

**Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile  
Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für  
UTD/UTV**

**Abschlussbericht**

Projektleiter: Prof. Dr. Peter Knoll

Direkte Partner: TU Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau  
Institut für Anorganische Chemie



Institut für Gebirgsmechanik GmbH,  
Leipzig



Kali-Umwelttechnik GmbH,  
Sondershausen



Ingenieurpartnerschaft für Bergbau,  
Wasser und Deponietechnik, Wilsnack &  
Partner, Freiberg

BMBF - Förderkennzeichen

02 C 0942

Laufzeit

1.10.2002 – 31.10.2004

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C0942 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

**Inhaltsverzeichnis**

<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>8</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>1    GEOCHEMISCH-LÖSEKINETISCHE VORAUSSETZUNGEN UND TECHNISCH/KONSTRUKTIVE MAßNAHMEN ZUR VERHINDERUNGEN VON LÖSEERSCHEINUNGEN IM VERSCHLUSSBEREICH .....</b>	<b>16</b>
1.1    Analyse nationaler und internationaler Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge .....	16
1.2    Prinzipielle Möglichkeiten der Verhinderung von Auflöseerscheinungen.....	18
1.2.1    Chemische Grundlagen .....	18
1.2.2    Schlussfolgerungen für ein auf Kristallisation basierendes Dichtungskonzept .....	21
1.3    Schlussfolgerungen und prinzipielle Lösungswege für ein mögliches Grundkonzept.....	22
1.4    Analyse der technischen Realisierbarkeit der favorisierten Prinzipien .....	25
<b>2    ANALYSE DER WIRKUNGSBEDINGUNGEN UND ABLEITUNG DER ANFORDERUNGEN.....</b>	<b>27</b>
2.1    Untersuchung der mineralogischen, geologischen und lagerstättenkundlichen Bedingungen .....	28
2.1.1    Ausgangszustand.....	28
2.1.2    Durchgeführte Arbeiten .....	30
2.1.3    Mikrostratigraphische Untersuchungen an Kieserit-TachyhydritSchichten mit besonders intensiven Verwitterungerscheinungen .....	33
2.1.4    Ausbildung einer aufgelockerten und durchfeuchteten Zone im Bereich der Montagekammer .....	37
2.2    Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten carnallitischer Gesteine.....	43
2.3    Permeabilitätsuntersuchungen.....	44
2.4    Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum Arbeitspaket 2 .....	46
<b>3    CHARAKTERISIERUNG UND MODELLIERUNG DER ALZ ALS WERKZEUG ZUR BEMESSUNG DES VERSCHLUSSES .....</b>	<b>48</b>
3.1    Zusammenfassung des Kenntnisstandes zur ALZ und zum Spannungsfeld um die Maschinenstrecke auf der 3a-Sohle .....	48
3.1.1    Ausdehnung der ALZ .....	49
3.1.2    Charakterisierung potentieller Wegsamkeiten .....	51
3.2    Gesteinsmechanische Laboruntersuchungen.....	52
3.2.1    Probenmaterial - Lithologische Charakterisierung .....	53
3.2.2    Ergebnisse zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Carnallitit .....	54
3.2.3    Materialparameter zum Festigkeits- und Entfestigungsverhalten.....	55
3.2.4    Untersuchungen zur Scherfestigkeit von geschichtetem Carnallitit .....	56

---

<b>3.3 Modellstudie für ein hypothetisches Verschlussbauwerk Teutschenthal.....</b>	<b>58</b>
3.3.1 Berechnungsmodell.....	58
3.3.2 Berechnungsfälle und Berechnungsablauf.....	59
3.3.3 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	60
3.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Modellrechnungen .....	62
<b>3.4 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>62</b>
<b>4 VORAUSSETZUNG FÜR EINE LÖSUNGSINDUZIERTE KRISTALLISATION ZUR ABDICHTUNG DER ALZ .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1 Quantitative und qualitative Analysen der Löse- und Kristallisationsgeschwindigkeiten.....</b>	<b>65</b>
<b>4.2 Laboruntersuchungen für die Bedingungen der GTS .....</b>	<b>67</b>
4.2.1 Zone I.....	67
4.2.2 Zone II.....	72
4.2.3 Zone III .....	73
<b>4.3 Konsequenzen für den Aufbau einer Vorschüttung.....</b>	<b>75</b>
<b>5 WIRKPRINZIPIEN UND MÖGLICHKEITEN FÜR EINE LANGZEITLICHE ERTÜCHTIGUNG DER ALZ.....</b>	<b>77</b>
<b>5.1 In situ Untersuchungen zur Ausbildung der ALZ und ihrer prinzipiellen Abdichtbarkeit.....</b>	<b>77</b>
5.1.1 Bestimmung der Stoßsensibilität und Einsatz von Schutzmedien .....	77
5.1.2 Bestimmung von Feuchtigkeitsprofilen an in situ Proben .....	79
5.1.3 Georadarerkundung der konturnahen Auflockerungszone .....	80
5.1.4 Geoelektrische Tomographie zur Standortcharakterisierung und zum Versuchsmonitoring .....	80
<b>5.2 Vergütung der ALZ durch Penetration / Injektion.....</b>	<b>82</b>
5.2.1 MgO-Systeme .....	82
5.2.2 Spezialbitumina .....	85
<b>5.3 Halbtechnische in situ Versuche .....</b>	<b>86</b>
5.3.1 Simulation einer Bitumenkammer im Bohrloch .....	86
5.3.2 Test von Bentonitdichteelementen in Bohrlöchern .....	88
5.3.3 Test von MgO-Beton-Elementen in Bohrlochversuchen.....	91
5.3.4 Dichtungsverhalten von Elementen aus Injektionsbitumen .....	94
<b>5.4 Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen polymineralischen Salzproben und ausgewählten Salzlösungen.....</b>	<b>97</b>
5.4.1 Zielstellung .....	97
5.4.2 Auswahl von Modelllösung .....	97
5.4.3 Versuchsergebnisse.....	98
5.4.4 Bewertung der Versuchsergebnisse .....	98
5.4.5 Zusammenfassung.....	100

