verhältnis von Versatzkörpervolumen zu Versatzraumvolumen wird über den Verfüllungsgrad definiert. Der Verfüllungsgrad ist sowohl für die Bilanzierung als auch die Planung des Versatzbetriebes in konventionellen Bergwerken als auch Endlager von Bedeutung. Der Verfüllungsgrad kann bei theoretischen Berechnungen den Wert „1“ übersteigen, was aussagt, dass die einzubringenden Versatzvolumina das Volumina der dafür vorhergesehen Strecken übersteigt. Ein tatsächliches praktisches Einbringen des Materials ist dann nicht möglich.

$$V_G = \frac{V_{VK}}{V_{VR}} \quad (1)$$

|          |                            |                   |
|----------|----------------------------|-------------------|
| $V_G$    | Verfüllungsgrad            | [-]               |
| $V_{VK}$ | Volumen des Versatzkörpers | [m <sup>3</sup> ] |
| $V_{VR}$ | Volumen des Versatzraums   | [m <sup>3</sup> ] |

In Endlagern für hochradioaktive Abfälle wird grundsätzlich ein Vollversatz und damit ein Verfüllungsgrad von nahezu „1“ angestrebt [2]. Durch die 3D-Vermessung der Versuchsorte im SAVER-Projekt vor und nach dem Einbringen des Versatzmaterials kann annähernd der Verfüllungsgrad bestimmt werden.

### 5.10.7. Versatzfaktor

Der Versatzfaktor „a“ beschreibt das Verhältnis aus der Höhe des eingebrachten Versatzmaterials zu der Höhe des Versatzraumes. Wie beim Verfüllungsgrad können auch beim Versatzfaktor in der Praxis keine Werte über „1“ erreicht werden. Der Versatzfaktor ist im Bergbau eine Planungsgröße, die für das Versatzeinbringen an bestimmten Betriebspunkten genutzt wird. Beispielsweise wird bei der Durchführung von planmäßigem Teilversatz ein bestimmter Versatzfaktor vorgegeben, um die variierende Geologie berücksichtigen zu können. [2]

$$a = \frac{h_{VK}}{h_{VR}} \quad (2)$$

|          |                         |     |
|----------|-------------------------|-----|
| $V_G$    | Versatzfaktor           | [-] |
| $h_{VK}$ | Höhe des Versatzkörpers | [m] |
| $h_{VR}$ | Höhe des Versatzraums   | [m] |

Durch die Vermessung der Querschläge zu Projektbeginn kann über die Setzung und Messung des Firstspaltes für beide Versuchsorte der Versatzfaktor bestimmt werden.

### 5.10.8. Konvergenz

Zur Überwachung der im Staßfurt Steinsalz zu erwartenden natürlichen Konvergenz wurde eine Messstelle aus dem GESAV-II-Projekt weiterbetrieben. Das IfG hat diese im SAVER-Projekt neu kalibriert und wieder in Betrieb genommen. Die Messstelle befindet sich im GV 04 (KOMPASS-Querschlag) und besteht aus zwei Festpunkt-Messstrecken zur Bestimmung von Vertikal- und Horizontalkonvergenz. 2 der 4 ursprünglichen Messbolzen mussten neu eingesetzt werden, da diese beim Rückbau des Versatzkörpers aus dem GESAV-II-Projekt zerstört wurden.

Durch die Fortführung der Konvergenzmessung und dem Vergleich mit Literaturwerten können die in GESAV II erhaltenen Werte validiert werden.

### 5.10.9. Grubenklima

Auf Grund des direkten Anschlusses der Querschläge an einen der Hauptwetterwege sollen die Grubenwetter kontinuierlich überwacht werden, um jahreszeitbedingte Schwankungen der Luftfeuchtigkeit und Temperatur aufzuzeichnen. Dabei werden die Messintervalle aus dem

GESAV-II-Projekt mit 60 Minuten übernommen. Die zu erwartenden Luftfeuchtwerte sind niedrig. Erhöhte Temperaturen könnten ggf. die oberflächliche Austrocknung der Versatzkörperendböschung beeinträchtigen. Dies konnte beim GESAV-II-Projekt bereits festgestellt werden.

#### 5.10.10. Einbaudichte

Durch das entworfene In-Situ-Probenprogramm können erstmalig Erkenntnisse über die Einbaudichte gewonnen werden, welche direkt nach dem Einbringen des Materials erreicht wird. Im GESAV-II-Projekt erfolgte die Dichtemessung in einem fortgeschrittenen Stadium der Polyhalitbildung nach einigen Monaten. Durch den Vergleich der in SAVER erfassten Daten zum Zeitpunkt „0“ und den in GESAV nach einigen Monaten ermittelten Einbaudichten kann zudem eine Aussage darüber getroffen werden, ob und in welchem Ausmaß eine mögliche Dichtigkeitszunahme auftritt nach Abschluss der Einbauarbeiten.

Zudem wird eine Massenbilanz der Versatzgesamtmenge aufgestellt durch numerische Erfassung der entleerten Big Bags, in den der Steinsalzgrus von der GSES bereitgestellt wird. Mit Hilfe der ermittelten 3D-Volumina kann so ebenfalls die Gesamtdichte des Versatzkörpers überschlägig berechnet und mit den durch die Proben ermittelten Daten verglichen werden.

#### 5.10.11. Korngrößenverteilung

Durch die Bestimmung der Korngrößenverteilung können die Massenanteile der jeweiligen Salzfraktionen mit Versatz ermittelt werden. Da in FuE-Projekten im Bereich der Endlagerung häufig mit Referenzsalzgrusen gearbeitet wird, also reproduzierbare Mischung mit fest definierten Korngrößenverteilungen, ist eine Kontrolle der zugelieferten Einzelfraktionen nötig. Zudem kann über die Bestimmung der Korngrößenverteilung die Entmischung beim Schleuderversatz quantifiziert werden. Durch die Gravitation und das relativ höhere Eigengewicht haben größere Partikel in der Salzgrusmischungen auch kürzere Schleuderparabeln, wodurch ggf. die Böschung- oder Bauwerksqualität beeinflusst wird. In Kombination mit den XRD-Messungen zur Analyse des Phasenbestandes kann so die Polyhalitbildung in Abhängigkeit der potentiellen Entmischung beim praktischen Einbringen untersucht werden.

### 5.10.12. Böschungswinkel

Zur Berechnung der bei der GSES zu bestellenden Menge Salzgrus wurden Böschungswinkel aus dem GESAV-II-Projekt genutzt. Um die genutzten GESAV-Material-Böschungswinkel nicht nur zu validieren, sondern auch erstmalig für ein KOMPASS-Versatzkörper im Realmaßstab zu definieren, sollen nach Abschluss der Bauwerke die jeweiligen Endböschungen vermessen werden. Diese werden durch Auflegen einer Bohle und anschließender Messung mit einem elektronischen Winkelmesser „GLM 80 Professional“ der Firma Bosch (Abbildung 35) durchgeführt. Die Messung wird pro Endböschung an 3 Stellen durchgeführt und die Werte anschließend gemittelt. Abbildung 36 zeigt die jeweiligen Positionen der Bohlen.



Abbildung 35: Bosch GLM 80 Professional Lasermessgerät [26]

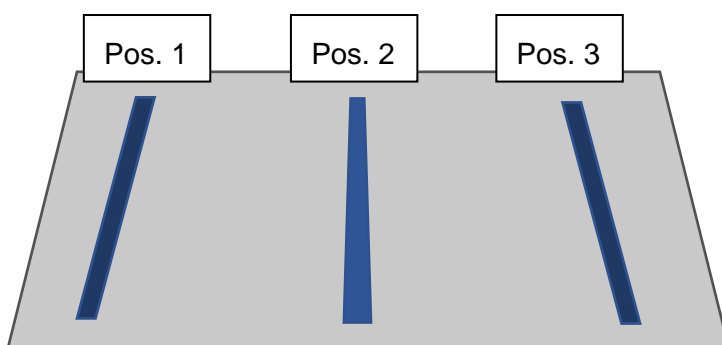


Abbildung 36: 3-Punkt-Messung zur Bestimmung des Endböschungswinkels

Die mehrmalige, projektübergreifende Bestimmung der Endböschungswinkel bietet in Zukunft eine validierte und genaue Größe zur geometrischen Auslegung von Bauwerken unter Tage.

## 5.11. Qualitätssicherung

Auf Grund der Beimengung von Salzbinderkomponenten beim GESAV-Material ist insbesondere dort eine sorgfältige Eingangskontrolle aller Chemikalien nötig. Dabei wird nicht nur die Zusammensetzung, sondern auch die Reinheit geprüft und mit den mitgelieferten technischen Datenblättern abgeglichen. Da aus dem GESAV-II-Projekt Restbestände an Kieserit, Kaliumsulfat und Beta-Halbhydrat zum Teil übrig waren, wurden diese ebenfalls einer Qualitätskontrolle unterzogen, um diese auf Weiterverwendbarkeit zu prüfen. Neben den Chemikalien wurden auch die gelieferten Kornfraktionen der GSES geprüft, um sicherzustellen, dass die Korngrößen im angegebenen Bereich liegen.

Im SAVER-Projekt wurden sowohl für die Salzbinderkomponenten als auch das Salzgrus nahezu dieselben Hersteller, wie im GESAV-II-Projekt genutzt. Lediglich das Kaliumsulfat wurde statt von der K+S AG nun von der LCP Leuna Carboxylation Plant GmbH bezogen. Die Qualität war gleich, jedoch der Preis weitaus wirtschaftlicher.

## 5.12. Einbauablauf KOMPASS-Versatzkörper

Der Einbau des KOMPASS-Versatzkörpers wurde im Zeitraum vom 12.12.2022 – 11.07.2023 durchgeführt. Da die POLLUX-Attrappe bereits im Sommer 2022 positioniert wurde, konnten die Versatarbeiten ohne weitere Verzögerungen beginnen. Um den hinteren Bereich um den POLLUX-Dummy zu verfüllen wurde entsprechend des materialabhängigen Massenverhältnisses das QSV-Material aus den durch die GSES bereitgestellten Big Bags gemischt. Dafür wurden diese aufgeschnitten und auf der Hauptstrecke auf einem hergestellten Mischplatz entleert (Abbildung 37).



Abbildung 37: Aufhäufen der Salzgrusfraktionen zur Mischung auf Hauptstrecke (Foto Autor)

Nachdem das Material aufgehäuft war, wurde es mit einem Kramer-Lader und angebauter Schaufel auf der Hauptstrecke gemischt bis eine optisch gleichmäßige Materialverteilung erreicht wurde (Abbildung 38).

Anschließend wurde das Material mit demselben Lader in den Versuchsort gefahren, aufgehäuft und vor dem POLLUX-Dummy positioniert.



Abbildung 38: Mischung der Salzgrusfraktionen mit Kramer-Lader (Foto Autor)



Abbildung 39: Positionieren der QSV-Mischung für Schleudern (Foto Autor)

Nachdem der Kramer-Lader herausgefahren ist, konnte die Schleuderversatzmaschine vom Typ „Schmidt Supra 3000“ (Abbildung 40) in den Versuchsort hineinfahren und mit der eigentlichen Versatzarbeit beginnen (Abbildung 41).

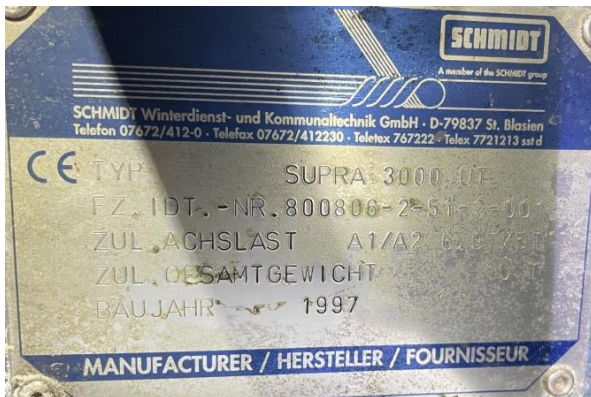


Abbildung 40: Typenschild der Schleuderversatzmaschine (Foto Autor)



Abbildung 41: Schleuderversatzmaschine in Position vor Ortsbrust (Foto Autor)

Das Material wurde zuerst in Richtung der Mitte des Grubenbaus gelenkt, um den POLLUX-Dummy und den Ringraum darum zu verschleudern. Da die für die Herstellung des Grabens verwendete Fräse nicht automatisiert arbeitet, entstehen bei der Bedienung durch einen Menschen geringe Abweichungen zwischen Radius des halbrunden Grabens und dem tatsächlichen Radius des POLLUX-Dummies. Daher wurde dieser Ringraum zuerst gezielt verfüllt, um eine sichere Lagerung des Dummies zu gewährleisten (Abbildung 42). Der in Abbildung 42 sichtbare schwarze Strich ist ein Schatten der Attrappe und kein freigebliebener Ringraum.

Entgegen der Erwartungen entstanden auch hinter dem Dummy keine Toträume, da das Versatzmaterial von der Ortsbrust abprallte und den Raum füllte. Im realen Endlager kann davon ausgegangen werden, dass durch die dahinterliegende Endböschung des vorgehenden Versatzabschnittes das Material ebenfalls den Ringraum vollständig und allseitig füllt.

Die IMKO-Sensoren wurden entsprechend der geplanten Sensorverteilung im Bauwerk sukzessiv verteilt und deren Bezeichnung und Position im Bauwerk schriftlich festgehalten. Vor Einbau wurden alle 10 Sensoren, die für das jeweilige Bauwerk vorgesehen sind, nochmals auf Funktionalität getestet. Dies ist insbesondere wichtig, da die Sensoren auf Grund des Eigengewichts des Versatzes nicht zurückgewinnbar sind im späteren Einbauverlauf. Dementsprechend muss die Funktionalität vorher geprüft werden, da sonst ein Ersatzsensor verbaut werden muss.



Abbildung 42: Verfüllung Ringraum um POLLUX-Dummy (Foto Autor)

Am 4. Tag des Verschleuderns des QSV-Bereiches fiel die Fräse aus. Das Feinsalz auf der QSV-Mischung lagerte sich z. T. im Schleuderarmlager ab, welches dadurch beschädigt wurde und die Arbeiten gegen 10 Uhr beendet werden mussten. Die Reparatur wurde direkt eingeleitet, so dass die Maschine am Folgetag wieder einsetzbar war. An Tag 5 wurde das Verschleudern des QSV-Bereichs mit dem Herstellen der Endböschung abgeschlossen (Abbildung 43). Die Böschungsoberfläche wurde mit Markierspray markiert, um beim Rückbau ggf. visuell den Übergang zwischen KOMPASS- und QSV-Bereich definieren zu können.



Abbildung 43: Endböschung des QSV-Bereichs in KOMPASS-Versatzkörper (Foto Autor)

Auf Grund von Nichtverfügbarkeit von der Fräse und Fahrer in der Arbeitswoche vor Weihnachten 2022 wurde der Einbau des KOMPASS-Bereichs auf Januar 2023 verschoben.

Für das Anmischen des KOMPASS-Materials wurde der Ablauf vom QSV-Material übernommen. D. h., dass die einzelnen Fraktionen auf dem in der Hauptstrecke befindlichen Mischplatz entleert wurden. Durch die Anforderung von 1 M.-% Wasserzugabe wurde das Material vor dem Mischen oberflächlich befeuchtet und anschließend bis zur optischen Vergleichmäßigung gemischt (Abbildung 44).



Abbildung 44: Befeuchtung KOMPASS-Mischung mit Süßwasser (Foto Autor)

Analog wurde das Material dann ebenfalls vor der Endböschung abgekippt und verschleudert. Anschließend wurde die so entstandene Zwischenböschung mit einer an den Kramer angebaute Vibrationsplatte verdichtet. Das Rütteln wurde ca. 10 – 15 Minuten pro Lage ausgeführt, bis eine optisch gleichmäßige Böschungsoberfläche erreicht war (Abbildung 45).



Abbildung 45: Erstböschung im KOMPASS-Bereich nach Rütteln (Foto Autor)

Der Einfluss des Rüttelns und die daraus entstehende Verdichtungswirkung reicht ca. 0,5 m in das Bauwerk hinein. Um die Schleudermaschine nicht zu überlasten und die Schichtmächtigkeit der effektiven Verdichtungstiefe anzupassen, wurden pro Durchgang ca. 10 t Salzgrusversatz eingebracht.

Auf Grund der Konstruktion der Rüttelplatte ist ein Rütteln bis ca. 10 cm unter der Firste möglich. Darüber stößt die Vibrationsplatte an die Firste, auf Grund hervorstehender Bauteile. Eine konstruktive Optimierung der Platte wurde zu Projektbeginn mit dem Institut für Maschinenbau der TUBAF evaluiert. Auf Grund des Konstruktions- und Kostenumfanges wurde dies schlussendlich ausgeschlossen. Eine entsprechende Optimierung bedarf eines hohen Kosten- und Zeitbudgets, was zum Zeitpunkt der Beantragung nicht in SAVER eingeplant wurde.

Auf Grund von oberflächlichen Austrocknungsprozessen bildeten sich über Nacht auf der Böschungsoberfläche schollenartige Salzkonglomerate (Abbildung 46). Um das Risiko zu minimieren, dass diese Schollen zur potentiellen Schwach- bzw. Scherstellenbildung an den

Kontaktflächen zweier Lagen führen, wurde nach Rütteln einer Lage die Oberfläche angeraut mit einer Harke zum Aufbrechen der Schollen und ggf. Erhöhung der Verzahnung.



Abbildung 46: Oberflächliche Salzschorlenbildung auf KOMPASS-Material (Foto Autor)



Abbildung 47: Gerissene Gummilagerung bei Vibrationsanbauplatte (Foto Autor)

Auf Grund von Materialversagen ist am 3. Einbautag des KOMPASS-Materials die Vibrationsplattenaufhängung gerissen und die Einbauarbeiten haben sich weiter verzögert auf Grund der zu diesem Zeitpunkt schlechten Ersatzteilverfügbarkeit (Abbildung 47). Zu diesem Zeitpunkt mussten lediglich noch ca. 30 t verfüllt werden. Da die Vibrationsplatte ein Spezialanbauteil ist und bei der GSES nur für Spezialarbeiten genutzt wird, werden die Ersatzteilbestände auf das nötigste reduziert.