---

<b>6 MÖGLICHE BAUMATERIALIEN .....</b>	<b>101</b>
<b>6.1 MgO-Beton.....</b>	<b>101</b>
6.1.1 Zielstellung .....	101
6.1.2 Versuchsergebnisse.....	102
6.1.3 Zusammenfassung.....	105
<b>6.2 Dauerplastische und ortsstabile Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern .....</b>	<b>106</b>
6.2.1 Zielstellung .....	106
6.2.2 Einordnung und Charakterisierung des Baustoffsysteems .....	106
6.2.3 Versuchsdurchführung.....	108
6.2.4 Versuchsergebnisse.....	108
6.2.5 Nachweis der Schutzwirkung .....	110
6.2.6 Zusammenfassung.....	110
<b>6.3 Baustoffe auf Anhydritbasis .....</b>	<b>111</b>
<b>7 ENTWICKLUNG DES GRUNDKONZEPTES.....</b>	<b>112</b>
<b>7.1 Schlussfolgerungen für das Verschlusskonzept Teutschenthal.....</b>	<b>112</b>
<b>7.2 Vorschlag einer prinzipiellen konstruktiven Gestaltung .....</b>	<b>117</b>
7.2.1 Vorbauelement.....	119
7.2.2 Hauptelement 1 .....	120
7.2.3 Hauptelement 2 .....	121
7.2.4 Nachbauelement.....	122
<b>8 LITERATUR.....</b>	<b>123</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Dammkonstruktion "Rocanville" .....	16
Abb. 2:	Multibarriere für Tunnelstrecken im Carnallitit [7].....	17
Abb. 3:	Jänecke-Diagramm des quinären Systems der ozeanischen Salz (Sättigung an NaCl) im Bereich der Punkte Q und R. ....	19
Abb. 4:	Ausschnitt aus dem Jänecke-Diagramm für das hexäre System der ozeanischen Salze bei 25 °C (bei Sättigung an NaCl und CaSO <sub>4</sub> ).....	20
Abb. 5:	Stabilitätsgebiete für Carnallit und Tachyhydrit im System NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O bei 25 °C bei gleichzeitiger Sättigung an NaCl .....	20
Abb. 6:	Einbringen von reaktiven Sulfaten in 3 Zonen zum Sichern der Sättigungsbedingungen und Erzeugung einer Abdichtwirkung unter dem Gesichtspunkt eines gleichzeitigen Antreffens von Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit in der ALZ.....	21
Abb. 7:	Mittel- bis grobkristalline, reine Tachyhydritnester bis Dezimetergröße und weißer Kieserit (Hochbohrung Schicht B-7) .....	32
Abb. 8:	Kompakte; cm-starke Lage von reinem, grobkristallinem bis späten Tachyhydrit (Hochbohrung Schicht B-13) .....	32
Abb. 9:	Faltenstruktur A etwa 20 m östl. von Abbau 155, Blick nach Ost .....	32
Abb. 10:	Faltenstruktur A am Nordstoß .....	32
Abb. 11:	Probe (UB 3) aus dem Unterer Band zu Versuchsbeginn.....	33
Abb. 12:	Probe (UB 3) aus dem Unterer Band nach 42 Stunden, Tiefe der ausgewitterten Bereiche < 3 mm .....	33
Abb. 13:	Markante Kieserit-Tachyhydrit-Bänder im Bereich des Referenzversuchsortes und verwitterungsanfällige Schichtenstrukturen.....	36
Abb. 14:	in der Tiefenlage stark varierender Verlauf der 600 Ωm-Isoohme im Bereich des Geoelektrikprofils 4 (K-UTEC) am Nordstoß .....	39
Abb. 15:	Untersuchung der konturnahen aufgelockerten und durchfeuchteten Zone am Versuchsort Montagekammer mittels verschiedener Verfahren und Methoden ...	41
Abb. 16:	Verlauf der minimalen Hauptspannung über die Bohrlochteufe in der Horizontalbohrung F-TTL-3 und der Firstbohrung F-TTI-4.....	43
Abb. 17:	Schematische räumliche Darstellung der Lage der Bohrungen entlang des Streckenverlaufes der 3A-Sohle (geologische Schichtung am Stoß entsprechend geol. Ansprache K-UTEC und Modellannahme eines gleichförmigen Einfallens des Schichten mit 4° und einer konstanten Schichtmächtigkeit).....	44
Abb. 18:	Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom Abstand vom Stoß für die Bohrungen 1, 3, 4 und 6 .....	45
Abb. 19:	Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom Abstand vom Stoß für die Bohrungen 2, 5 und 7 .....	45
Abb. 20:	Synthese zur Bestimmung der Ausdehnung der ALZ im Stoss anhand der teufenabhängigen Variation verschiedener Messverfahren und in situ-Beobachtungen.....	49
Abb. 21:	Geoelektrisches Ringprofil bei Profilmeter 34,5 m (Quelle: Geophysik, Uni Leipzig). (li.) Widerstandsverteilung im Ringraum (bis 1m) im Vergleich zur geolog. Profilaufnahme; (re.) Blick in die Strecke mit dem vorläufigen geologischen Profil (nach Landsmann, K-UTEC) .....	50
Abb. 22:	Interpretation der Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen von IBEWA in verschiedenen Bohrungen in der Untersuchungsstrecke .....	51
Abb. 23:	Stratigraphische Zuordnung der gewonnenen Großblockprobe bei Profilmeter 39. Gefügedarstellung Tachyhydrit-Carnallit in verschiedenen Maßstäben bis zur Mikrogefügedarstellung im Dickschliff (Schliffdicke ca. 200 µm) aus der Schicht 8 des IfG-Großblockes .....	53
Abb. 24:	Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Carnallitit in Abhängigkeit von der Verformung für verschiedene Manteldrücke - Labor Nr. 304: Teutschenthal-Experimentalort 3a-Sohle.....	54

Abb. 25:	Festigkeitsdiagramm Teutschenthal-Carnallitit (Labor Nr. 304: Experimentalort 3a-Sohle) im Vergleich mit älteren Untersuchungen an Teutschenthal-Carnallitit (Labor-Nr. 218 – ca. 1 m unterhalb der Spätbank) .....	55
Abb. 26:	Scherfestigkeit von geschichtetem Teutschenthal Carnallitit (Labor-Nr. 304) .....	57
Abb. 27:	Ausschnitt aus dem rotationssymmetrischen Berechnungsmodell .....	58
Abb. 28:	Berechnungsablauf mechanische und gekoppelte Berechnungen für die Bauzustände BZ1 bis BZ5. Beachte die Berechnungsunterschiede mc und mb ...	59
Abb. 29:	Fälle mb und mc, 1. Bauzustand, t = 40 Jahre, Ausdehnung der ALZ.....	60
Abb. 30:	Mechanische Berechnungen für den 3. Bauzustand: .....	61
Abb. 31:	Ergebnisse gekoppelter fluidmechanischer Berechnungen .....	61
Abb. 32:	Grundvorstellung zur Ableitung der löse- und kristallisatiskinetischen Gleichungen (nach [19]).....	65
Abb. 33:	Schema Zone I.....	67
Abb. 34:	Ausschnitt aus den RAMAN-Spektren während der Umsetzung von HH in ges. NaCl-Lsg. ....	68
Abb. 35:	Ausschnitt aus den in-situ RAMAN- Spektren der Bodenkörper: Änderung des HH-Phasen-bestands bei der Umsetzung in den Lösungen 2 - 4 nach 1 Tag und nach 4 Tagen .....	69
Abb. 36:	Ausschnitte aus den RAMAN-Spektren zur Detektion der zeitabhängigen Umwandlung von HH zu Gips in Q-Lösungen: a) in "dünnerer" Q-Lösung A1, b) in Q-Lösung A2, .....	70
Abb. 37:	Ausschnitte aus den RAMAN-Spektren zur Detektion der zeitabhängigen Umwandlung von HH in Q-Lösung A2 bei unterschiedlichem Feststoff-Lösungs-Verhältnis: .....	70
Abb. 38:	a) Ansicht Säule 3 b) Ausschnitt aus Säule 3 nach Lösungsdurchgang .....	72
Abb. 39:	Schema Zone II.....	73
Abb. 40:	Ausschnitte der RAMAN-Spektren zur Umsetzung von HH mit K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> und Kieserit in R- und Q-Lösung bei 28°C .....	73
Abb. 41:	Schema Zone III.....	74
Abb. 42:	Detailaufnahme Horizontalschlitz Grenzbereich unbeschichteter - beschichteter Stoß .....	78
Abb. 43:	Feuchtegehalte Schlitzproben, in situ-Proben aus GE-Profil 2 und Feuchtigkeitsprofile der Bohrungen IfG US 3 und 4.....	79
Abb. 44:	Widerstandsverteilung (scheinbarer spez. Widerstand in Ωm) der Nullmessung (oben) und Widerstandsverteilung nach dem Injektionsversuch (unten) .....	81
Abb. 45:	Aufbau des Oberflächenpackers – Schnittdarstellung (links) und Draufsicht (rechts) [27] .....	84
Abb. 46:	Schematischer Aufbau der Bohrlochversuche für Bitumenuntersuchungen [28] ..	87
Abb. 47:	Verpresstes Bitumenvolumen (Destillationsbitumen B 900) in Abhängigkeit von der Zeit (Druck im Versuch 1: max. 20 bar, im Versuch 2: 10 bar) .....	87
Abb. 48:	Darstellung der mit Bitumen B900 injizierten Bereiche (13 cm hinter der Kontur, Draufsicht) .....	88
Abb. 49:	Prinzipieller Aufbau der Bohrlochversuche mit Bentonit .....	89
Abb. 50:	Lage des Bohrloches im Bereich des nach dem Bentonitversuch 2 gemessenen Geoelektrikprofiles [33] .....	90
Abb. 51:	Prinzipieller Aufbau der Bohrlochversuche mit MgO-Beton .....	91
Abb. 52:	Druckverlauf in der Druckkammer des Bohrloches 3 IfG (verschlossen mit MgO-Beton).....	93
Abb. 53:	Austrittsstelle des Injektionsbitumens mit ausgepresster Salzlösung .....	95
Abb. 54:	Mit Injektionsbitumen gefüllter Riss im Salzgestein [28] .....	95
Abb. 55:	System NaCl-KCl-MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O bei 25 °C .....	97
Abb. 56:	Standversuch in R-Lösung .....	98
Abb. 57:	Standversuch in Tachyhydrit-Lösung .....	98
Abb. 58:	Masseänderung von Bohrkernen in R- und in Tachyhydrit-Lösung .....	99
Abb. 59:	Ausbreitmaß der untersuchten MgO-Beton – Rezepturen .....	103
Abb. 60:	Verbund zwischen MgO-Beton und Carnallititgestein .....	104

---

Abb. 61: Permeabilität von Magnesiabeton MB6 in Abhängigkeit von der Zeit.....	105
Abb. 62: Gelbaustoffe: einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 1048.....	109
Abb. 63: Bohrkern eingebettet in einen dauer-.....	110
Abb. 64: Bohrkern eingebettet in dauerplastischen Baustoff mit Tachyhydrit-gesättigter Lösung .....	110
Abb. 65: Prinzipieller Aufbau eines langzeitstabilen Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgebirge.....	118

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der beiden Konzepte „weiches“ und „steifes“ Dichtelement .....	23
Tabelle 2: Favorisierte Prinzipien und Materialien für horizontale langzeitbeständige Verschlüsse im leicht löslichen Salzgebirge.....	26
Tabelle 3: Stratigraphische Grobgliederung des Kaliflözes in Teutschenthal .....	28
Tabelle 4: Festigkeits- (a) und Dilatanzparameter (b) von Carnallitit C60 – Experimentalort 3a-Sohle Teutschenthal (trocken) .....	56
Tabelle 5: Reaktionsverhalten von $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{ H}_2\text{O}$ in Lösungen: ges. NaCl-Lösung → Q-Lösung .....	68
Tabelle 6: Säulenversuche.....	71
Tabelle 7: Lösungszusammensetzungen vor und nach dem Umsatz von Q- und R-Lösung mit $\text{CaCl}_2 \cdot „2,75“ \text{ H}_2\text{O}$ .....	74
Tabelle 8: Ergebnisse der Injektionsversuche mit hochfeinen MgO-Suspensionen im Spaltmodell.....	83
Tabelle 9: Durchgeführte Bohrlochversuche mit Propfen aus MgO-Beton .....	92
Tabelle 10: Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen des mit Injektionsbitumen nachbehandelten Bohrloches 11 (nach VOIGT [34]).....	96
Tabelle 11: Materialkennwerte der Gelbaustoffe.....	109

## Einleitung

Alle bisherigen Entwicklungsarbeiten von Streckendämmen im Salinar beziehen sich auf Standorte im Steinsalz. In Kaligruben können notwendige Streckenverschlüsse nicht immer direkt im Steinsalz errichtet werden. Ein Anwendungsfall ist die Grube Teutschenthal, wo zukünftig durch langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke die noch bestehenden Verbindungen zu benachbarten Grubenfeldern dauerhaft unterbrochen werden sollen, wenn für diese benachbarten Grubenfelder kein Langzeitsicherheitsnachweis erbracht werden kann.

Durch die besonders komplizierten geologisch-mineralogischen Verhältnisse der Grube Teutschenthal mit tachyhydritreichen Carnallit und Kieserit als Hauptbestandteile des Salzgesteins erhält diese FuE-Aufgabe einen außerordentlich hohen Schwierigkeitsgrad. Andererseits sind die für die komplizierten Bedingungen der Grube Teutschenthal zu entwickelnden technischen Lösungen auf alle anderen Standorte mit carnallititischen Salzgestein übertragbar.

Mit dem Vorhaben soll ein Grundkonzept und die dazu gehörigen Bemessungsgrundlagen für die Errichtung von Streckendämmen in leichtlöslichen Salzgesteinen, insbesondere im Carnallitit, entwickelt werden. Dieses Grundkonzept dient als Basis für die nachfolgende Errichtung und Untersuchung von Versuchsverschlusskomponenten, die Bestandteile der zukünftigen Verschlussbauwerke im Carnallitit sind.

Hauptschwerpunkte der Arbeiten sind die Untersuchung der Auflockerungszone, Möglichkeiten ihrer Vergütung, die Auswahl und Erprobung der zukünftig vorgesehenen Bau- und Dichtmaterialien sowie der im Grundkonzept enthaltene konstruktive Aufbau zukünftiger langzeitstabiler Verschlussbauwerke im leichtlöslichen Salzgestein. Die Ergebnisse der Arbeiten sind in den nachfolgenden Teilberichten zu den einzelnen Arbeitspaketen dargelegt:

- AP 1 Sitz, P.; Fliss, Th.; Gruner, M.: Geomechanisch-lösungskinetische Voraussetzungen und technisch - konstruktive Maßnahmen zur Verhinderung von Löseerscheinungen im Verschlussbereich. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Januar 2004.
- AP 2 Seifert, G.; Fliss, Th.; Döhner, Chr.: Analyse der Wirkungsbedingungen und Ableitung der Anforderungen. KUTEC Sondershausen, September 2004.
- AP 3 Salzer, K.; Popp, T.; Weise, D.: Charakterisierung und Modellierung der ALZ als Werkzeug zur Bemessung des Verschlusses. IfG Leipzig, September 2004.
- AP 4 Voigt, W.; Freyer, D.; Moßig, R.: Kristallisation von carnallititstabilen Mineralphasen - Voraussetzungen für eine lösungsinduzierte Kristallisation zur Abdichtung der ALZ. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie, Dezember 2004.
- AP 5 Sitz, P.; Gruner, M.; Kawka, A.; Wasowicz, B.: Wirkprinzipien und Möglichkeiten für eine langzeitliche Ertüchtigung der ALZ. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Oktober 2004.
- AP 6 Sitz, P.; Gruner, M.; Wasowicz, B.; Kawka, A.: Mögliche Baumaterialien (zum Lastabtrag, statisches Widerlager). TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Juni 2004.
- AP 7 Sitz, P.; Gruner, M.; Kawka, A.: Entwicklung des Grundkonzeptes. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. September 2004.

Der vorliegende Abschlussbericht soll die Ergebnisse des Vorhabens in zusammengefasster Form darstellen.

## Zusammenfassung

Für die durchgeführten *in situ* Untersuchungen wurde ein Referenzstandort gewählt, der stratigraphisch den zukünftig vorgesehenen Dammbaustandorten entspricht. Auf der Basis der *in situ* und im Labor durchgeführten Untersuchungen und erster Modellrechnungen wurde ein Grundkonzept für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im leichtlöslichen Salzgestein erarbeitet. Dieses Grundkonzept ist die Basis für den Entwurf zukünftiger Verschlussbauwerke im Carnallitit.

### Wissensstand zu Beginn des Vorhabens

Aus der Analyse nationaler und internationaler Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge (siehe Abschnitt 1.1) folgt, dass aufgrund der fehlenden praktischen Referenzbeispiele nicht auf vorliegende Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge zurückgegriffen werden kann. Der einzige im Kalibergbau realisierte Streckenverschluss ist der 1984 in Canada gebaute Damm "Rocanville". Allerdings liegen zu ihm keine Detailinformationen vor. Andere Konzepte für Streckendämme im leichtlöslichen Gebirge sind bisher nicht realisiert worden.