Nach Erhalt des Ersatzteils und Reparatur durch die GSES wurde am 17.1.2023 der KOMPASS-Versatzkörper fertig gestellt mit einem natürlichen Böschungswinkel von 33 °, wie in der Konzeption angenommen.

### 5.13. Einbauablauf GESAV-Versatzkörper

Auf Grund der Beimischung von Salzbinderkomponenten müssen diese im entsprechenden Verhältnis für die Weiterverarbeitung vorgemischt werden. Dafür wurde ein separater Mischplatz auf der Hauptstrecke vorbereitet, in dem die Sohle besenrein gekehrt wurde, so dass keine Verunreinigung durch Beimischung von Salz auftritt (Abbildung 48). Da im SAVER-Projekt die zu mischenden Trockenmengen bei ca. 19 t lagen (GESAV II lediglich 9,5 t [2]), wurde von der erneuten Mischung mit Hilfe eines Standmischers abgesehen.



Abbildung 48: Herstellung des Mischplatzes für die Mischung der Salzbinderkomponenten (Foto Autor)

Die Mischung auf der Sohle bestand im Wesentlichen aus 3 Schritten. Zuerst wurden die trockenen Salzbinderkomponenten (Kaliumsulfat, Kieserit, Halbhydrat) in dem entsprechenden Verhältnis zu einem Haufen aufgeschüttet (Abbildung 49).

Anschließend wurde im ersten Schritt eine Vergleichmäßigung durch Umschichten mit einer Anbauschaufel am Kramer-Lader durchgeführt. Nachdem eine optische Vergleichmäßigung erzielt wurde, wurde die Schaufel gegen einen Anbaumischer der Firma „Attec“ getauscht (Abbildung 50 und Abbildung 51). Der Anbaumischer hat die konstruktive Form einer Schaufel, besitzt jedoch eine innenlaufende Schnecke, welche für eine kontinuierliche Mischung des aufgenommenen Materials sorgt. Durch die Mischung der trockenen Komponenten konnte eine optisch sehr gute Vergleichmäßigung erreicht werden. Das Gemisch wurde an verschiedenen Stellen stichprobenartig händisch umgewälzt um eventuelle Verklumpungen oder Konzentration zu identifizieren. Diese konnten nicht ausgemacht werden.



Abbildung 49: Großtechnische Mischung der Salzbinderkomponenten (Foto Autor)



Abbildung 50: Anbaumischer mit innenlaufender Mischschnecke (Foto Autor)



Abbildung 51: Typenschild des Anbaumischers (Foto Autor)



Abbildung 52: Abgefüllte Big Bags mit Salzbindekomponenten; Markierung zur Füllstandserfassung in roten Kästen (Foto Autor)

Da die großtechnische Mischung und die entsprechenden Verhältnisse aller 3 Materialien (QSV, KOMPASS, GESAV) in-situ auf Basis von Big Bags durchgeführt wurde, musste die gemischten trockenen Bestandteile der Salzbindekomponenten in Big Bags zu je 666 kg abgefüllt werden (Abbildung 52). Auf Grund des zeitintensiven und z. T. händisch ausgeführten Mischungs- und Abfüllvorgangs war Bedarf zur zeitlichen Optimierung gegeben. Eine Wägung der abgefüllten Big Bags und genauen Befüllung ist sehr zeitintensiv, da die Waage zwischen Gabel des Kramers und Big Bag gehangen werden muss. D. h., sollte festgestellt werden, dass der Big Bag von den vorgegebenen 666 kg stark abweicht (>15%) müsste der

Anbaumischer (welcher unten einen Schieber hat, um Big Bags anzuhängen und zu befüllen) wieder angebaut werden und so iterativ jeder einzelne Big Bag befüllt werden. Um dies zu beschleunigen, wurden mehrere Big Bags auf 666 kg aufgefüllt und dann der Füllstand gemessen. Anschließend wurde jeder der 30 gelieferten Big Bags an entsprechender Höhe vor dem Befüllen optisch markiert (Abbildung 52) und dem Kramer-Fahrer ein akustisches Signal gegeben zum Stoppen sobald dieser Füllstand erreicht wurde. Die Mischung und Abfüllung der ca. 19 t von trockenen Salzbindekomponenten konnte erfolgreich in ca. 2,5 Schichten durchgeführt werden.



Abbildung 53: Befeuchtung mit Magnesiumchloridlösung (Foto Autor)

Der Einbau des QSV-Materials im hinteren Bereich des GESAV-Versatzkörpers wurde innerhalb von 2 Schichten am 23.1. und 24.1.2023 abgeschlossen. Die anschließende Verfüllung des GESAV-Materials wurde innerhalb von 4 Schichten vom 30.1.-2.2.2023 durchgeführt. Dabei wurde grundsätzlich gleich vorgegangen wie bei der Herstellung des KOMPASS-Versatzkörpers. Die Big Bags mit dem Steinsalz wurden im entsprechenden Verhältnis mit den trockenen Salzbindekomponenten auf der Hauptstrecke in Chargen von jeweils 10 t gemischt. Anschließend wurde das Trockengemisch der beiden Komponenten mit Magnesiumchloridlösung angefeuchtet (Abbildung 53), verschleudert und mit der Rüttelplatte verdichtet. Der Böschungswinkel wurde mit der gleichen Methodik wie bei dem KOMPASS-Versatzkörper, aber lag mit ca. 39 ° höher.

## 6. Auswertung der untertägigen Großversuche

In diesem Kapitel werden die erfassten und analysierten Messdaten aus den untertägigen Großversuchen dargestellt und ausgewertet. Durch die Erfassung identischer Parameter in beiden Versuchsorten bieten diese Daten die Grundlage für eine zukünftige vergleichende Bewertung der genutzten Materialien und liefern gleichzeitig Erkenntnisse hinsichtlich der großtechnischen bergmännischen Praxis.

### 6.1. Setzung

Die Setzung für beide Bauwerke wurde seit Errichtung kontinuierlich aufgezeichnet und in Datenloggern gespeichert. Die Setzungsmessung wird im Folgeprojekt SAVER II ohne Unterbrechung fortgesetzt.

#### 6.1.1. GESAV-Bauwerk

Im GESAV-Bauwerk war die Setzung bereichsabhängig verschieden. Das QSV-Material zeigt eine gleichmäßige, exponentiell abnehmende Setzung über einen langen Zeitraum, welche sich nach ca. 1 Jahr gegen 0 annähert. Da das Material ein reiner Salzgrus ist, welcher auf der Fuller-Verteilung basiert, waren geringe und gleichzeitig konstant abnehmende Setzungswerte zu erwarten.

Beim GESAV-Material setzt die initiale Gefügestabilisierung bereits nach wenigen Tagen ein, was an der horizontal verlaufenden Setzungskurve sichtbar wird (Abbildung 54, S. 66) Über die Setzungsmessung kann daher der Zeitpunkt des dieser anfänglichen Stabilisierung bestimmt werden. Durch die Ausbildung von Salzbrücken zwischen den einzelnen Salzgruskörnern wird der Versatzkörper selbsttragend und kann nach kurzer Zeit Lastwirkungen des umliegenden Gebirges aufnehmen. Durch die ausbleibende weitere Setzung bleibt der Firstspalt konstant.

Die gemessene Gesamtsetzung von Einsetzten bis Abklingen beträgt für QSV-Material 0,5 % und für das GESAV-Material 1,7 %.

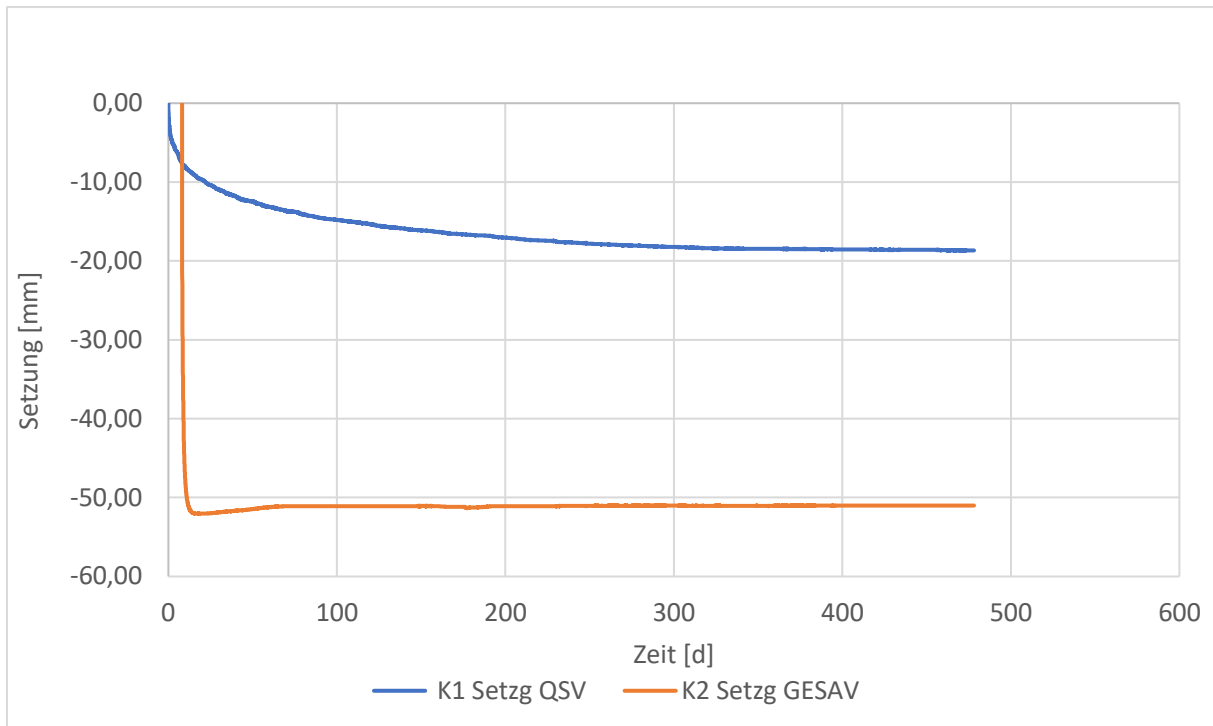


Abbildung 54: Setzungen des QSV- und GESAV-Bereichs im GESAV-Bauwerk (GV03)

### 6.1.2. KOMPASS-Bauwerk

Das QSV-Material im KOMPASS-Bauwerk hat eine vergleichbare absolute Setzung wie im GESAV-Bauwerk mit ca. 2 cm über den gesamten Betrachtungszeitraum. Auffällig ist, dass obwohl beide Materialien reine Salzgruse sind, die Setzung vom KOMPASS-Material signifikant höher ist und konstant, jedoch abnehmend, voranschreitet. Nach ca. 320 Tagen (siehe Abbildung 55, S. 67, rotes Rechteck) verläuft die Setzungskurve horizontal, bedingt durch das Erreichen der maximalen Sondenlänge. Es ist davon auszugehen, dass das Material sich weiter über einen langen Zeitraum setzen wird, bis es sich stabilisiert hat.

Die unterschiedlichen Setzungsverhalten sind voraussichtlich durch die unterschiedlichen Korngrößenverteilung bedingt, da das QSV-Material nach der Fuller-Kurve optimiert wurde und dementsprechend kaum Setzung aufweisen kann. Der Firstspalt wurde in regelmäßigen Abständen fotografiert zur Erfassung der Setzung und für SAVER II ist eine weitere Laser-Vermessung geplant, um die weitere Entwicklung nachvollziehen zu können.

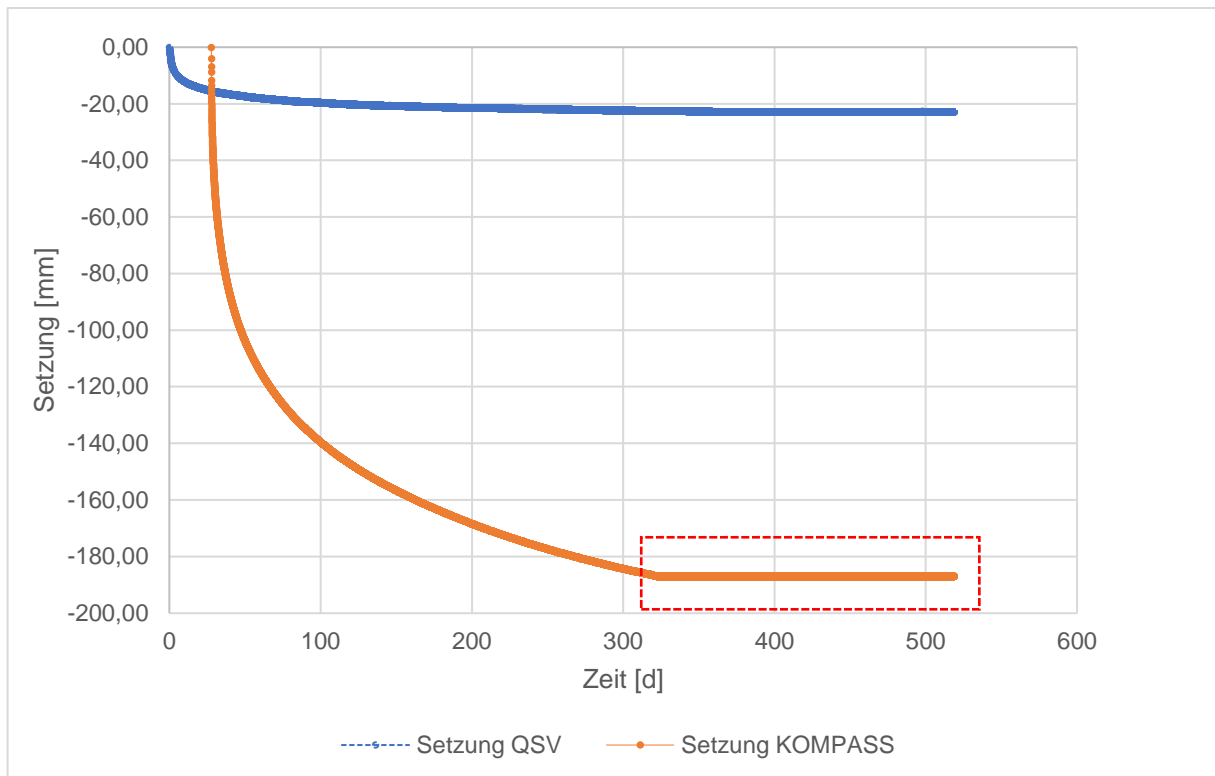


Abbildung 55: Setzungen des QSV- und GESAV-Bereichs im KOMPASS-Bauwerk (GV04)

## 6.2. Temperatur

Durch den Einbau von 10 Sensoren pro Bauwerk kann die Materialtemperatur in einem engen Raster überwacht werden. Die Position der Sensoren wurde in beiden Bauwerken identisch gewählt, wobei leichte Abweichungen zu verzeichnen sind, da es in der tatsächlichen Einbaupraxis nicht möglich ist die Sensoren an die exakt gleichen Positionen zu setzen.

### 6.2.1. GESAV-Bauwerk

Die PICO-Messsensoren zeigten bei der Temperaturmessungen im Messbereich zwischen 25 °C und 27 °C hochfrequente Schwankungen auf bei der Messung, was anhand der Darstellung in Abbildung 56 sichtbar wird. Bis auf den Sensor SDI12\_2-2 ist bei allen anderen Messkurven lediglich ein minimaler Temperaturanstieg von maximal 1 °C zu verzeichnen.

Der Sensor SDI12\_2-2 zeichnete einen doppelt so hohen Temperaturanstieg auf von ca. 25 °C auf 27,2 °C. Da der Sensor in der Endböschung eingebaut ist, ist dieser positionsbedingt dem höchsten Einfluss aus den Grubenwettern ausgesetzt.

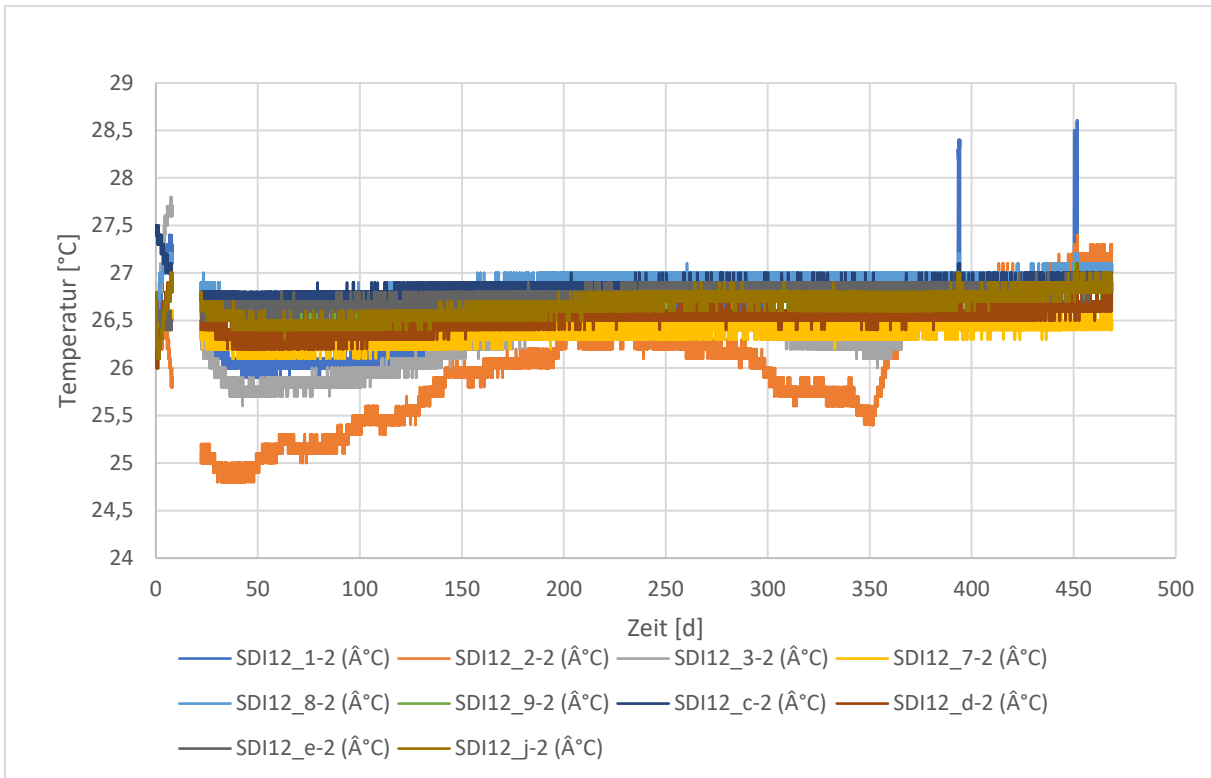


Abbildung 56: Temperaturverlauf im GESAV-Versatzkörper (GV03)

### 6.2.2. KOMPASS-Bauwerk

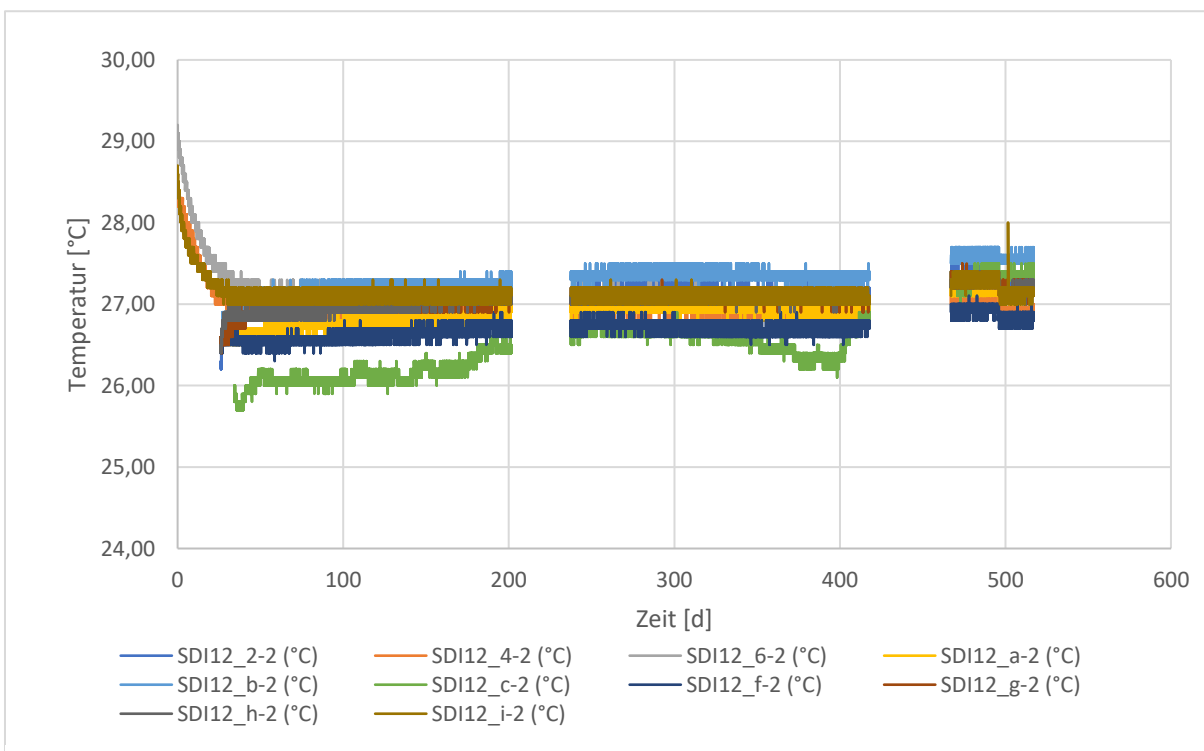


Abbildung 57: Temperaturverlauf im KOMPASS-Versatzkörper (GV04)

Die qualitativen Temperaturverläufe im KOMPASS-Versatzkörper sind vergleichbar mit denen im GESAV-Versatzkörper. Auffällig ist ebenfalls, dass der stärkste Anstieg der Temperatur beim Sensor SDI12\_c-2 stattfindet, welcher sich in der Endböschung befindet und so den größten Einflüssen durch das lokale Grubenklima ausgesetzt ist (Abbildung 57, S. 68). Die Maximaltemperatur im KOMPASS-Versatzkörper liegt mit 27,7 °C ca. 0,3 °C höher als im GESAV-Versatzkörper. Der Unterschied ist als vernachlässigbar zu werten.

Im KOMPASS-Querschlag entstanden 2 Datenlücken im Zeitraum von 200-230 Tagen und 420-450 Tagen auf Grund Fehlfunktion der dort angebrachten LogTag-Karten (Abbildung 57).

### 6.3. Feuchtigkeit

Die Messung der Materialfeuchtigkeiten gibt nicht nur Aufschluss über das Trocknungsverhalten nach dem Einbau, sondern z. B. ebenfalls wichtige Informationen über den Feuchtigkeitsverlust zwischen Anmischen und Einbau. Ein durch das Verschleudern induzierter Feuchtigkeitsverlust konnte bereits in GESAV II nachgewiesen werden. Neben der Erfassung der materialspezifischen Feuchtigkeiten in den verschiedenen Bauwerksbereichen, konnte durch die strategische Positionierung der Sensoren das Migrationsverhalten in den Versatzkörpern untersucht werden.

#### 6.3.1. GESAV-Bauwerk

Die Feuchtigkeit im QSV-Bereich des GESAV-Versatzkörpers bleibt über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant (vgl. Abbildung 58). Da das Material trocken, bzw. mit seinem natürlichen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 0,1 %, eingebaut wurde, ist eine Zu- oder Feuchtigkeitsabnahme ausgeschlossen. Der durchgehend horizontale Verlauf bestätigt zudem, dass im Betrachtungszeitraum keine Restfeuchtigkeit aus dem GESAV-Bereich in den QSV-Bereich migriert ist.

Alle Daten der 5 Sonden des mit GESAV-Material verfüllten Bereich des Bauwerks zeigen zum Anfang einen Rückgang der Feuchtigkeit. Dies korreliert zeitlich mit dem Beginn der initialen Verfestigung und dem Einsetzen der Primärphasenbildung (Kainit, Syngenit) aus den Salzbinder-Ausgangskomponenten (Halbhydrat, Arkanit, Kieserit) mit der Magnesiumchloridlösung.

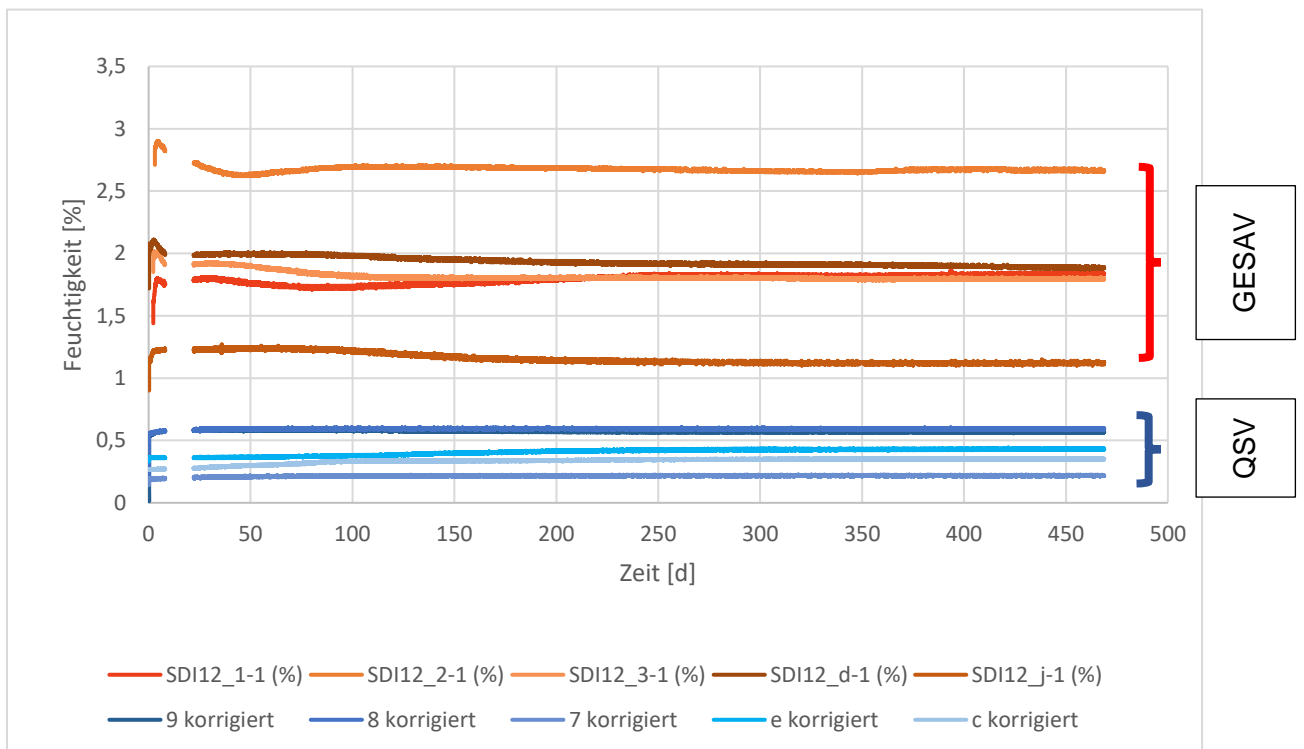


Abbildung 58: Feuchtigkeitsentwicklung im GESAV-Bauwerk (GV03)

Da sowohl im QSV- als auch im GESAV-Bereich keine weiteren Feuchtigkeitszu- oder abnahmen erfolgen, kann eine Fluidmigration im Bauwerk ausgeschlossen werden. Zu Beginn der Messungen (ca. Tag 15 – 25) entstand auf Grund Technikausfall eine Messlücke.

### 6.3.2. KOMPASS-Bauwerk

Die Feuchtigkeitsentwicklung im KOMPASS-Versatzkörper ist diffuser als im GESAV-Versatzkörper. Die Sensoren im QSV-Bereich zeigen zu Messbeginn einen minimalen Anstieg an. Dies kann bedingt sein durch Einfluss aus der Verdichtung mit der Rüttelplatte oder geringfügige Feuchtigkeitsmigration. Da gleichzeitig Sonde SDI12\_2-1 im KOMPASS-Bereich eine Feuchtigkeitsabnahme misst, kann nicht genau gesagt werden, ob die Feuchtigkeitswerte auf Grund von Einfluss der Vibration oder tatsächlicher Migration variieren. Ein Einfluss durch Verdichtung konnte in Labortests nachgewiesen werden.

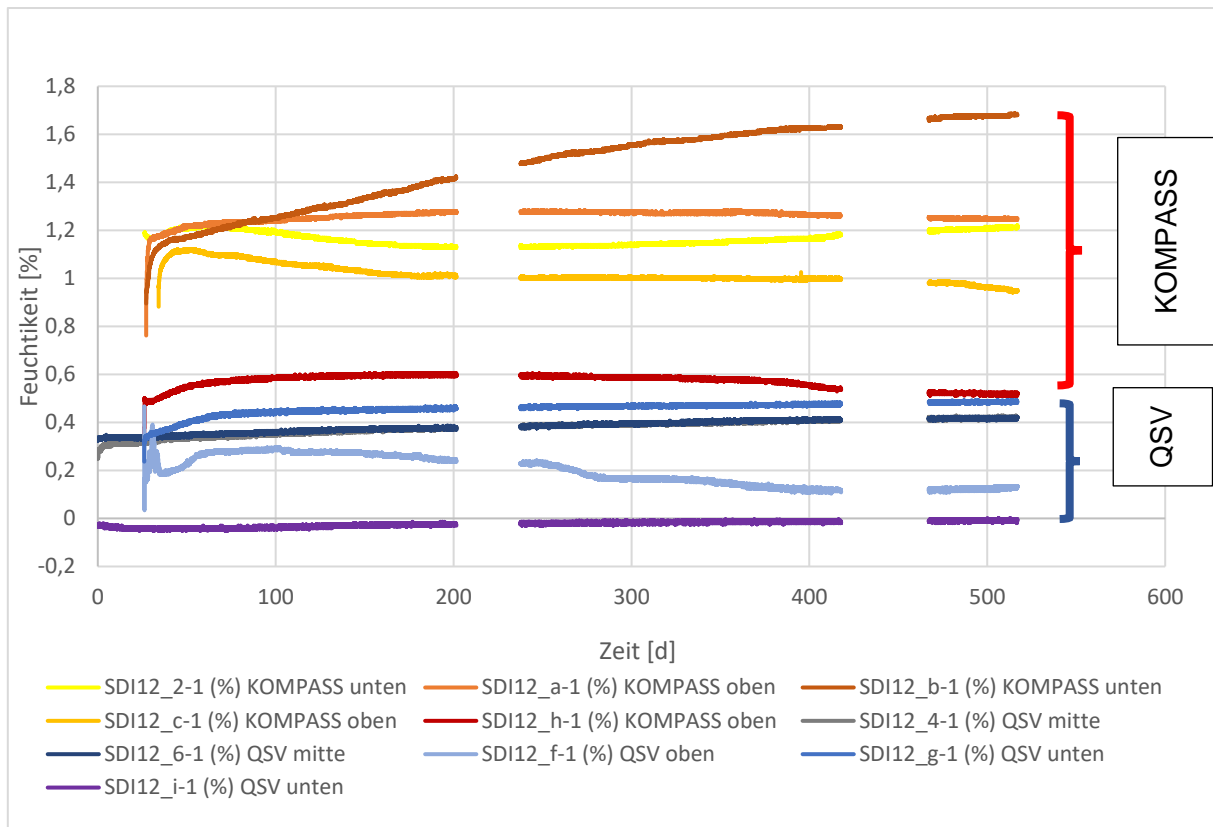


Abbildung 59: Feuchtigkeitsentwicklung im KOMPASS-Bauwerk

Im KOMPASS-Materialbereich treten größtenteils gleichbleibende Feuchtigkeitswerte auf, lediglich der Sensor SDI12\_b-1 verzeichnet eine konstante Zunahme über den gesamten Betrachtungszeitraum. Um die Aussagekraft dieses einzelnen Sensors belegen zu können, wurden im Labor Experimente durchgeführt, welche den Einfluss von zunehmender Verdichtung auf die Messgenauigkeit untersuchen sollten. Es wurde von der Hypothese ausgegangen, dass durch die zunehmende Setzung des Materials und der einsetzenden Sohlenkonvergenz das Material zwischen den beiden Messspitzen des Sensors verdichtet und dadurch die Leitfähigkeit erhöht wird. Da die Feuchtigkeitsbestimmung bei den Sensoren über die Leitfähigkeit durchgeführt wird, bot dies Grund zur Annahme, dass eine entsprechende Materialverdichtung zu fälschlicherweise höheren Feuchtigkeitsmesswerten führen können. Da sich der betroffene Sensor im KOMPASS-Bereich knapp über der Sohle befindet, galt es zudem zu klären, ob eine durch Gravitation bedingte Feuchtigkeitsmigration aus den oberen Bereichen in Richtung Sohle als realistisch anzusehen sei. Die genaue Beschreibung der Validierungsversuche ist näher erläutert unter 7.2 ab Seite 92. Es ist am wahrscheinlichsten anzusehen, dass die Feuchtigkeitszunahme durch eine Kombination aus zunehmender Sohlenkonvergenz, der Widerlagerwirkung des den Sensor einschließenden Versatzmaterials und damit einhergehender Materialverdichtung rührt. Es konnte abschließend nicht uneingeschränkt geklärt werden, ob diese Theorie valide ist. Eine dritte realistische Option ist, dass der Sensor fehlerhaft ist, da er mit seinen Messungen konstant und im hohen Maße von den Messungen der umliegenden Sensoren abweicht.

## 6.4. Druck

In beiden Versatzkörpern wurden zur Überwachung der Entwicklung der Druckdifferenz über den Betrachtungszeitraum jeweils 2 Druckmessplatten verbaut. Eine Druckplatte wurde jeweils auf den POLLUX-Dummy montiert zur Überwachung der Druckentwicklung in unmittelbarer Behälternahe. Die zweite Platte wurde wie in GESAV II in den jeweils vorderen Materialbereich direkt auf die Sohle montiert. Alle Platten sind in einer senkrechten Flucht mit den respektiven Setzungssonden der jeweiligen Versuchsorte und befinden sich dementsprechend genau unter diesen.

### 6.4.1. Druckentwicklung im GESAV-Bauwerk

Der initiale Druckanstieg bei beiden Messplatten ergibt sich durch die Auflast des verfüllten Salzgruses und spiegelt den gravitativen Einfluss bedingt durch das Eigengewicht des Versatzes wider. Anschließend kann in Phase A (rotes Rechteck in Abbildung 60) ein Druckabfall identifiziert werden im QSV-Bereich, welcher ggf. durch die abnehmende Auflast des sich stabilisierten GESAV-Bereichs erklärbar ist.

Das GESAV-Material ist ca. bis Tag 70 konstant. Der anschließende Anstieg beider Verläufe ist wahrscheinlich durch die einsetzende Sohlenkonvergenz bedingt. Generell haben Versatzkörper in Realmaßstab trotz genauer Instrumentierung mit Messgerät z. T. trotzdem einen Black-Box-Charakter, so dass einige Messungen nicht zuverlässig interpretierbar sind. Dies wurde bereits in den ELSA-Projekten festgestellt. Grundsätzlich kann man jedoch die Stabilisierung des GESAV-Gefüges sehr gut erkennen in Phase A.