### Prinzipielle Möglichkeiten der Verhinderung von Auflöseerscheinungen

Auflösungerscheinungen können prinzipiell verhindert werden, wenn die in die Auflockerungszone (ALZ) eindringende Lösung gegenüber den im anstehenden Gebirge vorliegenden Salzmineralen gesättigt ist. In der Grube Teutschenthal liegen Halit, Carnallit, Kieserit, Tachyhydrit und Anhydrit als Hauptminerale vor. Problematisch ist, dass keine Salzlösungszusammensetzung denkbar ist, in der Tachyhydrit und Kieserit gleichzeitig im Lösungsgleichgewicht vorliegen und damit langzeitbeständig sind. Bei Lösungszutritt kann immer nur das Auflösen eines der beiden Minerale verhindert werden. Bei den in Teutschenthal vorliegenden Tachyhydritgehalten ist es sinnvoll, eine Lösung einzustellen, die gegenüber Tachyhydrit gesättigt ist (siehe Abschnitt 1.2).

### Prinzipielle Schlussfolgerungen für ein mögliches Grundkonzept

In Vor betrachtungen wurde das Verschlussprinzip einer "Dichtungskomponente mit großer Steifigkeit" favorisiert. Auf Grund fehlender technischer bzw. *in situ* Erfahrungen sowie der unzureichenden Kenntnisse über die zu erwartenden geochemischen und geohydraulischen Verhältnisse, bei der Planung und Konzeptentwicklung von Verschlüssen im leichtlöslichen Salzgebirge ist eine diversitäre Vorgehensweise erforderlich. Dies kann durch Hintereinanderschaltung von Verschlusskomponenten mit gleicher Funktion und unterschiedlichen Wirkungsweisen erreicht werden (siehe Abschnitt 1.3).

Für Verschlüsse im leichtlöslichen Salzgebirge wurden folgende Verschlusselemente vorgeschlagen (siehe Abschnitt 1.4):

- Vorschüttung zur Absicherung einer gesättigten Lösung
- Dichtelement (Querschnittsabdichtung mit hoher Steifigkeit)
- Widerlager
- Vergütung der ALZ
- Dichtungsschlitz

Folgende Elemente wurden als prinzipiell technisch realisierbar eingeschätzt:

- Vorschüttungen aus speziellen Salzgemischen,
- Dichtelemente aus Bentonitformsteinen,

- Dichtelemente aus Bitumen/Asphalt,
- Widerlager und Dichtelemente aus MgO-Beton (alternativ aus lastabtragenden Gelsystemen),
- Hochfeines MgO für Verpressarbeiten.

*Mineralogische, geologische, geomechanische und geohydraulische Besonderheiten des anstehenden Salzgesteins*

Mit dem erarbeiteten Kenntnisstand ist es prinzipiell möglich, eine Standortauswahl und Standortcharakterisierung für ein Dichtungssystem im leichtlöslichen Salzgestein insbesondere bei hohen Tachyhydrit- und Kieseritgehalten hinsichtlich folgender Punkte durchzuführen (siehe Abschnitt 2):

- Detektion von potenziellen Schwächezonen,
- Bestimmung der Reichweite der stoßnahen durchfeuchten Zone,
- spezielle Abstimmung von Baustoffsystemen für Dichtungselemente und Schutzelemente zur Vermeidung von Löseerscheinungen im Wirtsgestein.

Aus den Untersuchungsergebnissen lassen sich folgende Besonderheiten ableiten:

- Als potenzielle Schwachstellen gelten die bereits unter dem Einfluss der Wetterfeuchte stark auswitternden Bereiche der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen.
- Die Ausbildung der aufgelockerten und durchfeuchten Zone in den Stoßbereichen ist in starkem Maße von der Verteilung der sensiblen Mineralkomponenten abhängig. Die Stoßbereiche sind mutmaßlich über die Erkundungstiefe von maximal 3 m hinausreichend durch die Streckenauffahrung beeinflusst. Sie weisen im Bereich der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen eine deutlich durchfeuchte Zone bis etwa 0,6 m Tiefe auf.
- Weitere Schwächezonen werden in den in Muldenlagen bzw. Faltungszonen beobachteten tiefer reichenden durchfeuchten Zonen gesehen, die auf Anreicherungen sensibler Minerale bzw. Gefügeauflockerungen zurückgeführt werden. Diese Bereiche werden durch die Strecken nicht in jedem Fall aufgeschlossen. Sie können je nach Orientierung und Ausdehnung die Wirksamkeit von Querschnittsabdichtungen wesentlich beeinflussen. Weiterhin sind in diesen Bereichen stärkere Wechselwirkungen und Beeinflussungen zwischen Baustoff und Wirtsgestein zu erwarten. Aus diesem Grunde ist eine detaillierte Stoßaufnahme im Bereich von Dichtungselementen in Verbindung mit geoelektrischen Erkundungsmaßnahmen erforderlich, um diese Strukturen bei der Standortauswahl ausschließen zu können. Gegebenenfalls wird eine Standortkorrektur des Elementes notwendig.
- Hinsichtlich der an den mit lichtlöslichen Mineralkomponenten angereicherten Gebirgsbereichen auftretenden Verwitterungsmechanismen lassen sich grundsätzlich folgende Varianten unterscheiden:

- Fall 1: Bildung kavernöser Strukturen durch Ausfluss der Substanz in Form von Lösungen in vorwiegend tachyhydritreichen Zonen
- Fall 2: Zersetzung des Materials unter Bildung eines Rekristallisates in Tachyhydritreichen Zonen in Anwesenheit von Kieserit

- Die durchgeführten Fracmessungen zur Ermittlung der Minimalspannungsverteilung in Firste und Nordstoß belegen eine nahezu rotationssymmetrische Spannungsverteilung im Umfeld der Maschinenstrecke mit einer nur geringen Überzugswirkung aus dem benachbarten Kammer-Pfeiler-System. Die Spannungsmessungen in unmittelbarer Nähe der Kontur ( $< 0,40$  m) deuten auf eine entspannte Zone hin, die qualitativ mit der Länge der kompakt erbohrten Bohrkerne übereinstimmt. Darüber hinaus steigt die Minimalspannung deutlich an, bis bei ca. 3 m nahezu der Grundspannungszustand erreicht ist.
- Im nicht verwitterten Bereich besitzt das Carnallititgebirge eine maximale Gaspermeabilität von  $3,5 \cdot 10^{-16}$  m<sup>2</sup>. Im verwitterten, stoßnahen Bereich wurden hohe Gaspermeabilitäten bis max.  $2,4 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup> nachgewiesen. Das Permeabilitätsverhalten wird dabei stark durch die lithologische Zusammensetzung und die stratigraphische Schichtung bestimmt. Aus den durchgeführten Gaspermeabilitätsuntersuchungen kann keine Einschätzung zum Permeabilitätsverhalten des Carnallititgebirges gegenüber angreifenden Salzlaugen abgeleitet werden.

Im Hinblick auf Anforderungen an Dammbauwerke und Dichtungskomponenten sowie Versuchsplanungen konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

- Für den Einbau von Dichtungskomponenten ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand der Einsatz eines Stoßbeschichtungsmediums unabdingbar. Die Untersuchungen zur Stoßsensibilität ergaben für das verwendete Beschichtungsmedium eine Standzeit von mindestens 57 Tagen. Ein Feuchtegehalt von 0,5 Ma.-% im beschichteten Stoß wurde während dieser Zeit nicht überschritten.
- Generell dürfen alle einzusetzenden Baustoffe bestimmte Wärmeabgabemengen nicht überschreiten, um die Freisetzung von Kristallwasser im Kontaktbereich zwischen Dammelement und Gebirgsverband zu vermeiden. Als Grenzwert sollte nach gegenwärtigem Kenntnisstand eine Temperatur von 80 °C nicht überschritten werden.
- Für die Detektion sensibler Bereiche mit erhöhtem Feuchtegehalt sowie der infolge Flüssigkeitszutritt auftretenden Flüssigkeitsausbreitung im umliegenden Gebirge wurde eine 3D-Geoelektrik-Messanordnung zur Erkundung und Überwachung von Versuchsanordnungen erfolgreich getestet.