Die häufigen Ausschläge, die in beiden Messkurven sichtbar sind, sind höchstwahrscheinlich „Rauschen“ der Messtechnik, da ein analoges Eingangssignal elektronisch aufgenommen und anschließend im Datenlogger digitalisiert wird.

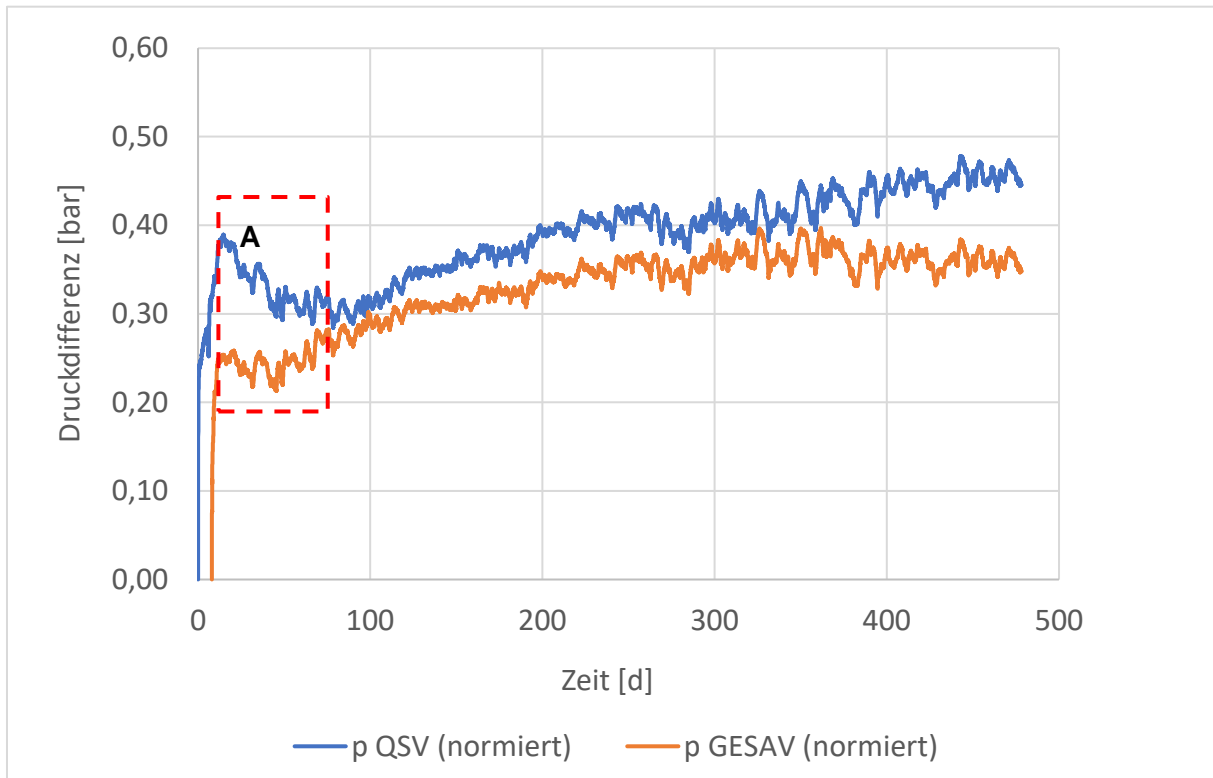


Abbildung 60: Entwicklung der gemessenen Druckdifferenzen im GESAV-Bauwerk (GV03)

#### 6.4.2. Druckentwicklung im KOMPASS-Versatzkörper

Im QSV-Bereich des KOMPASS-Versatzkörpers ist eine recht früh eintretende Druckdifferenzzunahme erkennbar. Dadurch, dass das Material minimale Setzungen aufweist ist es bereits in einem frühen Stadium gut kompaktiert. Die mit der Zeit einsetzende Sohlenkonvergenz und der damit von unten induzierte Druck kann somit nicht durch Kompaktion des Materials über der Druckplatte kompensiert werden. Dies wäre eine Möglichkeit zur Erklärung des Druckanstieges, da die Druckverlaufskurve antiproportional zunimmt zur Setzungskurve des QSV-Materials. Da das KOMPASS-Material sich kontinuierlich setzt, kann somit der Druck durch Konvergenz kompensiert werden. Trotzdem soll an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass dies nicht vollständig belegbare Theorien sind auf Grund des Black-Box-Charakters solcher Bauwerke in Realgröße.

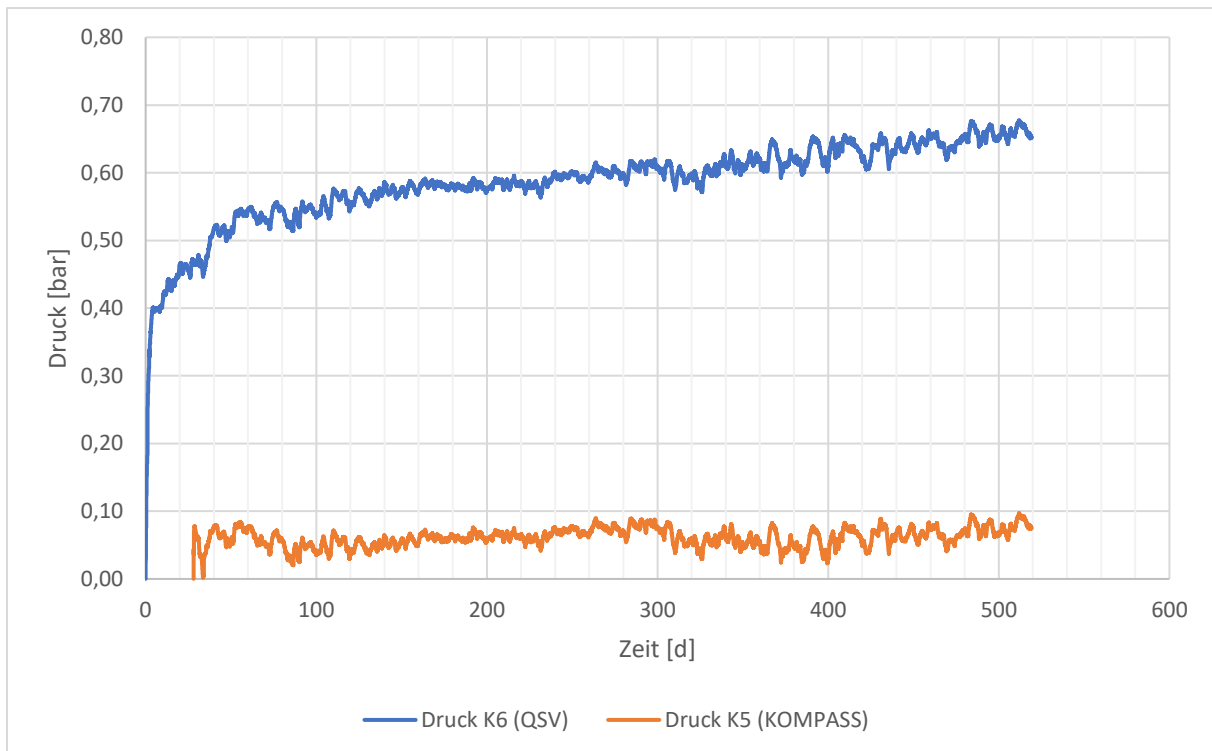


Abbildung 61: Druckentwicklung im KOMPASS-Versatzkörper

## 6.5. Entwicklung des Phasenbestandes

Der Phasenbestandes der Versatzkörper wurde durch zeitabhängige röntgenografische Messungen für beide Versatzkörper an in-situ-Proben untersucht. Dabei wurde am GESAV-Versatzkörper an 3 Stellen (oberer, mittlerer bzw. unterer Bereich) Probe entnommen, am KOMPASS-Versatzkörper wurde nur an einer Stelle Probe genommen. Die Probenahmen erfolgten je in ca. 20-30 cm Tiefe an der Böschung der Versatzkörper. In Tabelle 9 sind die Zeitpunkte der jeweiligen Probenahmen an den Versatzkörpern gelistet.

Das GESAV-Material besteht aus 85 Ma% aus Steinsalzgrus, welcher auch etwas Anhydrit enthält, und dementsprechend intensive NaCl-Reflexe im Diffraktogramm aufweist. Da im GESAV-Material die Entwicklung des Salzbinderphasenbestandes verfolgt werden soll, wurden die NaCl-Reflexe in der Abbildung 62 abgeschnitten. Nach Vermischen der Salzbinder-Ausgangskomponenten (Halbhydrat  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , Arkanit  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , Kieserit  $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  und  $\text{MgCl}_2$ -Lösung) setzt die Bildung des Primärkristallisats ein. Nach 2,5 Monaten (untere Diffraktogramme in Abbildung 62) wird die Bildung von Kainit ( $\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,75\text{H}_2\text{O}$ ) neben noch unumgesetztem Halbhydrat zu beobachten.

Tabelle 9: Zeitpunkte der Probennahmen an den Versatzkörpern.

|                         | <b>GESAV-Versatzkörper</b> | <b>KOMPASS-Versatzkörper</b> |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| <b>Datum Einbau</b>     | 02.02.2023                 | 17.01.2023                   |
| <b>Datum Probenahme</b> | <b>Alter (Monate)</b>      | <b>Alter (Monate)</b>        |
| 18.04.2023              | 2,50                       | 3,00                         |
| 25.05.2023              | 3,75                       | 4,00                         |
| 05.07.2023              | 5,00                       | 5,50                         |
| 03.08.2023              | 6,00                       | 6,50                         |
| 31.08.2023              | 7,00                       | 7,50                         |
| 29.09.2023              | 8,00                       | 8,50                         |
| 25.10.2023              | 8,75                       | 9,00                         |
| 27.11.2023              | 10,00                      | 10,50                        |

Die Polyhalitbildung ( $K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) beginnt nach etwa 3,75 Monaten und ist nach ca. 7 Monaten vollständig abgeschlossen. Signifikante Unterschiede zwischen den Probenahme-Bereichen im Versatzkörper (oberer, mittlerer bzw. unterer Bereich) gibt es nicht.

Im KOMPASS-Versatzkörper sind über den gesamten Untersuchungszeitraum keine Salzneu- bzw. -umbildungen zu beobachten (Abbildung 63). Durch das Anfeuchten des Materials mit 1Ma% Wasser hat sich aus dem im Salzgrus enthaltenen Anhydrit teilweise Gips ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) gebildet.

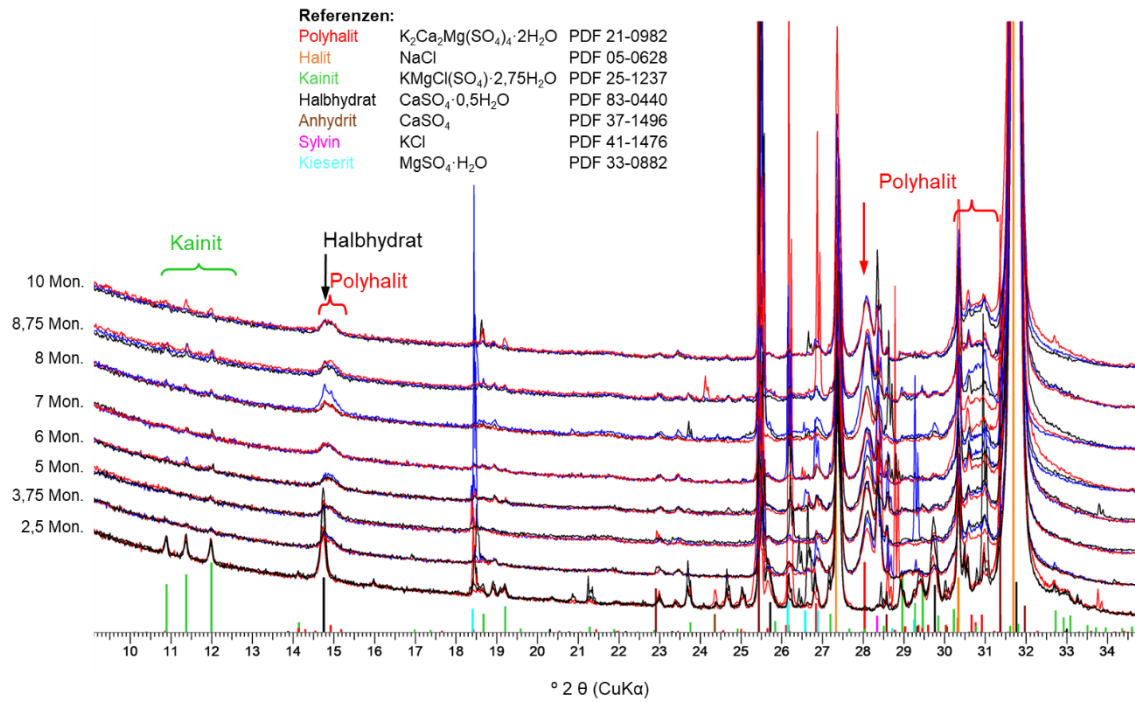


Abbildung 62: Ausschnitt der zeitabhängig aufgenommenen Pulverdiffraktogramme der GE-SAV-Versatzkörperproben (oberer, mittlerer bzw. unterer Bereich).

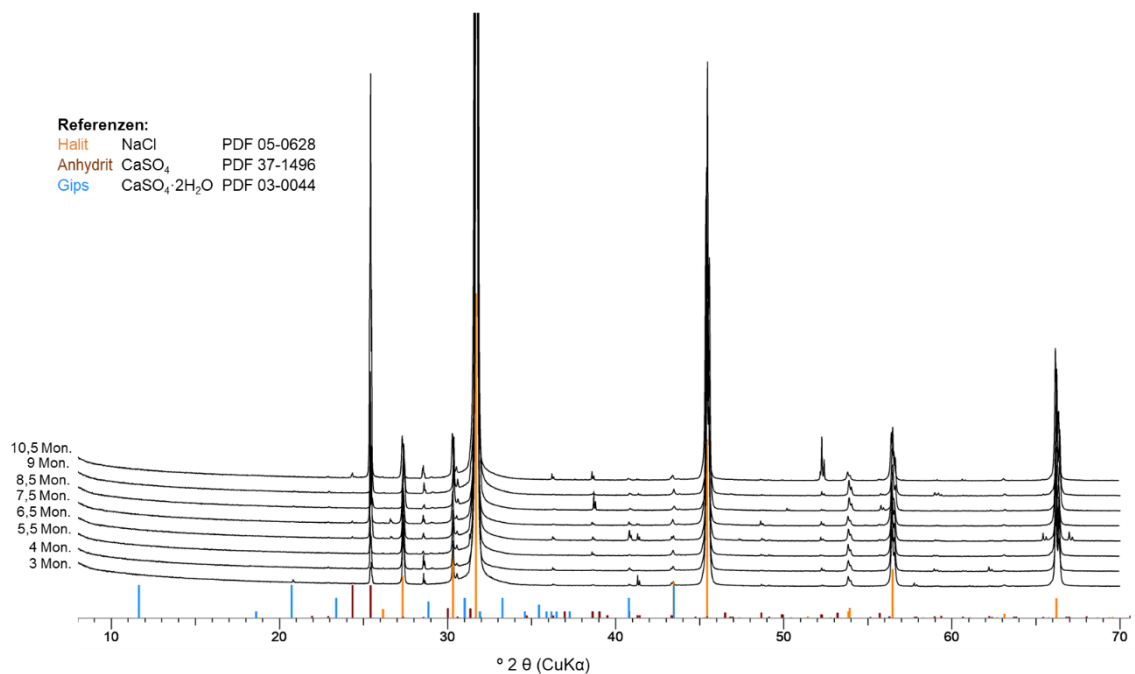


Abbildung 63: Zeitabhängig aufgenommene Pulverdiffraktogramme der KOMPASS-Versatzkörperproben.

## 6.6. Verfüllungsgrad

Der Verfüllungsgrad berechnet sich grundsätzlich entsprechend der Formel (1; vgl. 5.10.6). Betrachtet man die Gleichung, so fällt auf, dass keine der beiden Eingangsgrößen zeitabhängig ist und sich das Gesamtergebnis dementsprechend in Abhängigkeit vom gewählten Betrachtungszeitpunkt ändert. Dies ist bedingt durch die auftretende, sich über einen langen Zeitraum erstreckende, Materialsetzung. Diese hat zur Folge, dass das Volumen des Versatzkörpers mit der Zeit abnimmt während das Volumen des Versatzraumes nahezu konstant bleibt. Die Konvergenz ist in diesem Fall vernachlässigbar gering im Vergleich zur Setzung und der damit verbundenen Volumenabnahme.

Auch eine Entwicklung des Verfüllungsgrades im zeitlichen Verlauf ist schwer möglich zu berechnen. Um das Volumen des Versatzkörpers zu verschiedenen Setzungsstadien zu bestimmen, müsste der Firstspalt räumlich vermessen werden. Dieses erhaltene Volumen könnte man dann vom Gesamtvolumen subtrahieren, um das zu diesem Zeitpunkt tatsächliche Volumen des Versatzkörpers zu bestimmen. Dies ist jedoch nicht möglich, da der Firstspalt nicht groß genug ist, dass ein Mensch mit einem 3D-Handscanner das Firstspaltvolumen aufnehmen könnte. Da pro Versatzkörper jeweils zwei verschiedene Materialbereiche vorhanden sind, ist es auch nicht sinnvoll den Firstspalt zwischen oberem Ende der Endböschung und der First händisch auszumessen und diesen auf die gesamte Bauwerkslänge anzunehmen.

Da die Setzungssonde die Setzung des Versatzkörpers misst, kann deren Messkurve repräsentativ für die Entwicklung des Verfüllungsgrades herangezogen werden. Der Rest in der Gleichung kürzt sich heraus.

Zum Zeitpunkt des Materialeinbaus der verschiedenen Bereiche kann der Verfüllungsgrad als  $\sim 1$  angenommen werden, da es mit allen 3 Materialien möglich war eine nahezu firstbündige Verfüllung zu erzielen (Abbildung 64 - Abbildung 66; S. 78).



Abbildung 64: Firstbündige Verfüllung mit GESAV-Material (Foto Autor)



Abbildung 65: Firstbündige Verfüllung mit QSV-Material (Foto Autor)



Abbildung 66: Firstbündige Verfüllung mit KOMPASS-Material (Foto Autor)

## 6.7. Versatzfaktor

Analog zum Verfüllungsgrad, kann der Versatzfaktor über die Setzung ermittelt werden (Formel (2), 5.10.7). Entsprechend kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Versatzfaktor ermittelt werden. Zum Einbauzeitpunkt ist auf Grund des firstbündigen Anschlusses der Versatzfaktor  $\sim 1$ .

## 6.8. Spannungssituation

Mittels den durchgeführten Spannungssondierungen konnte mittels des Hydrofrac-Verfahrens erstmalig die kleinste Hauptspannung im Gebirge bestimmt werden, was eine wichtige Rand-

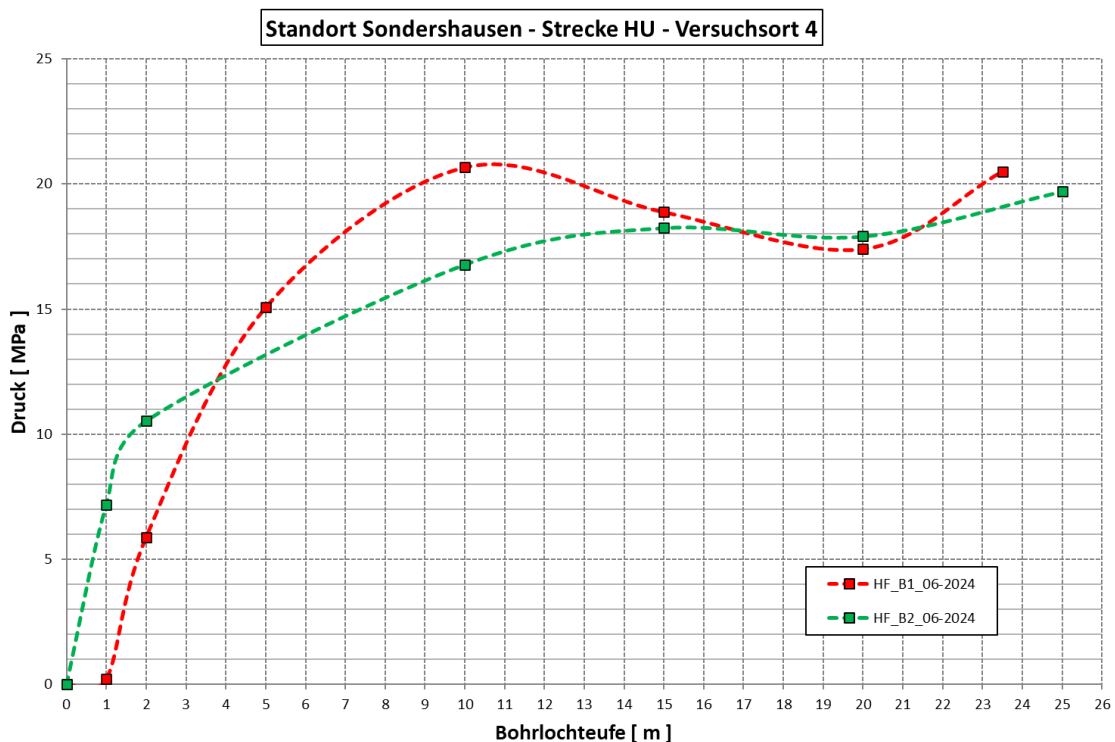


Abbildung 67: Verlauf der kleinsten Hauptspannung in der (gering beeinflussten) HU-Streckenkontur bzw. im Streckenpfeiler des Versuchsorts 4.

bedingung, z.B. für die numerische Simulation der Kompaktionsprozesse im GESAV- bzw. Kompass-Material darstellt.

Die aus den Spannungssondierungen erhaltenen Messdaten sind tabellarisch in Tabelle 10 bzw. als Betrag der kleinsten Hauptspannung in Abbildung 67 dargestellt. Die mit zunehmender Teufe zu beobachtende Spannungsentwicklung unterscheidet sich für beide

Messbohrungen, entweder in der Strecken- oder Pfeilerkontur, nur wenig. Während bei der Bohrung B2 (Strecke) bereits im Konturabstand von 1 m ein Spannungswert von ca. 7 MPa nachgewiesen wird, ist im Pfeiler (Bohrung B1) erst in der Messung bei 2 m ein Wert von ca. 6 MPa zu beobachten, was auf eine größere Reichweite der Entfestigung/Auflockerung hinweist. Entsprechend ist eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone in der Strecke bis ca. 0,5 m anzunehmen und im Pfeilerbereich bis etwa 2 m (ab einer Einspannung mit  $\sigma_{\min} > 3\text{-}5$  MPa sind nach Erfahrungen des IfG in Übereinstimmung mit Laboruntersuchungen keine erhöhten Permeabilitätswerte  $> 10^{-18} \text{ m}^2$  zu erwarten).

Tabelle 10: Spannungskennwerte auf Basis der in den Bohrungen B1 und B2 durchgeführten HF-Messungen.

| HF_B1_06-2024  |                        | 25 m                 |                       |                   |                    |                          |                        |                         |                   |                    |                              |
|----------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|
| Bohrloch-teufe | Beginn primäre Dichth. | Ende primäre Dichth. | Diff. primäre Dichth. | Über-pump-druck 1 | Ruhe-druck 1 0,5 h | Beginn sekundäre Dichth. | Ende sekundäre Dichth. | Diff. sekundäre Dichth. | Über-pump-druck 2 | Ruhe-druck 2 0,5 h | Kleinste Hauptnormalspannung |
| [ m ]          | [ MPa ]                | [ MPa ]              | [ MPa ]               | [ MPa ]           | [ MPa ]            | [ MPa ]                  | [ MPa ]                | [ MPa ]                 | [ MPa ]           | [ MPa ]            | [ MPa ]                      |
| 0,00           | 0,00                   | 0,00                 | 0,00                  | 0,00              | 0,00               | 0,00                     | 0,00                   | 0,00                    | 0,00              | 0,00               | 0,00                         |
| 1,00           | 0,84                   | 0,77                 | 0,06                  | 13,87             | 0,66               |                          |                        | 0,00                    | 12,23             | 0,45               | 0,23                         |
| 2,00           | 1,23                   | 1,23                 | 0,00                  | 17,70             | 6,78               | 6,01                     | 5,90                   | -0,11                   | 15,80             | 5,88               | 5,89                         |
| 5,00           | 1,06                   | 1,01                 | 0,04                  | 27,77             | 16,05              | 14,74                    | 15,13                  | 0,39                    | 24,59             | 15,00              | 15,07                        |
| 10,00          | 1,24                   | 1,22                 | 0,02                  | 34,13             | 21,15              | 19,42                    | 19,92                  | 0,50                    | 30,08             | 21,40              | 20,66                        |
| 15,00          | 1,14                   | 1,11                 | 0,02                  | 38,22             | 20,08              | 18,48                    | 18,51                  | 0,03                    | 35,76             | 19,24              | 18,87                        |
| 20,00          | 1,07                   | 1,01                 | 0,06                  | 40,29             | 18,13              | 16,29                    | 15,89                  | -0,40                   | 35,90             | 18,90              | 17,40                        |
| 23,50          | 1,32                   | 1,03                 | 0,29                  | 37,42             | 22,54              | 19,97                    | 19,46                  | -0,51                   | 35,61             | 21,54              | 20,50                        |
| HF_B2_06-2024  |                        | 25 m                 |                       |                   |                    |                          |                        |                         |                   |                    |                              |
| Bohrloch-teufe | Beginn primäre Dichth. | Ende primäre Dichth. | Diff. primäre Dichth. | Über-pump-druck 1 | Ruhe-druck 1 0,5 h | Beginn sekundäre Dichth. | Ende sekundäre Dichth. | Diff. sekundäre Dichth. | Über-pump-druck 2 | Ruhe-druck 2 0,5 h | Kleinste Hauptnormalspannung |
| [ m ]          | [ MPa ]                | [ MPa ]              | [ MPa ]               | [ MPa ]           | [ MPa ]            | [ MPa ]                  | [ MPa ]                | [ MPa ]                 | [ MPa ]           | [ MPa ]            | [ MPa ]                      |
| 0,00           | 0,00                   | 0,00                 | 0,00                  | 0,00              | 0,00               | 0,00                     | 0,00                   | 0,00                    | 0,00              | 0,00               | 0,00                         |
| 1,00           | 0,71                   | 0,70                 | 0,01                  | 25,48             | 7,59               | 6,34                     | 6,65                   | 0,30                    | 21,84             | 6,78               | 7,19                         |
| 2,00           | 0,52                   | 0,49                 | 0,02                  | 19,49             | 10,55              | 8,98                     | 8,80                   | -0,17                   | 18,45             | 10,52              | 10,53                        |
| 10,00          | 1,30                   | 1,29                 | 0,01                  | 32,53             | 16,94              | 15,48                    | 15,55                  | 0,07                    | 30,09             | 16,62              | 16,78                        |
| 15,00          | 1,24                   | 1,12                 | 0,12                  | 31,97             | 18,16              | 16,39                    | 16,84                  | 0,46                    | 28,68             | 18,33              | 18,25                        |
| 20,00          | 1,27                   | 1,24                 | 0,02                  | 30,76             | 18,02              | 17,98                    | 16,25                  | -1,74                   | 28,71             | 17,80              | 17,91                        |
| 25,00          | 1,57                   | 1,50                 | 0,07                  | 31,06             | 19,71              | 17,59                    | 18,19                  | 0,60                    | 28,48             | 19,70              | 19,70                        |

Danach nimmt vor allem in der Bohrung B1 die Spannung deutlich zu und erreicht bei 10 m ein Spannungsniveau von  $> 20$  MPa und nimmt danach ab. Im Kontur-fernen Bereich ( $> 15$  m) liegt die kleinste Hauptspannung für beide Bohrungen auf einem Niveau zwischen 16 und 19 MPa. Dieses Spannungsniveau liegt etwas höher als der über den mittleren Teufengradienten abgeschätzten Spannungswert von ca. 16 MPa (Überzugswirkung aufgrund der randlichen Lage im Grubenfeld).

## 6.9. Konvergenz

Die im Vorhaben GESAV II (sowie den Vorgängervorhaben) über einen Zeitraum von ca. seit dem 20.10.2017 Jahren gemessene Gesamtverformung beträgt vertikal ( $K_v$ ) Anfang 01/2024 ca. 57 mm, was einer mittleren Konvergenzrate von ca. 9 mm/Jahr entspricht. In horizontaler Richtung ( $K_h$ ) sind die Verformungen von der Größenordnung mutmaßlich vergleichbar, wobei allerdings diese Messreihe 01/2024 neu begonnen wurde.

Die Konvergenz korrespondiert generell mit den aus der Standortüberwachung vorliegenden Erfahrungen der Grube. Damit sind die Konvergenzraten groß genug, um die Setzungsmessungen (u.a. durch die Hebung der Sohle bzw. die gleichzeitige Absenkung der Firste, vgl. Kap. 6.1) sowie die Ergebnisse der Druckmessung im Versatzkörper (quasi-kontinuierlicher Druckanstieg, vgl. Kap. 6.4) zu beeinflussen.

Die Konvergenzmessungen werden fortgesetzt, womit sich belastbare Konvergenzen zur Bewertung der oben genannten Prozesse ergeben werden.

## 6.10. Einbaudichte

Die Einbaudichte des GESAV-Materials wurde im GESAV-II-Projekt über die Gewinnung von Probelöcken und anschließender Tauchwägung bestimmt. Zum Einbauzeitpunkt selbst wurde keine Dichtebestimmung vorgenommen, weshalb in SAVER zudem die Einbaudichte der 3 verwendeten Materialien direkt nach dem Einbau untersucht wurde.

In der durchgeführten Probenkampagne wurden aus den 4 Materialbereichen beider Versatzkörper insgesamt 37 Proben gewonnen (vgl. Abbildung 33, S.46). Durch das definierte Volumen der KG-Rohre konnte die Dichte über das Netto-Gewicht der Proben entsprechend der folgenden Formel bestimmt werden.

$$\rho = \frac{m_{Probe} - m_{KG-Rohr}}{V_{KG-Rohr}} \quad (3)$$

|               |                            |                      |
|---------------|----------------------------|----------------------|
| $\rho$        | Materialdichte der Probe   | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $m_{Probe}$   | Masse der Probe            | [kg]                 |
| $m_{KG-Rohr}$ | Masse des KG-Rohrs (Gefäß) | [kg]                 |
| $V_{KG-Rohr}$ | Volumen des KG-Rohrs       | [m <sup>3</sup> ]    |

Da die Proben auf Grund Ihrer starren Wandstruktur keinen realen Einfluss des umliegenden Materials zulassen, spiegeln diese höchstwahrscheinlich nicht in vollem Maße die tatsächliche

Einbaudichte wider. Die berechneten Dichten sind bereichsabhängig in Tabelle 11 aufgelistet. Weitere Untersuchungen sollen im Laborprogramm in SAVER II durchgeführt werden.

Tabelle 11: Materialspezifische Einbaudichten

| <b>Material</b>                     | <b>Methode</b>       | <b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b> |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| GESAV-Bereich                       | Schleudern + Rütteln | <b>1.5 ± 0,05</b>                |
| QSV-Bereich [GESAV Versatzkörper]   | Schleudern           | <b>1.63 ± 0,03</b>               |
| KOMPASS-Bereich                     | Schleudern + Rütteln | <b>1.62 ± 0,05</b>               |
| QSV-Bereich [KOMPASS Versatzkörper] | Schleudern           | <b>1.67 ± 0,06</b>               |

Die Dichte der beiden Bauwerke im Gesamten kann über die Massenbilanz sowie des durch 3D-Vermessung berechneten Volumens ermittelt werden. Während des Einbaus wurden Strichlisten erstellt über die Anzahl der verfüllten Big Bags. Seitens der GSES wurde der Salzgrus in Big Bags mit 2 verschiedenen Größen bereitgestellt. Pro Kornfraktion wurden mehrere Big Bags der beiden Ausführungen gewogen und das Gewicht anschließend gemittelt. Daraus ergibt sich pro Versatzbauwerk und je Materialbereich ein spezifisches Gewicht, welches verfüllt wurde. Die Übersicht ist in Tabelle 12 aufgeschlüsselt.

Tabelle 12: Massenbilanz und Dichten der beiden Bauwerke im Gesamten

|                               |                        | <b>Verfüllte Masse [t]</b> | <b>Volumina [m<sup>3</sup>]</b> | <b>Dichte [t/m<sup>3</sup>]</b> |
|-------------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>GESAV-Bauwerk (GV03)</b>   | <i>QSV-Bereich</i>     | 105,5                      | 208                             | 1,26                            |
|                               | <i>GESAV-Bereich</i>   | 157,4                      |                                 |                                 |
|                               | <b>Summe</b>           | 262,9                      |                                 |                                 |
| <b>KOMPASS-Bauwerk (GV04)</b> | <i>QSV-Bereich</i>     | 127,5                      | 239,5                           | 1,18                            |
|                               | <i>KOMPASS-Bereich</i> | 155,4                      |                                 |                                 |
|                               | <b>Summe</b>           | 282,9                      |                                 |                                 |

Die Abweichungen zwischen der über die Proben ermittelte Einbaudichte und über die Massenbilanz ist sehr hoch, weshalb letztere als unzuverlässig eingestuft wird. Das Laborprogramm in SAVER II wird weitere Erkenntnisse über die tatsächlichen Dichten liefern. Zu Beginn des SAVER-Projektes wurde es jedoch als sinnvoll erachtet die Dichte über die Massenbilanz zu berechnen.

## 6.11. Korngrößenverteilung

Bei der Anwendung von Schleuderversatz kann durch das verschiedene Eigengewicht der unterschiedlich großen Körner und die kinetische Beschleunigung in Folge des Schleuderns eine Kornentmischung auftreten. Des Weiteren entsteht ein gewisser Rückpralleffekt, wenn das Material auf die Böschung trifft, wodurch sich gravitationsbedingt größere Körner an dem Böschungsfuß konzentrieren können. Diese Vermutungen wurden labortechnisch für KOMPASS-Material untersucht, da es in den GESAV-Projekten bereits für GESAV-Material durchgeführt wurde.

Es zeigte sich, dass in Richtung des Böschungsfußes der Anteil an Grobkorn zunimmt (Abbildung 68). Dies bestätigt die Annahme, dass durch das Schleuderverfahren eine leichte gravitationsbedingte Verschiebung der Sieblinie stattfindet.