#### Charakterisierung und Modellierung der Auflockerungszone

Die Ausbildung der ALZ hängt primär von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des aufgeschlossenen Salzgesteins und dem Spannungszustand im Bereich der Maschinenstrecke ab. Die ALZ wird entlang des Streckenaufschlusses schichtspezifisch durch eine schichtparallel tiefgründige Verwitterung der leichtlöslichen Salzkomponenten überprägt. Unter Auflösung hygrokopischer Salzminerale wie Tachyhydrit und Kieserit kommt es zur Ausbildung entsprechender Wegsamkeiten.

Die Reichweite und Größenordnung der durch Verwitterungsprozesse überprägten ALZ ergibt sich in Abhängigkeit der Dauer und Intensität der Einwirkung über den Volumenanteil und Verwachsungsgrad dieser Minerale. Sie ist schichtspezifisch für die vertikal heterogene Gesteinsabfolge unterschiedlich.

Die am Experimentalort beobachtete lithologische Heterogenität macht deutlich, dass für ein zu erstellendes Verschlussbauwerk eine entsprechende spezifische Standortcharakterisierung erforderlich ist. Die generellen Wirkprinzipien, die zur Ausbildung der ALZ im leichtlöslichen Gesteinen führen, konnten über den dokumentierten interdisziplinären Ansatz erkannt werden (siehe Abschnitt 3).

Insgesamt stehen für die Simulation der gesteinsmechanischen und geohydraulischen Prozesse geeignete Werkzeuge zur Verfügung, die aber material- und standortspezifisch

anzupassen sind. Auf dieser Grundlage ist eine gebirgsmechanische Bemessung des untertägigen Dichtsystems sowie eine Berücksichtigung der hydraulisch-mechanischen Wechselwirkung in und um den Streckendamm möglich. Darüber hinaus gestattet diese Herangehensweise auch eine Nachweisführung zur langzeitlichen Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit des Dichtsystems.

#### Maßnahmen zur Einstellung einer zielgerichteten Lösungszusammensetzung

Theoretische und praktische Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, bei Zutritt ungesättigter Lösungen zu einem beliebigen Zeitpunkt durch geeignet gewählte, trockene Aufschüttungen von Mineral- und Bindemittelkombinationen die Lösungszusammensetzungen so zu transformieren, dass Schäden durch Umfließen von Dammbauwerken in der ALZ verhindert werden können (siehe Abschnitt 4).

Zu der im 3-Zonenkonzept vorgesehenen Reihenfolge der Sättigungszustände Q-Lösung / R-Lösung /  $MgCl_2\text{-}CaCl_2$ -Lösung gibt es unter den Bedingungen der Grube Teutschenthal keine Alternative. Ein Überspringen des Lösungszustandes R um sofort von Q zu einer  $MgCl_2\text{-}CaCl_2$ -Lösung zu gelangen ist nicht ratsam.

Für die Dimensionierung und Wahl der Zusammensetzung der Schüttbereiche sind folgende Ergebnisse und Erkenntnisse von besonderer Bedeutung:

1. Beim Durchlaufen einer NaCl-Lösung durch ein Carnallithaufwerk wird die Zusammensetzung Q im Verlauf von 1 – 3 Tagen sicher erreicht, wenn Maßnahmen zur Vergleichmäßigung und Verlangsamung des Lösungsflusses getroffen werden. Für stabile Fließbedingungen sind auf Grund des Volumenschwundes geeignete Maßnahmen zur mechanischen Stabilisierung des Haufwerkes vorzusehen.
2. Für ein schnelles Aufkonzentrierung einer Q-Lösung zu einer R-Lösung ist ein erhöhtes Angebot an Kieseritlösefläche erforderlich.
3. Calciumsulfat-Halbhydrat (HH) in Form von handelsüblichem Stuckgips geht mit den Salzlösungen und befeuchteten Salzgemischen Reaktionen ein, die zur Verfestigung und Verdichtung durch Volumenzuwachs führen. Die Geschwindigkeit der Umsetzung und die Art der Reaktionsprodukte (Gips, Polyhalit) hängen von der Zusammensetzung der Salzlösung ab. Die Reaktionen sind nur von geringer Wärmeentwicklung begleitet.
4. Eine R-Lösung kann mit Calciumchlorid niedrigen Wassergehaltes (2.5 – 3.0 mol/ $CaCl_2$ ) thermoneutral in eine Lösung überführt werden, die weder Tachyhydrit noch Carnallit angreift bzw. aus der Tachyhydrit auskristallisiert.

Je nach angestrebter Wirkung kann das Halbhydrat als eigenständiger Schüttbereich vor der Zone I, zwischen Zone I und II sowie innerhalb der Zone II eingebaut werden. Besonders wichtig erscheint der Einsatz von Halbhydrat zur mechanischen Stabilisierung in Zone I. Wie aus den Säulenversuchen abgeleitet wurde, sollte dies durch Zumischen zum Carnallit mit Gehalten von etwa 50 % Halbhydrat möglich sein.

#### Wirkprinzipien und Möglichkeiten für eine langzeitliche Ertüchtigung der ALZ

Zur Ausbildung der ALZ und ihrer prinzipiellen Abdichtbarkeit wurde die Sensibilität des Gebirgsstoßes und der Einsatz von Schutzmedien untersucht. Neben der direkten Feuchtebestimmung von *in situ* entnommenen Proben wurden geophysikalische Methoden (Georadar, Geoelektrik) den vorliegenden Bedingungen angepasst (siehe Abschnitt 5.1).

Für die Vergütung der ALZ durch Penetration / Injektion wurden Suspensionen aus hochfeinen MgO und R-Lösung sowie ein neu entwickeltes Zweikomponenten-Bitumen in

situ getestet. Bei der Injektion mit MgO-Systemen konnten selektive Löseerscheinungen im Gebirge nicht ausgeschlossen werden, so dass die ALZ nicht vollständig vergütet werden konnte. Das Zweikomponenten-Bitumen ist kalt verarbeitbar und kann Rissweiten von 30 µm ausfüllen. Vorteilhaft ist sein gegenüber den Salzlösungen und dem Gebirge inertes Verhalten. Die Qualität der Vergütung der ALZ mit dem Injektionsbitumen wurde durch Permeabilitätsmessungen und mikroskopische Untersuchungen nachgewiesen (siehe Abschnitte 5.2 und 5.3.4).

In Bohrlochversuchen wurde gezeigt, dass eine Vergütung der besonders durchlässigen ALZ im konturnahen Bereich mit Destillationsbitumen ebenfalls möglich ist (siehe Abschnitt 5.3.1).

Bohrlochversuche mit Bentoniddichtelementen führten nicht zu dem erwünschten Ergebnis. Deshalb wird der Einsatz von Bentonit als Dichtmaterial im leichtlöslichen Salzgestein nicht weiter verfolgt. Die Versuchsergebnisse wurden dahingehend interpretiert, dass im Beisein des hygrokopischen tachyhydrithaltigen Carnallits die Wasseraufnahme und damit das Quellverhaltens des Bentonits stark eingeschränkt ist (siehe Abschnitt 5.3.2).