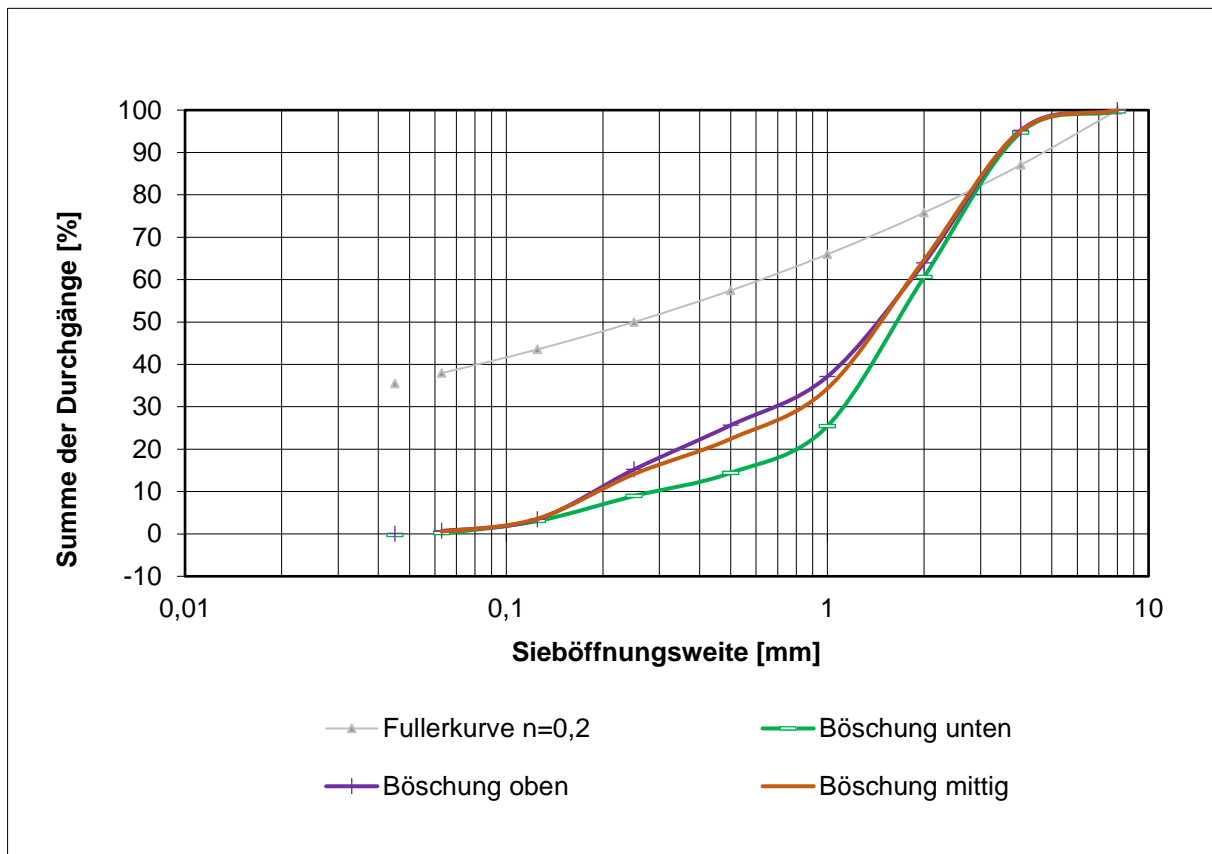


Abbildung 68: Siebanalyse von KOMPASS-Material aus verschiedenen Böschungshöhen

## 6.12. Böschungswinkel

Bei beiden Bauwerken wurde der Böschungswinkel mit derselben Methodik (vgl. 5.10.12, S. 53) ermittelt. Für das KOMPASS-Material ergab sich ein Wert von  $33^\circ$ , welcher mit der Annahme für die Materialberechnung übereinstimmte. Für das GESAV-Material ergab sich ein Wert von ca.  $39^\circ$ , was um  $7^\circ$  von der Berechnungsannahme abweicht. Bereits im GESAV-II-Projekt stellte sich heraus, dass der tatsächliche Böschungswinkel bei ca.  $39^\circ$  lag, anstatt dem im Labor ermittelten Wert von  $33^\circ$ . Damit validieren die Ergebnisse im SAVER-Projekt, dass für zukünftige Berechnungen ein Wert von  $39,5^\circ$  genutzt werden sollte.

Der gegenüber dem Labor erhöhte erreichbare Böschungswinkel ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Materialverdichtung zurückzuführen, welche durch den Einbauprozess bedingt ist.

## 6.13. Erfahrungen und Optimierungen beim Einbau

Während des Materialeinbaus haben sich nicht nur im Vergleich zu der GESAV-Projektreihe neue Erkenntnisse und praktischen Erfahrungen ergeben, sondern auch erstmals zum KOMPASS-Referenzmaterial. Für zukünftige großtechnische Materialanwendungen oder ähnlich aufgebaute Großversuche sollten diese berücksichtigt werden, um so ggf. mögliche Fallstricke zu vermeiden.

### 6.13.1. Messtechnik

Im SAVER-Projekt wurde ausschließlich die gleiche Messtechnik wie in den GESAV-Projekten verwendet. Diese hat sich weiterhin als zuverlässig und robust trotz der fordernden Umgebungsbedingungen erwiesen. Während des Projektes entstanden zeitweise Probleme durch temporäre Ausfälle des Stromnetzes der gesamten Grube. Da der Logger für die IMKO-Sensoren dauerhaft mit Strom versorgt werden muss über einen Netzstecker kann beim Ausfall des Grubenstromnetzes ein Datenverlust entstehen, wenn dieser nicht kontrolliert herunterfährt. Für das kontrollierte Herunterfahren sorgt eine verbaute Notbatterie, welche jedoch keine Warnmeldung abgibt falls diese leer ist. Dadurch entstanden geringfügige Datenverluste, welche jedoch nicht als problematisch eingeschätzt werden, da die Werte im Ausfallzeitraum interpoliert werden können. Das Wechseln der Batterie wurde in Zusammenarbeit mit dem Service-Dienstleister durchgeführt. Diese sorgt für ein kontrolliertes Herunterfahren des Loggers

und für die Vermeidung von Datenverlust im Falle eines Stromausfalls. Für zukünftige Vorhaben ist es daher empfehlenswert den Error-Log des Loggers in regelmäßigen Abständen auszulesen, da die Batteriewarnmeldung nicht automatisch ausgegeben wird.

Auf Grund der vergleichsweise hohen Kosten für die Sensortechnik soll im Folgeprojekt SAVER II über eine studentische Arbeit untersucht werden, ob es günstigere Alternativen mit gleicher Präzision und Leistung gibt. Insbesondere kapazitive Sensoren sollen auf ihre Eignung untersucht werden. Auf Grund der speziellen Rahmenbedingungen und der Korrosivität der Salzmaterialien sind die Anforderungen an die Messtechnik im Gesamten sehr hoch.

### 6.13.2. Materialbeschaffung

Auf Grund der geopolitischen Ereignisse während der Projektlaufzeit waren die Salzbinderkomponenten des GESAV-Materials starken Preisschwankungen ausgesetzt, welche jedoch auch in Zukunft weiterhin auftreten können. Da die Materialien über lange Zeit gelagert werden können ohne Reaktion mit der Umgebung, welche zur Nichtverwendbarkeit führen können, kann es ggf. empfehlenswert sein die Materialien mit großem Vorlauf zur tatsächlichen Verwendung zu bestellen und vorzuhalten.

### 6.13.3. Mischprozess

Der Mischprozess konnte erfolgreich hochskaliert werden auf eine großtechnische Mischung mit Hilfe von Ladern und entsprechenden Anbaugeräten im Vergleich zu GESAV II, wo die Mischung mit Hilfe eines Zwangsmischers erfolgte. Zukünftige Optimierungen des Mischprozesses können weitere Zeit- und Kostensenkungen ermöglichen. Die Hochskalierung sollte immer unter dem Kriterium erfolgen, dass die Vergleichmäßigung des Materials im Mischprozess und das Mischverhältnis eingehalten und erfüllt wird.

### 6.13.4. Einbau

Auf Grund des Feinsalzanteils im QSV-Material und der naturtrockenen Einbringung war eine starke Staubbildung beim Einbringen mit der Schleuderversatzmaschine zu beobachten. Die Sichtweite des Bedieners betrug effektiv maximal einen Meter. Auch Sonderbewetterung mit

einem mobilen Lüfter hat keine signifikante Verbesserung erbracht. Das Nutzen einer Luttenleitung würde ggf. helfen. Die schwere Anwendbarkeit des Materials sollte jedoch nicht ins Gewicht fallen, da im realen Anwendungsfall Schnittsalz aus der Auffahrung verwendet werden soll, bei dem der Feinsalzanteil niedriger liegt.

Auf Grund der erschwerten Sichtverhältnisse durch die starke Staubbildung ist es zudem nahezu unmöglich den Firstspalt gezielt zu verschleudern, da der Bediener den Versatzstrahl der Maschine „blind“ steuern muss. In Falle des KOMPASS-Versatzkörpers musste daher der Firstspalt in der letzten Ebene des QSV-Materials händisch zugeschaufelt werden. Dies wäre im Realfall auf Grund der unmittelbaren Nähe zum POLLUX nicht möglich.

Auf Grund des zeitlich verzögerten Setzens des Feinsalzstaubs bildet sich eine dünne Feinsalzschiicht auf den Zwischenböschung, welche möglicherweise zu Schwach- und potentiellen Scherstellen innerhalb des Versatzkörpers zwischen den einzelnen Ebenen führen kann (vgl. Abbildung 46, S.60).

## 7. Laborprogramm

Begleitend zu den untertägigen Großversuchen wurde für die Qualitätssicherung, Validierung und Messtechnik-Kalibrierung ein Laborprogramm in Freiberg bei der TUBAF in eigenen Laboren durchgeführt.

### 7.1. Qualitätssicherung

#### 7.1.1. Chemisch

Die zu Beginn des Projektes bestellten und gelieferten Ausgangskomponenten ( $K_2SO_4$  Leuna LCP,  $\beta$ -Calciumhalbhydrat Knaf) wurde stichprobenartig röntgenographisch der Phasenbestand überprüft. Dabei konnten für das  $K_2SO_4$  (Abbildung 69) keine Verunreinigungen detektiert werden. Das  $\beta$ -Calciumhalbhydrat enthält neben  $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$  geringe Anteile an  $CaSO_4$  (Anhydrit), welcher ebenfalls mit den anderen Ausgangskomponenten zum Polyhalit umgesetzt wird (Abbildung 70). Kieserit war untertage noch in teils geöffneten Big Bags in ausreichender Menge vorhanden. Neben Kieserit sind geringe Anteile an NaCl und Langbeinit ( $K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$ ) enthalten (Abbildung 71), welche als Begleitsalze des Kieserits natürlichen Ursprungs auftreten können und in keinsterweise die Polyhalitbildung stören. Die Salzgrus-

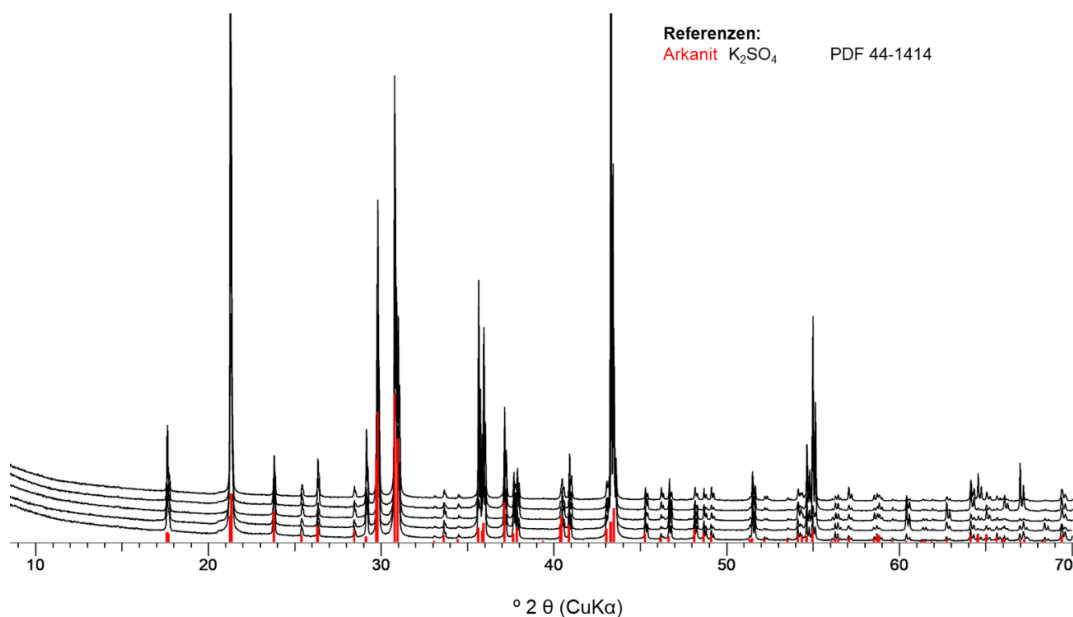


Abbildung 69: Pulverdiffraktogramme der  $K_2SO_4$ -Proben von Leuna LCP

Fraktionen Feinkorn, Band B6 und Band B8 enthalten neben NaCl in geringen Anteilen Anhydrit ( Abbildung 72).

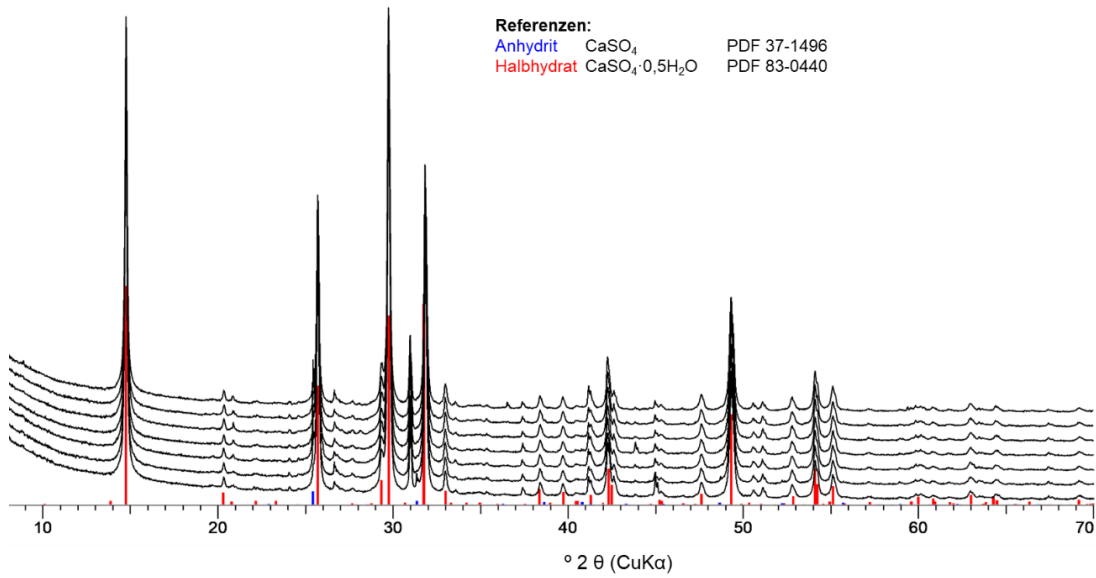


Abbildung 70: Pulverdiffraktogramme der  $\beta$ -Calciumhalbhydrat-Proben der Fa. Knauf.

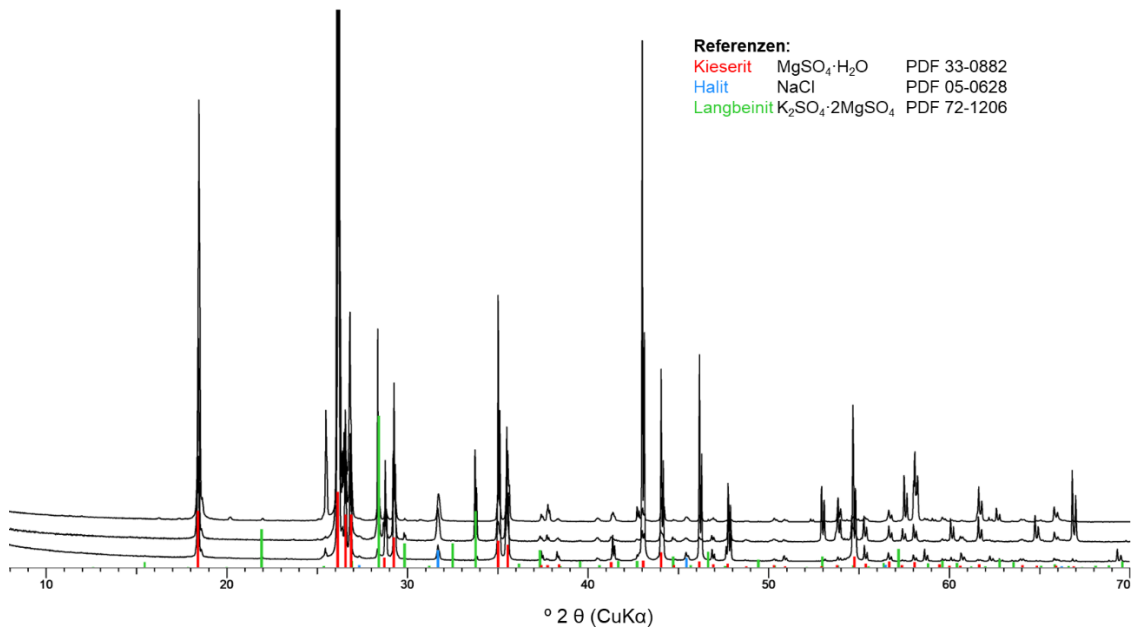


Abbildung 71: Pulverdiffraktogramm der Kieserit-Proben.

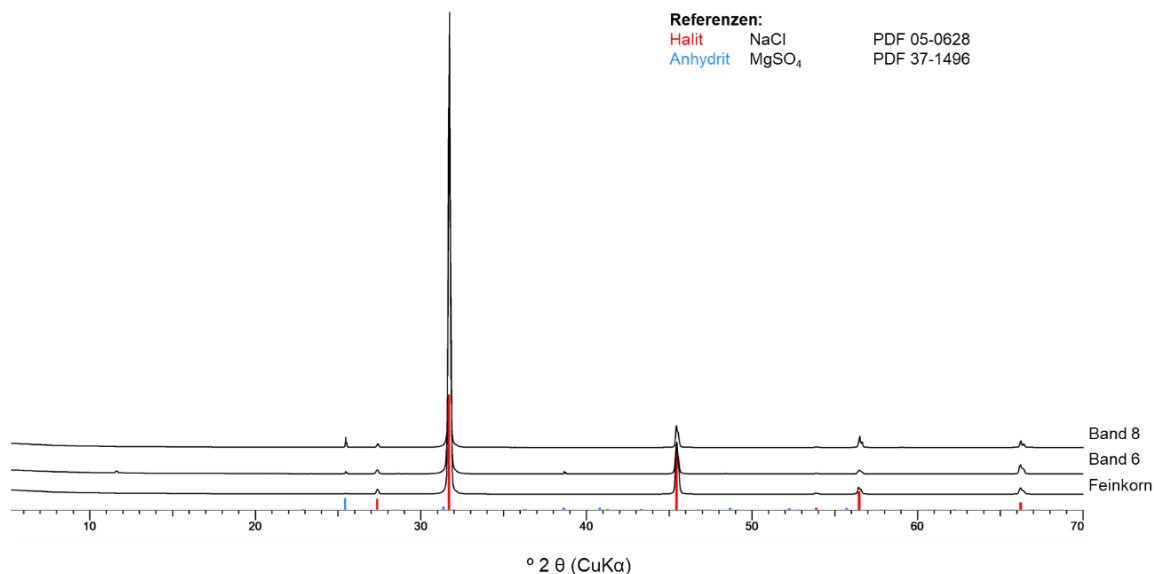


Abbildung 72: Pulverdiffraktogramme der Salzgrus-Fractionen.