Mit Bohrlochverschlüssen aus MgO-Beton wurden 13 Versuche durchgeführt (siehe Abschnitt 5.3.3). Die wichtigsten Ergebnisse sind folgende:

- Bohrlochverschlüsse aus MgO-Beton MB6 waren hinsichtlich Lastabtrag auch bei den maximal erreichbaren Flüssigkeitsdrücken von 100 bar stabil. Die Belastung bis zum Fracdruck des Gebirges (70 bis 80 bar) wurde problemlos aufgenommen. Ein Versagen (Frac) fand nur im umliegenden Gebirge statt. Nach dem Frac traten Permeabilitätserhöhungen von über zwei Zehnerpotenzen auf.
- Durch eine zwischengeschaltete Bitumendichtschicht sind Elemente aus MgO-Beton praktisch flüssigkeitsdicht. Fließwege im Kontakt zwischen Gebirge und MgO-Beton und direkt im MgO-Beton kommen an dieser Bitumendichtschicht zum Stillstand.
- Voraussetzung für eine ausreichende Dichtheit des Systems ( $< 10^{-17} \text{ m}^2$ ) ist eine Beraubung der aufgelockerten und verwitterten Bereiche des konturnahen Gebirges. Ansonsten kommt es zur hydraulischen Kurzschlussströmungen über die ALZ. Die Funktionstüchtigkeit der MgO-Betonpfropfen hinsichtlich Dichtheit war ab einer Tiefe des Streckenstoßes von 50 – 60 cm erreicht.
- Bevorzugte Fließwege liegen an den Grenzflächen zwischen Tachyhydrit und Kieserit bzw. Tachyhydrit und Carnallit sowie an den als Tonige Schichten bezeichneten, Tachyhydrit enthaltenden Lagen. Die Permeabilität des Gebirges außerhalb der ALZ erreicht Werte zwischen  $10^{-17}$  und  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

Durch Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen polymineralischen Salzproben und ausgewählten Salzlösungen (siehe Abschnitt 5.4) wurde gezeigt, dass die untersuchten Tachyhydrit-gesättigten (-übersättigten) Lösungen als Schwerlösung mit Tachyhydrit-Depot zum Schutz der ALZ angewendet werden können. Das Tachyhydrit-Depot entsteht durch einen langsamen Abbau der Übersättigung der Lösung nach dem Abkühlen des Bauwerkes. Dieser Effekt könnte durch einen druckbeaufschlagten Einbau der Systeme im Bereich von 0,5-1,0 MPa und der damit möglichen Lösungsauspressung und -infiltration in die ALZ genutzt werden, um Wegsamkeiten in der ALZ durch die Schwerelösung und durch die Rekristallisation von Tachyhydrit aktiv zu bekämpfen.

### Mögliche Baumaterialien

Als Widerlagermaterial wurde der klassische MgO-Beton an die vorliegenden Bedingungen angepasst (siehe Abschnitt 6.1). Als Vorzugsvariante wurde die Rezeptur MB6 vorgeschlagen, die aus 11,8 % MgO; 15,4 % R-Lösung als Anmachflüssigkeit; 43,7 % Sand 0-2 mm; 21,8 % Kies 2-8 mm und 7,3 % Kies 8-16 mm besteht. Das Material hat folgende Eigenschaften:

Ausbreitmaß	407 mm
Rohdichte nach 1 Tag	2,26 t/m³
Erstarrungsbeginn (DIN EN 196, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	8 h
Erstarrungsende (DIN EN 196, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	10 h
Längenänderung nach 3 Monaten (Lagerung bei 25°C, 40 % rel. Luftf.)	+ 6,8 mm/m (Quellen)
Einaxiale Druckfestigkeit (28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	65 ± 17 MPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	71 ± 7 MPa
Statischer E-Modul (Zylinder, 28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	39 ± 2 GPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	47 ± 8 GPa
Spaltzugfestigkeit (Zylinder, 28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	5,7 ± 1,4 MPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	7,4 ± 0,7 MPa
Adiabatische Hydratationswärme (Maximum der Wärmefreisetzung nach 5 bis 40 h)	68,4 J/g
Linearer Ausdehnungskoeffizient bei Temperaturerhöhung bis 80 °C	10·10⁻⁶ K⁻¹
Permeabilität (Messung mit CaCl₂–MgCl₂–Lösung)	3·10⁻¹⁹ m²

Weiterhin wurden dauerplastische und ortsstabile Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern untersucht. Dazu wurden die von K-UTEC entwickelten Gelbaustoffe an die höheren Anforderungen angepasst (siehe Abschnitt 6.2). Dabei wurde eine Tachyhydrit-Sättigung zur Verhinderung von schädigenden Auflösungseffekten in der Kontaktzone zum Wirtsgestein sowie zur Unterbindung von Umläufigkeiten des Absperrbauwerkes über die Tachyhydrit-Bänder gewährleistet. Dauerplastische Baustoffe können zum längerfristig aktiven Schutz der ALZ eingesetzt werden. Der ortsstabile Baustoff ermöglicht die Vorhaltung eines Tachyhydrit-Lösungsstapels mit eingebautem Tachyhydrit-Depot zur vollständigen Tachyhydrit-Sättigung der anströmenden Lösung aus der Vorschüttung und zur Beschickung und Abschirmung der ALZ.

Anhydritbaustoffe wurden verworfen, da bei einer MgCl₂-gesättigten Lösungen als Anmachflüssigkeit die Hydratisierung von Anhydrit als Zuschlagstoff nicht mehr möglich und die von Halbhydrat deutlich verzögert ist (siehe Abschnitt 6.3).

### Entwicklung des Grundkonzeptes

Auf der Basis der durchgeführten konzeptionellen und experimentellen Arbeiten wurden nachfolgende Schlussfolgerungen für ein langzeitstables horizontale Verschlussystem im Carnallit gezogen (siehe Abschnitt 7):

- Der Verschluss sollte möglichst lang sein und möglichst überwiegend steife Elemente beinhalten. Abrupte Wechsel zwischen steifen und nachgiebigen Elementen sind durch zwischengeschaltete Übergangsschichten auszugleichen. Als Hauptelement für Lastabtrag und Querschnittsdichtung wird als Material MgO-Beton vorgeschlagen.
- Für die Unterbrechung der Strömungswege im ausbruchsnahen Gebirge und im Kontaktbereich werden umlaufende Dichtungsschlitzte und zielgerichtete Kontaktspaltinjektionen vorgeschlagen.
- Aus Gründen der Diversität für Querschnitts- und Kontaktfugendichtung wird zusätzlich der Einsatz von Bitumen-/Asphaltpackungen vorgeschlagen.

4. Vom Einsatz schwelender/quellender Materialien und von einer Impermeabilisierung des Gebirges durch den radialen Laugendruck bei flüssigkeitsdichter Gebirgsbeschichtung (Versiegelung) wird im Carnallitit Abstand genommen.
5. Für die Gewährleistung einer ausreichenden Tachyhydritsättigung der zum Verschlussbauwerk anströmenden Lösung werden als Vorbauelement eine definierte Dreizonen-Salzvorschüttung und ein ortsstables Tachhydritdepot aus Gelbaumaterial vorgeschlagen.

Der Vorschlag der prinzipiellen konstruktiven Gestaltung langzeitstabiler Streckenverschlussbauwerke im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) umfasst folgende Elemente:

#### **Druckseite**

<b>Vorbauelement</b>	Salzvorschüttung	Zone I (Carnallitit + Halbhydrat)
		Zone II (kieseritreicher Carnallitit + Halbhydrat)
		Zone III (wasserarmes $\text{CaCl}_2$ )
	Ortsstables Tachhydritdepot	Schotter + Gelbaumaterial
<b>Hauptelement 1</b>	Hydraulische Dichtung (optionales Element)	MgO-Beton ( <i>Hilfswiderlager</i> )
		Asphalt, Bitumen
	MgO-Betonkörper (Widerlager + Dichtelement)	MgO-Beton mit Zwischenschichten aus Bitumen
		Kontaktspaltinjektion mit Zweikomponenten-Bitumen
	Zusatzdichtung	Spezialgussasphalt
<b>Hauptelement 2</b>	MgO-Betonkörper (Widerlager + Dichtelement)	MgO-Beton mit Zwischenschichten aus Bitumen
	Dichtungsschlitzte	Zweikomponenten-Bitumen
	Widerlager	MgO-Beton
<b>Nachbauelement</b>	Stützelement	Schotter

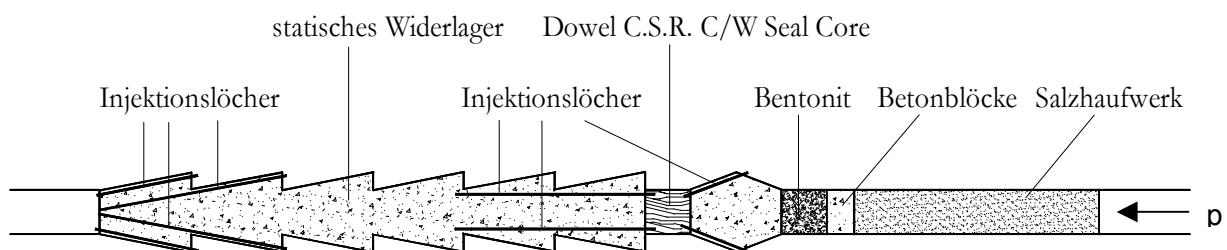
#### **Luftseite**

## 1 Geochemisch-lösekinetische Voraussetzungen und technisch/konstruktive Maßnahmen zur Verhinderungen von Löseerscheinungen im Verschlussbereich\*

### 1.1 Analyse nationaler und internationaler Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge

Streckenverschlussbauwerke im Steinsalz aus langzeitstabilen Baumaterialien, die erst nach Auflaufen der Konvergenz (nach ca. 500 Jahren) langzeitfunktionstüchtig sein müssen, wurden bereits realisiert (Streckenverschluss Immenrode [1]). Der *in situ* Versuch in Sondershausen hat die prinzipielle Machbarkeit langzeitstabiler Streckenverschlüsse im Steinsalz nachgewiesen, jedoch auch die aus der Umströmung des Bauwerkes über die konturnahe Auflockerungszone des Gebirges resultierenden Detailprobleme (Wegsamkeiten an Inhomogenitäten parallel zur Verschlussachse) hingewiesen [2].

Für leichtlösliche Salzgesteine wurde dagegen bis heute noch keine wirksame Dichtungssystem entwickelt, das nachgewiesenermaßen langzeitstabil ist. Allerdings existieren einige Konzepte für den Bau derartiger Dichtsysteme. Der nachfolgend beschriebene Streckenverschluss "Rocanville" ist realisiert worden und gegenüber einem Flüssigkeitsdruck von 98 bar dicht [3].



**Abb. 1:** Dammkonstruktion "Rocanville"

In der Kaligrube „Rocanville Potash Mine“ in Kanada wurde 1984 ein Salzlösungsvorkommen angefahren. Dabei traten aus den Hangendschichten des Kalilagers ungesättigte Salzlösungen zu. Um die Zuflüsse abzudichten wurde ein Damm von 28 m Länge und einem Querschnitt von etwa  $19 \text{ m}^2$  errichtet (siehe Abb. 1). Die Streckenkontur wurde bis auf abdichtbares Gebirge nachgeschnitten. Das statische Widerlager bestand aus Magnesiabinder mit silikatischen Zuschlägen. Durch den Zusatz von Verflüssigern konnte auf eine Nachverdichtung mit Rüttlern verzichtet werden.

Als Dichtelemente kamen Bentonit und Dowell Seal zum Einsatz. Für das verwendete chemische Dichtungsmittel „Dowell Chemical Seal Ring“ ist die Langzeitstabilität nicht nachweisbar bzw. wahrscheinlich nicht gegeben. Zur Abdichtung des Dammes wurden über den gesamten Querschnitt Injektionen durchgeführt, wobei eine Verpressung des Injektionsmaterials nur im Bereich der Firstlöcher möglich war. Der zur Injektion verwendete Expansionszement wies eine Volumenzunahme von etwa 15 % auf [3].

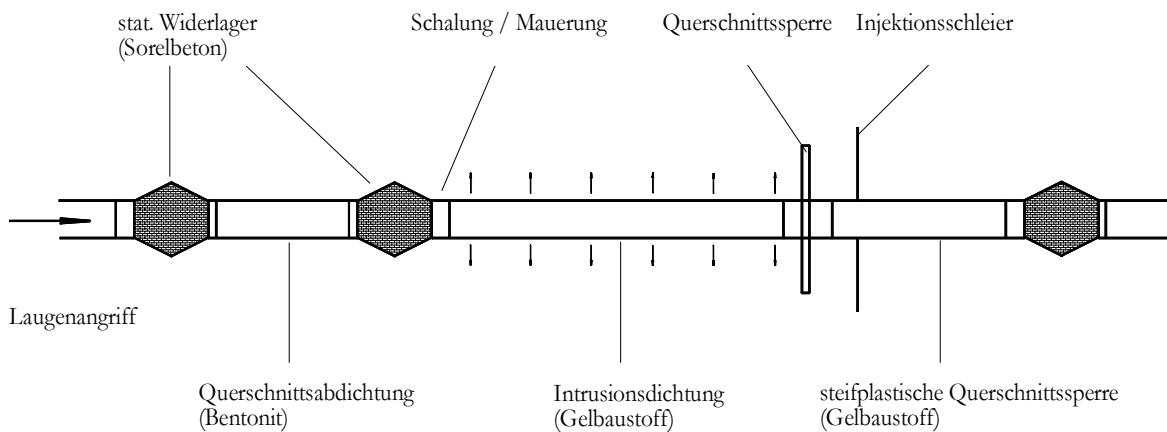
\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 1:

Sitz, P.; Fliss, Th.; Gruner, M.: Geomechanisch-lösungskinetische Voraussetzungen und technisch-konstruktive Maßnahmen zur Verhinderung von Löseerscheinungen im Verschlussbereich. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Januar 2004.

Die nachfolgenden Konzepte für Streckendämme im leichtlöslichen Gebirge existieren nur als Entwürfe und sind bisher nicht realisiert worden:

- Vorschlag für ein Dichtungssystem für zwei Carnallititstrecken in der Grube Teutschenthal nach SITZ & REIMANN [4] mit einem inerten Puffermedium. Voraussetzungen für die Wirksamkeit dieses Systems ist eine impermeable Gebirgsstoßbeschichtung sowie eine externe automatisierte Einrichtung zur Gewährleistung eines ständigen Überdruckes im Puffermedium (Überdruck gegenüber dem anstehenden Laugendruck maximal 0,2 MPa). Damit ist dieses System weder wartungsfrei noch langzeitstabil.
- In einem Dichtungskonzept nach SCHRIMPFF [5] wird unter Überdruck stehendes Bitumen durch eine Bitumenspiegelhöhe in einem Schlot über der Dichtungskammer gewährleistet. Die Standsicherheit der zusätzlich erforderlichen Grubenbaue sowie des direkten Bereiches um die Dichtungskammer muss über die geforderte Funktionsdauer der Dichtung sicher gewährleistet werden. Dieser Nachweis gestaltet sich schwierig für den Fall, wenn zwischen Dichtungseinbau und einsetzenden Laugenangriff ein erheblicher Zeitraum liegt. Die Streckenkonvergenz kann in dieser Zeit die Grubenbaue verschließen sowie die Gebirgsauflockerung im Dichtungsbereich wesentlich erhöhen und damit die Wirksamkeit des Systems erheblich beeinträchtigen.
- Konstruktionen von hydraulischen Dichtelementen nach SITZ [6] mit hintereinander oder übereinander angeordneten Dichtepackungen aus Bitumen / Asphalt unterschiedlicher Dichte. Die Dichte der Materialien in den Dichtepackungen wird so eingestellt, dass sie in einem Fall geringer als die Dichte der angreifenden Flüssigkeit ist (möglich bei Bitumen gegenüber mineralisierten Wässern bzw. Salzlösungen) und im anderen Fall größer als die Dichte der angreifenden Flüssigkeit ist (möglich bei Asphalt gegenüber Wässern bzw. Salzlösungen). Die Anordnung dieser Dichtepackungen erfordert konstruktive Sondermaßnahmen, deren dauerhafte Funktionstüchtigkeit jedoch nicht nachgewiesen wurde.

Für eine Carnallititstrecke in der Grube Teutschenthal existiert ein aktueller Vorschlag von SEIFERT & LANDSMANN [7], der von der Trennung von statisch wirksamen und dichtenden Elementen der Konstruktion ausgeht (siehe Abb. 2).