Weiterhin war am Versuchsort noch ein Rest der DEUSA-Lösung vorrätig. Die nasschemische Überprüfung der Konzentrationen entspricht der im Datenblatt angegebenen Zusammensetzung (Tabelle 13).

Tabelle 13: Qualitätskontrolle der noch vorhandenen DEUSA-Lösung

|   |                      |               |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|---|----------------------|---------------|---|------|-----------------------|-----|--|--|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--------------------|--|--------------------|----------|-----------------------|--|--|--|-------------|--|-------|------------------------|-----|-----|--|--|------------------|----------------------|--|-------------------|------|------|--|--|--|---------------|-------|--|------|------|--|--|--|----------------|--------|--|------|------|--|--|--|-----------------|----------------------|--|------|------|------|--|--|---------------|----------------------|--|------|------|------|--|--|
| IfAC-TUBAF-Analyseergebnisse für<br>DEUSA S30 <sub>ES</sub><br>(Probenahme Januar 2022) |                      |               | Stand: 23.07.2021   |      | Spezifikation         |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|   |                      |               | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="8" style="text-align: left;"><b>Allgemeine Produktinformationen</b></td> </tr> <tr> <td colspan="3">Artikelbezeichnung</td> <td colspan="5">SEs 30 %</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Handelsname</td> <td colspan="5">Magnesiumchloridlösung</td> </tr> <tr> <td colspan="3">Formel</td> <td colspan="5">MgCl<sub>2</sub></td> </tr> </table>  |      |                       |     |  |  |                                  | <b>Allgemeine Produktinformationen</b> |  |  |  |  |  |  |  | Artikelbezeichnung |  |                    | SEs 30 % |                       |  |  |  | Handelsname |  |       | Magnesiumchloridlösung |     |     |  |  | Formel           |                      |  | MgCl <sub>2</sub> |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>Allgemeine Produktinformationen</b>  |                      |               |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Artikelbezeichnung  |                      |               | SEs 30 %  |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Handelsname   |                      |               | Magnesiumchloridlösung  |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Formel  |                      |               | MgCl <sub>2</sub>   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|   |                      |               | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="8" style="text-align: left;"><b>Chemische Zusammensetzung</b></td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td colspan="2" style="text-align: center;">Durchschnittswerte</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">Konzentrationsbereich</td> </tr> <tr> <td colspan="3"></td> <td style="text-align: center;">[g/l]</td> <td style="text-align: center;">[%]</td> <td style="text-align: center;">[%]</td> <td style="text-align: center;">[%]</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Magnesiumchlorid</td> <td>(MgCl<sub>2</sub>)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">395</td> <td style="text-align: center;">30,0</td> <td style="text-align: center;">29,0</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Kaliumchlorid</td> <td>(KCl)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">1,80</td> <td style="text-align: center;">0,14</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Natriumchlorid</td> <td>(NaCl)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">4,50</td> <td style="text-align: center;">0,35</td> <td colspan="3"></td> </tr> <tr> <td>Magnesiumsulfat</td> <td>(MgSO<sub>4</sub>)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">34,3</td> <td style="text-align: center;">2,60</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">3,00</td> </tr> <tr> <td>Calciumsulfat</td> <td>(CaSO<sub>4</sub>)</td> <td></td> <td style="text-align: center;">0,20</td> <td style="text-align: center;">0,10</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">0,20</td> </tr> </table> |      |                       |     |  |  | <b>Chemische Zusammensetzung</b> |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  | Durchschnittswerte |          | Konzentrationsbereich |  |  |  |             |  | [g/l] | [%]                    | [%] | [%] |  |  | Magnesiumchlorid | (MgCl <sub>2</sub> ) |  | 395               | 30,0 | 29,0 |  |  |  | Kaliumchlorid | (KCl) |  | 1,80 | 0,14 |  |  |  | Natriumchlorid | (NaCl) |  | 4,50 | 0,35 |  |  |  | Magnesiumsulfat | (MgSO <sub>4</sub> ) |  | 34,3 | 2,60 | 3,00 |  |  | Calciumsulfat | (CaSO <sub>4</sub> ) |  | 0,20 | 0,10 | 0,20 |  |  |
| <b>Chemische Zusammensetzung</b>  |                      |               |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|   |                      |               | Durchschnittswerte  |      | Konzentrationsbereich |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|   |                      |               | [g/l]   | [%]  | [%]                   | [%] |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Magnesiumchlorid  | (MgCl <sub>2</sub> ) |               | 395   | 30,0 | 29,0                  |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Kaliumchlorid   | (KCl)                |               | 1,80  | 0,14 |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Natriumchlorid  | (NaCl)               |               | 4,50  | 0,35 |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Magnesiumsulfat   | (MgSO <sub>4</sub> ) |               | 34,3  | 2,60 | 3,00                  |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| Calciumsulfat   | (CaSO <sub>4</sub> ) |               | 0,20  | 0,10 | 0,20                  |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
|   | <b>molal</b>         | <b>Masse%</b> |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>MgCl<sub>2</sub></b>   | 4,30                 | 28,23         |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>KCl</b>  | 0,05                 | 0,26          |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>NaCl</b>   | 0,11                 | 0,45          |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>MgSO<sub>4</sub></b>   | 0,24                 | 2,00          |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |
| <b>CaSO<sub>4</sub></b>   | 0,003                | 0,02          |   |      |                       |     |  |  |                                  |  |  |  |  |  |  |  |  |                    |  |                    |          |                       |  |  |  |             |  |       |                        |     |     |  |  |                  |                      |  |                   |      |      |  |  |  |               |       |  |      |      |  |  |  |                |        |  |      |      |  |  |  |                 |                      |  |      |      |      |  |  |               |                      |  |      |      |      |  |  |

Da die noch vorhandene Menge an Lauge nicht ausreichend war, wurde weitere nachbestellt. Auf Grund von eingeschränkter Verfügbarkeit konnte nur ES33-Lösung geliefert werden, welche jedoch genauso geeignet ist. Die chemische Eingangskontrolle durch die TUBAF verlief beanstandungslos (Tabelle 14).

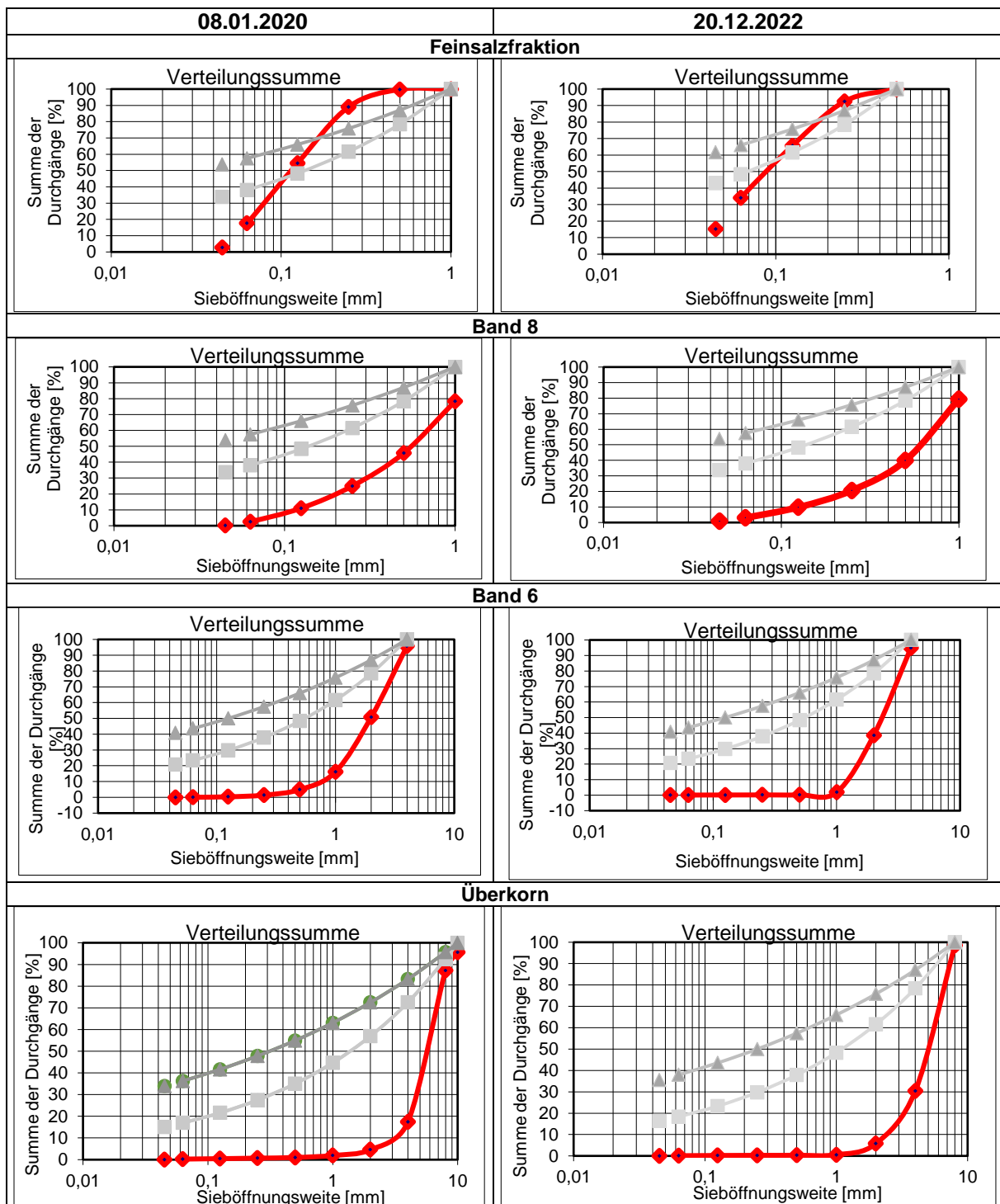
Tabelle 14: Qualitätskontrolle der nachbestellen DEUSA-Lösung

|   |              |               |  |  |                        |      |   |      |
|---|--------------|---------------|--|--|------------------------|------|---|------|
| IfAC-TUBAF-Analyseergebnisse für<br>DEUSA S33 <sub>ES</sub><br>(Probenahme August 2022) |              |               | Stand: 23.07.2021                      |  | Spezifikation          |      |  |      |
|   |              |               | <b>Allgemeine Produktinformationen</b> |  |                        |      |   |      |
|   |              |               | Artikelbezeichnung                     |  | S <sub>ES</sub> 33 %   |      |   |      |
|   |              |               | Handelsname                            |  | Magnesiumchloridlösung |      |   |      |
|   |              |               | Formel                                 |  | MgCl <sub>2</sub>      |      |   |      |
|   |              |               | <b>Chemische Zusammensetzung</b>       |  |                        |      |   |      |
|   |              |               |  |  | Durchschnittswerte     |      | Konzentrationsbereich   |      |
|   |              |               |  |  | [g/l]                  | [%]  | [%]   | [%]  |
|   |              |               | Magnesiumchlorid (MgCl <sub>2</sub> )  |  | 448                    | 33,0 | 32,0  |      |
|   |              |               | Kaliumchlorid (KCl)                    |  | 2,00                   | 0,15 |   |      |
|   |              |               | Natriumchlorid (NaCl)                  |  | 5,20                   | 0,35 |   |      |
|   |              |               | Magnesiumsulfat (MgSO <sub>4</sub> )   |  | 38,3                   | 2,80 |   | 3,00 |
|   |              |               | Calciumsulfat (CaSO <sub>4</sub> )     |  | 0,40                   | 0,03 |   | 0,10 |
|   | <b>molal</b> | <b>Masse%</b> |  |  |                        |      |   |      |
| <b>MgCl<sub>2</sub></b>   | 5,11         | 31,82         |  |  |                        |      |   |      |
| <b>KCl</b>  | 0,05         | 0,26          |  |  |                        |      |   |      |
| <b>NaCl</b>   | 0,12         | 0,45          |  |  |                        |      |   |      |
| <b>MgSO<sub>4</sub></b>   | 0,25         | 1,99          |  |  |                        |      |   |      |
| <b>CaSO<sub>4</sub></b>   | 0,003        | 0,02          |  |  |                        |      |   |      |

## 7.1.2. Siebanalyse

Um zu überprüfen, ob das von der GSES gelieferte Material in den angegebenen Korngrößenbereichen liegt, wurde für jede Kornfraktion eine Siebanalyse durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse mit denen aus GESAV II verglichen. Die Kriterien wurden erfolgreich erfüllt und die Siebanalysen zeigten gleiche Werte.

Tabelle 15: Vergleich der Sieblinien 2020 vs. 2022 (Grau Linien = Fullerkurven n=0,2; n=0,3)



## 7.2. Validierungsexperimente

Im Zuge der Messungen in den untertägigen Versatzkörpern ergaben sich offene Fragen hinsichtlich Prozessen, die im Inneren der Bauwerke ablaufen und durch die Sensorik aufgenommen wurden. Diese sind größtenteils erklärbar, bedürfen aber teilweise einem Ausschlussverfahren und/oder Validierung durch Laborexperimente.

Hauptsächlich handelte es sich bei den Validierungsexperimente um Versuche zur Klärung einzelner Feuchtigkeitsmesswertverläufe. Insbesondere der Sensor SDI12\_b-1 im KOMPASS-Bauwerk verzeichnete eine konstante Feuchtigkeitszunahme über den gesamten Betrachtungszeitraum. Da zwar andere Sensoren Feuchtigkeitsabnahmen verzeichneten, wenn auch nicht im gleichen Maße, war eine Hypothese, dass gravitationsbedingte Feuchtigkeitsmigration die Ursachen darstellen könnte. Des Weiteren wurde eine mögliche Korrelation zwischen Materialverdichtung und zunehmenden Feuchtigkeitswerten evaluiert.

Um die Hypothese der gravitationsbedingten Migration zu überprüfen, wurde ein Sicker Versuch durchgeführt. Dabei wurde das KOMPASS-Material in eine 3 m hohe Säule (D=100 mm) aus KG-Rohr gefüllt. Dies entspricht der Querschlagshöhe und Materialsäule über dem Sensor an seiner tatsächlichen Einbauposition unter Tage. Die Messung einer möglichen gravitationsbedingten Feuchtigkeitsmigration wurde für 45 Tage durchgeführt. Der Graph „MatMoist“ in Abbildung 73 zeigt den Verlauf der aufgezeichneten Feuchtigkeitswerte im KOMPASS-Material beim Säulenversuch. Es konnten lediglich Schwankungen aufgezeichnet werden, welche mit der Umgebungstemperatur korreliert wurden. Diese wurde über LogTags gemessen. Der

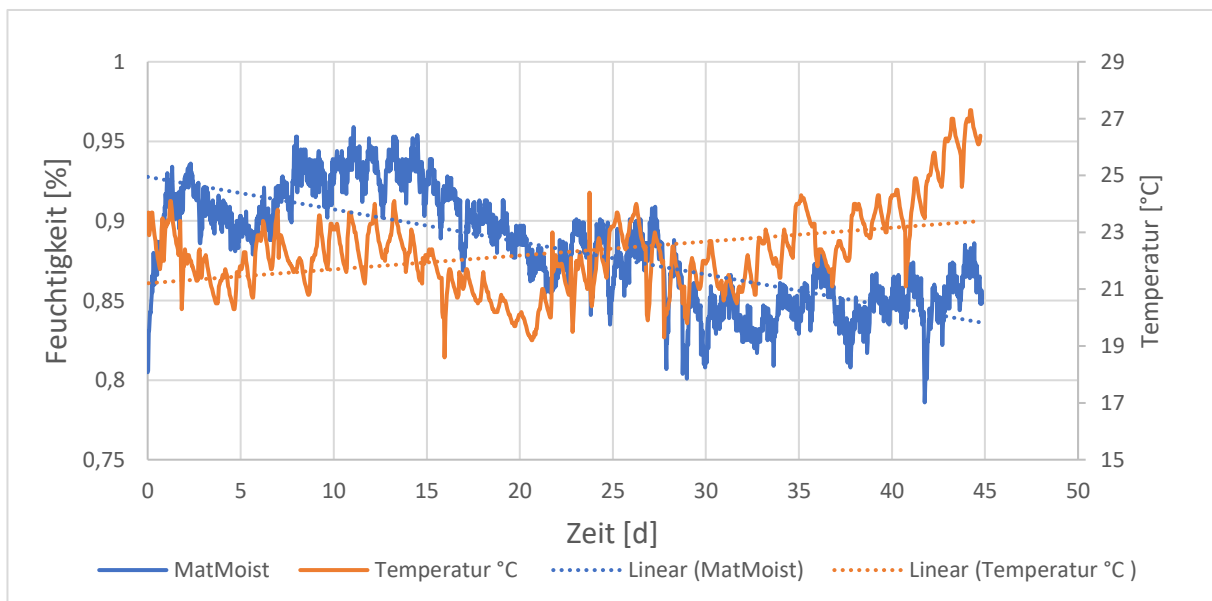


Abbildung 73: Feuchtigkeitsverlauf im Validierungstest für gravitationsbedingte Feuchtigkeitsmigration

Säulenversuch war in einer ungeheizten Halle aufgebaut. Über diesen Versuch konnte eine gravitationsbedingte Feuchtigkeitsmigration ausgeschlossen werden, da in der Realität bereits eine Zunahme seit Aufzeichnungsbeginn erfolgt (Abbildung 59, S.71)

Zudem wurde der Einfluss von zunehmender Materialverdichtung untersucht. Auf Grund der im Salz auftretenden Konvergenzen, der damit einhergehenden Sohlenwölbung und dem Druck durch das Eigengewicht des Materials, wurde die Hypothese aufgestellt, dass das Material im Nahbereich um den Sensor SDI12\_b-1 zunehmend verdichtet wird und damit die Leitfähigkeits- und respektive die Feuchtigkeitsmesswerte zunehmen. Normalerweise werden die verwendeten Feuchtigkeitssensoren in nicht-dynamischen Messumgebungen, wie z. B. Feldern, oder Schüttguthaufen eingesetzt. D. h. sie sind in diesen Fällen keiner Konvergenz ausgesetzt.

Zur Validierung wurde ein PICO32-Sensor in einen Plexiglaskasten eingebaut, welcher ein bekanntes Volumen aufwies. In regelmäßigen Intervallen wurde dann die Einbaudichte durch Materialkompaktion erhöht. Dabei zeigte sich, dass die gemessenen Feuchtigkeitswerte entsprechend zunehmen (Abbildung 74). Daher ist die Hypothese, dass die Feuchtigkeitswerte beim Sensor SDI12\_b-1 kompaktionsbedingt konstant zunehmen, als realistischer zu betrachten.

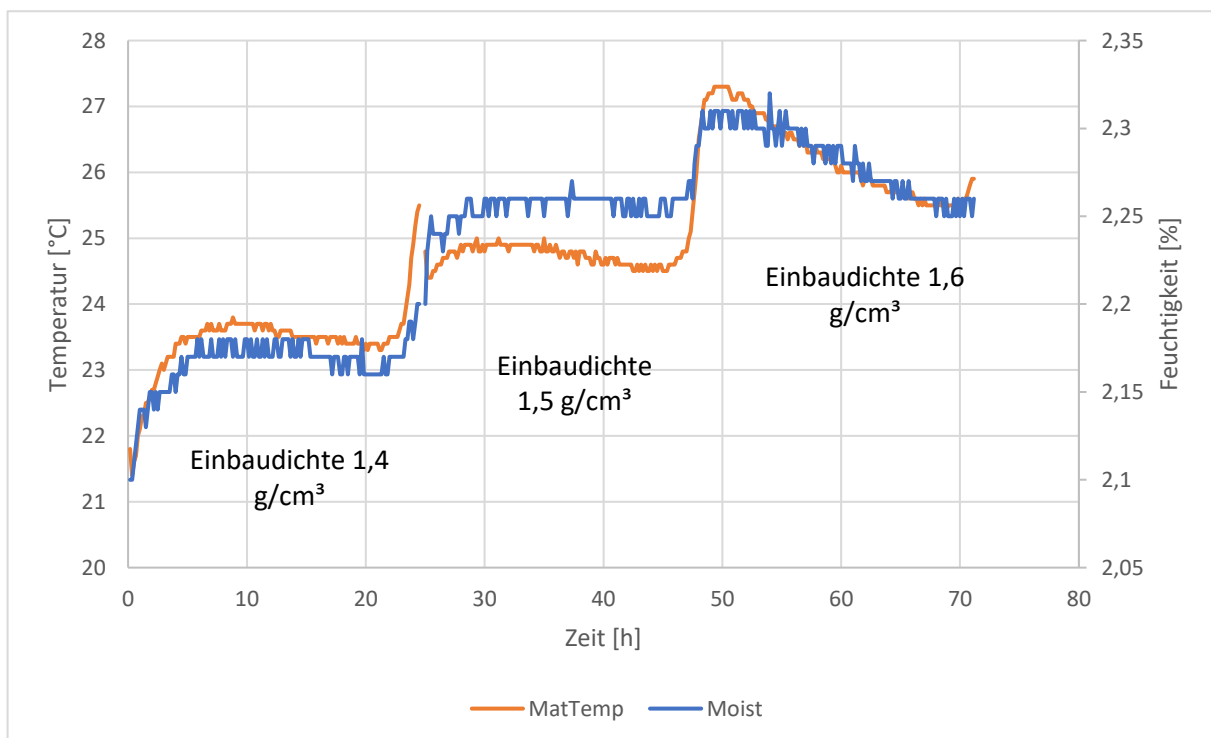


Abbildung 74: Validierungsexperiment zur Korrelation von Feuchtigkeitszunahme und zunehmender Einbaudichte

## 8. Zusammenfassung

Im SAVER I -Projekt konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass die im GESAV-II-Projekt entwickelte Versatzmethode auch auf konventionellen angefeuchteten Salzgrus übertragbar ist. Dabei wurde mit der kombinierten Schleuderversatz-Vibrationsmethode eine Einbaudichte von  $1,62 \text{ t/m}^3$  beim angefeuchteten Salzgrus (KOMPASS-Material) erzielt. Beim GESAV-Material beträgt die Einbaudichte  $1,5 \text{ t/m}^3$ . Durch den Aufbau der Versatzkörper konnten realitätsnahe Messdaten generiert werden, welche zur weiteren Verwendung und Forschung genutzt werden können. Insbesondere die erstmalige großtechnische Anwendung des KOMPASS-Materials ermöglicht die Nutzung von Realdaten (wie der Einbaudichte) als Eingangsdaten für Modellierungen.

Durch den gleichen Aufbau sowie die identische Instrumentierung beider Großversuche wurde direkt vergleichbare Daten generiert für 2 potentielle für die Verfüllung von Infrastrukturbereichen geeignete Salzgrusversatzmaterialien. Die Realitätsnähe des Projektes wurde weiterhin durch die erfolgreiche Entwicklung einer POLLUX-Attrappe sowie deren Einbau in beide Versuchsorte erhöht.

Durch die Verwendung von 3 verschiedenen Salzgrusmaterialien (QSV, GESAV, KOMPASS) konnten nicht nur Ergebnisse aus den FuE-Projekten GESAV I + II und KOMPASS I + II validiert, sondern auch neue Erkenntnisse zu Materialparametern wie Setzungs-, Druck- und Feuchtigkeitsentwicklung gewonnen werden. Des Weiteren ermöglichte der Versatzkörperaufbau die Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen den Materialien sowie die Untersuchung von Prozessen, wie z. B. Fluidmigration auf Grund von Feuchtigkeitsgradienten. Damit konnte festgestellt werden, dass im Betrachtungszeitraum trotz der unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalte keine Fluidmigration in den jeweiligen QSV-Bereich der Versatzkörper auftrat und somit sowohl das GESAV als auch KOMPASS-Material für einen potentiellen Einsatz im Nahbereich zu den Einlagerungsstrecken geeignet sind.

Der Be- und Weiterbetrieb der untertägigen Versuchsorte hat eine Datenbasis geschaffen für die Weiterverwendung in Partner- und Folgeprojekten sowie erstmals einen direkten Vergleich von den verschiedenen Salzgrusmaterialien im Realmaßstab ermöglicht.

Die erneute geochemische Begleitung der Versuche hat ergeben, dass sich das Polyhalit bereits nach 8 Monaten vollständig gebildet hat und nicht wie bisher angenommen nach 10 Monaten. Eine potentielle Verfüllung mit GESAV-Material konnte so nochmals zeitlich optimiert werden.

## 9. Weiterer FuE-Bedarf und Ausblick auf SAVER-II-Projekt

Da die einsetzende Konvergenz- und Setzungsprozesse über einen langen Zeitraum ablaufen, ist ein Weiterbetrieb der Versuchsstände in SAVER II vorgesehen. Dadurch sollen weiterhin kontinuierlich In-Situ-Daten gesammelt, ausgewertet und bereitgestellt werden.

Die aus beiden Versatzkörpern gewonnenen Proben sollen in einem umfassenden Laborprogramm auf Parameter wie Permeabilität, Porosität, Dichte und Scher- bzw. Druckfestigkeit untersucht werden, um so einen detaillierteren Einblick und ein tiefgreifendes Verständnis über die in den Bauwerken vorhandenen Bedingungen zu erhalten. Die dadurch generierten Ergebnisse sind potentiell wichtig und nützlich als zukünftige Eingangsparameter von Langzeitmodellierungen.

Neben der messtechnischen Überwachung soll auch die geochemische Begleitung fortgeführt werden, um den Phasenbestand in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren.

Die vorhandenen Versatzkörper bieten eine Ressource für weitere Probennahmen, wie z. B. für Schneidversuche oder zur Analyse der Übergangszonen durch Bohrkernentnahme.

Da bereits im SAVER-Projekt erste Laborversuche zur thermischen Beeinflussung des Materials durchgeführt werden, soll dies im Folgeprojekt weiterhin aufgegriffen werden. Da im Bergwerk der GSES Temperaturen von ca. 26 °C herrschen aber in einem potentiellen Endlager mit 40 °C geplant wird [3], gilt es zu klären inwiefern die Temperaturen das Material ggf. beeinflussen. Erste Versuche haben bereits höhere Druckfestigkeiten ergeben, was grundsätzlich als positiv zu bewerten ist und dem Material damit sogar zuträglich in Hinblick auf die Langzeitstabilität.

## 10. Literaturverzeichnis

- [1] S. Becker und H. Mischo, „Abschlussbericht Gefügestabilisierter Salzgrusversatz (GESAV) - Phase 1 (FKZ.: 02E11092),“ 23 Oktober 2017. [Online]. Available: [https://www.ptka.kit.edu/Entsorgung/02E11092-TUBAF\\_GESAV\\_I\\_.pdf](https://www.ptka.kit.edu/Entsorgung/02E11092-TUBAF_GESAV_I_.pdf). [Zugriff am 25 Juli 2024].
- [2] S. Pötzsch, L. Schaarschmidt und H. Mischo, „Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben GESAV II (FKZ.: 02E11557),“ Freiberg, 2021.
- [3] Gesellschaft für Reaktorsicherheit, „Endlagerkonzepte - Bericht zum Arbeitspaket 5 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben,“ 2012. [Online]. Available: [https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-272\\_neu.pdf](https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-272_neu.pdf). [Zugriff am 21 Mai 2024].
- [4] BGE Technology GmbH, „TREND - Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern (FKZ.: 02E11749),“ 10 August 2021. [Online]. Available: [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/FuE\\_Berichte/TREND/2021-10-08\\_E11749\\_Abschlussbericht\\_TREND.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/TREND/2021-10-08_E11749_Abschlussbericht_TREND.pdf). [Zugriff am 21 Mai 2024].
- [5] Gesellschaft für Reaktorsicherheit, „Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz - REPOPERM Phase 1 (FKZ.: 02 E 10477),“ September 2009. [Online]. Available: <https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-254.pdf>. [Zugriff am 21 Mai 2024].
- [6] Gesellschaft für Reaktorsicherheit, „KOMPASS - Compaction of crushed Salt for the safe Containment (FKZ: 02E11708),“ August 2020. [Online]. Available: <https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs-608.pdf>. [Zugriff am 22 Mai 2024].
- [7] M. Jobmann, C. Müller und S. Schirmer, „Remaining porosity and permeability of compacted crushed rock salt backfill in a HLW repository (FKZ.: 02E10730),“ November 2015. [Online]. Available: [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/FuE\\_Berichte/REPOPERM-II-Project\\_Remaining-porosity-and-permeability-of-compacted-crushed-rock-salt-backfill-in-a-HLW-repository\\_DBE-TECHNOLOGY-contribution.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/REPOPERM-II-Project_Remaining-porosity-and-permeability-of-compacted-crushed-rock-salt-backfill-in-a-HLW-repository_DBE-TECHNOLOGY-contribution.pdf). [Zugriff am 25 Juli 2024].

- [8] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, „The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste Phase II (FKZ.: 02E8715),“ Dezember 1999. [Online]. Available: <https://www.grs.de/sites/default/files/publications/GRS-161.pdf>. [Zugriff am 25 Juli 2024].
- [9] Gesellschaft für Reaktorsicherheit, „RESUS - Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen - GRS 568,“ August 2020. [Online]. Available: <https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs-568.pdf>. [Zugriff am 21 Mai 2024].
- [10] TU Bergakademie Freiberg; DBE Technology GmbH, „Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle -ELSA- TV1+2 (FKZ.: 02E10921/02E10931),“ 30 April 2013. [Online]. Available: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb14/782505570.pdf>. [Zugriff am 22 Mai 2024].
- [11] TU Bergakademie Freiberg; BGE Technology GmbH, „Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle (ELSA - Phase II): Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse und Test von Funktionselementen von Schachtverschlüssen (FKZ.: 02E11193A/B),“ März 2021. [Online]. Available: [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/FuE\\_Berichte/ELSA-2/2020\\_ELSA\\_II-ZAB.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/ELSA-2/2020_ELSA_II-ZAB.pdf). [Zugriff am 22 Mai 2024].
- [12] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, „The TSS-Project: Thermal Simulation of Drift Emplacement (FKZ.: 02E8211A2),“ März 1996. [Online]. Available: [https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs\\_127.pdf](https://www.grs.de/sites/default/files/publications/grs_127.pdf). [Zugriff am 22 Mai 2024].
- [13] Bechthold und e. al, „Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS Project) (FKZ.: EUR19124EN),“ 1999. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/49ae90df-e3a6-4bd5-b55e-e505a9a15753>. [Zugriff am 22 Mai 2024].
- [14] Bechthold und e. al, „Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt (BAMBUS II Project) (FKZ.: EUR20621EN),“ 2004. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/68558bff-d5d4-4202-814a-94b3a2ecee68>. [Zugriff am 22 Mai 2024].

- [15] Erlebnisbergwerk-Betreibergesellschaft mbH, „Unser Schatz ist das Salz - ein Lebenselixier für Mensch, Pflanze und Tier,“ [Online]. Available: <https://www.erlebnisbergwerk.com/index.php?id=12>. [Zugriff am 23 Mai 2024].
- [16] DBE Technology GmbH, „Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - Abschlussbericht (FKZ.: 02E9733),“ März 2007. [Online]. Available: [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/FuE\\_Berichte/Genesis/GENESIS-\\_Generisches\\_Endlager\\_im\\_Tonstein.pdf.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/FuE_Berichte/Genesis/GENESIS-_Generisches_Endlager_im_Tonstein.pdf.pdf). [Zugriff am 28 Mai 2024].
- [17] Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, „Kristallin I - Safety Assessment Report,“ Juli 1994. [Online]. Available: [https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/e\\_ntb93-022.pdf](https://nagra.ch/wp-content/uploads/2022/08/e_ntb93-022.pdf). [Zugriff am 28 Mai 2024].
- [18] D. M. Gruner, Interviewee, *Fachgespräch zu ELSA-Projekt und Nutzungsmöglichkeiten des Materials in SAVER*. [Interview]. 21 Juli 2022.
- [19] United States Geological Survey, „Mineral Commodity Summaries 2024,“ 31 Januar 2024. [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024.pdf>. [Zugriff am 31 Mai 2024].
- [20] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, „Behälter für radioaktive Stoffe,“ [Online]. Available: <https://tes.bam.de/TES/Content/DE/Standardartikel/Umschliessungen/Radioaktive-Stoffe/beispiele-behaelterpruefungen-radioaktiv.html#:~:text=POLLUX%20k%C3%B6nnte%20je%20nach%20Bauart,beladungen%20bis%20zu%2065%20Tonnen..> [Zugriff am 6 Juni 2024].
- [21] BGE Technology GmbH, „Präsentation zu KoBrA-Projekt,“ 19 Januar 2020. [Online]. Available: [https://www.bge-technology.de/fileadmin/user\\_upload/MEDIATHEK/vortrag/2020-02-19\\_Bollingerfehr-Warum\\_KoBrA\\_Workshop.pdf](https://www.bge-technology.de/fileadmin/user_upload/MEDIATHEK/vortrag/2020-02-19_Bollingerfehr-Warum_KoBrA_Workshop.pdf). [Zugriff am 6 Juni 2024].
- [22] HOBAS, „Hobas GFK-Rohre und Rohrsysteme,“ [Online]. Available: <https://www.hobas.com/de/products/>. [Zugriff am 6 Juni 2024].
- [23] T. Popp, „Präsentation auf KOMPASS II Meeting am 24.11.2021,“ Braunschweig, 2021.
- [24] Google, „Google Maps Darstellung Sondershausen,“ 2024.

- [25] GeoSLAM Ltd. , „ZEB-REVO User Manual v3.0.0,“ 2017. [Online]. Available: <https://download.geoslam.com/docs/zeb-revo/ZEB-REVO%20User%20Guide%20V3.0.0.pdf>. [Zugriff am 29 Mai 2024].
- [26] M. Pannach, „Aufnahme von GESAV-Material unter Rasterelektronenmikroskop,“ Freiberg, 2016.
- [27] Statista, „Price for potassium chloride from 2015 to 2022 with a forecast for 2023 and 2024,“ 14 Mai 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/469705/potassium-chloride-price-forecast/>. [Zugriff am 31 Mai 2024].
- [28] World Bank , „April 2023 Commodity Markets Outlook: Lower Prices, Little Relief,“ 29 April 2023. [Online]. Available: <https://reliefweb.int/attachments/a1d2103f-2645-4acf-9f2f-c43f1c3dc997/CMO-April-2023.pdf>. [Zugriff am 31 Mai 2024].
- [29] Bauhaus , „Bosch Professional Laserentfernungsmesser GLM 80 + Stativ BT150,“ [Online]. Available: <https://www.bauhaus.info/entfernungsmesser/bosch-professional-laserentfernungsmesser-glm-80-stativ-bt150/p/26321770>. [Zugriff am 24 Juni 2024].