**Abb. 2:** Multibarriere für Tunnelstrecken im Carnallitit [7]

Die statischen Widerlager bestehen aus Mauerwerksverbänden als Schalung und Sorelbetonkörpern in doppelkonischer Form. Das Dichtelement besteht aus Bentonit mit einer Trockendichte von mindestens  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . Als zusätzliches Dichtelement wirkt eine so genannte steifplastische Querschnittssperre aus Gelbaumstoff. Der Gelbaumstoff ist ein mineralisches Gelsystem mit dauerplastischen Eigenschaften mit hoher Resistenz und

Stabilität. Zur Abdichtung der Auflockerungszone ist eine Intrusionsdichtung aus einem pastösen Baustoff vorgesehen. Infolge der Streckenkonvergenz soll das Gel aus dieser Dichtung in die aufgelockerte Zone eindringen und die neu entstehenden bzw. bereits vorhandenen Dilatanzräume ausfüllen. Das in die ALZ eindringende Medium wirkt in Form einer Schutzflüssigkeit gegenüber zutretenden lösungsfähigen Laugen. Es besteht die Möglichkeit, dieses Medium in seiner Zusammensetzung so zu beeinflussen, dass nach dem Eindringen in die ALZ schwer lösliche Salz ausfallen, die eine Abdichtung dieser aufgelockerten Bereiche bewirken. Die aufgelockerte Zone wird zusätzlich durch einen Injektionsschleier und einen Schrämschlitz mit Bitumenfüllung abgedichtet. Für die spezifischen Verhältnisse der Grube Teutschenthal wird eine Bauwerkslänge aller Komponenten von mindestens 400 m angegeben [7].

Daraus folgt, dass aufgrund der fehlenden praktischen Referenzbeispiele nicht auf vorliegende Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge zurückgegriffen werden kann.

## 1.2 Prinzipielle Möglichkeiten der Verhinderung von Auflöseerscheinungen

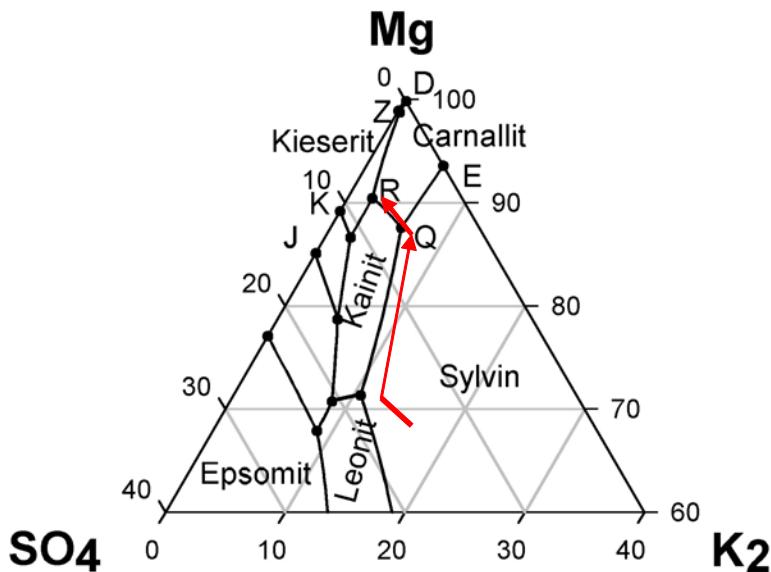
### 1.2.1 Chemische Grundlagen

Auflösungerscheinungen können prinzipiell verhindert werden, wenn die in die ALZ eindringende Lösung gesättigt in Bezug auf die Salzminerale ist, mit denen sie in der ALZ in Kontakt kommt. In der Grube Teutschenthal liegen Halit, Carnallit, Kieserit, Tachyhydrit und Anhydrit als Hauptminerale vor. Im Carnallit selbst wurde in Teutschenthal und Angersdorf zwar kein Sylvan nachgewiesen, aber da Sylvan ein Zersetzungspunkt des Carnallits darstellt, ist Sylvan immer in die Betrachtungen einzubeziehen.

Zur Einschätzung des Sättigungszustandes einer Lösung hinsichtlich der unterschiedlichen Minerale dient das Löslichkeitsdiagramm des Systems der ozeanischen Salze (siehe Abb. 3). In das Carnallitgestein eindringende Lösung wird sich aufsättigen, wobei der genaue Verlauf im Wesentlichen von den relativen Anteilen von Carnallit und Kieserit im Salzgestein abhängt. Nacheinander werden die Sättigung an Halit, Sylvan, Kainit ( $4\text{KCl} \cdot 4\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ) und Carnallit erreicht. Am Punkt Q liegt dann Sättigung der Lösung an allen vier Mineralen vor. Kainit ist ein Reaktionsprodukt, das sich im Verlauf der Auflösung von Kieserit und Carnallit bildet.

Allerdings liegt im Punkt Q noch keine Sättigung an Kieserit vor. Kieserit wird von Q-Lösung unter Erhöhung des  $\text{MgCl}_2$ -Gehaltes der Lösung und weiterer Ausscheidung von Kainit aufgelöst. Die Dichte der Lösung steigt dabei von 1,29 auf 1,32  $\text{gcm}^{-3}$  an. Die Lösereaktion ist beendet, wenn der Punkt R erreicht ist, an dem Sättigung an Halit, Carnallit, Kainit und Kieserit vorliegt.

Die Volumenbilanz der Lösungsentwicklung von Q nach R ergibt keine Abnahme des Feststoffvolumens, da das Volumen des auskristallisierenden Minerals Kainit die Auflösung des Kieserits kompensiert. Die Konsequenzen für die Fließwege sind in diesem Falle nicht eindeutig vorausbestimmtbar. Im günstigsten Falle kann der auskristallisierende Kainit die Fließwege verschließen. Dies hängt aber in hohem Maße von den lokalen Strömungsbedingungen und der Kristallisationskinetik des Kainits ab. Kainit zeigt eine ausgesprochene Tendenz, übersättigte Lösungen zu bilden, d.h. erst nach längerer Zeit (je nach Keimbildungsbedingungen bis zu Monaten) zu kristallisieren, so dass er mit der Lösungskonvektion an von der Kieseritauflösung weit entfernten Lokalitäten gebildet werden kann. Um Auflösungerscheinungen in kieserithaltigem Carnallit der ALZ sicher zu verhindern muss dafür gesorgt werden, dass durch Vorsättigung die Lösungszusammensetzung dem Punkt R entspricht.

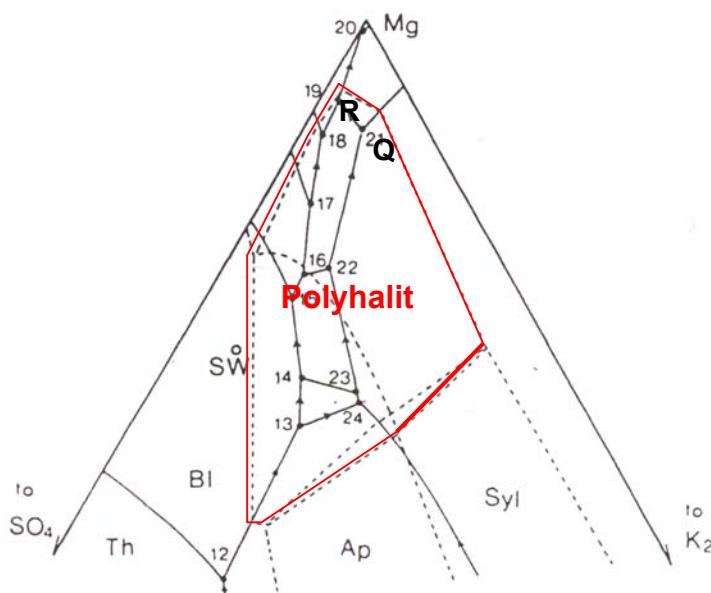


**Abb. 3:** Jänecke-Diagramm des quinären Systems der ozeanischen Salz (Sättigung an NaCl) im Bereich der Punkte Q und R.

Die vollständige Beschreibung der Löslichkeitsverhältnisse erfordert die Einbeziehung von Calciumsulfat, das in Form von Anhydrit ( $\text{CaSO}_4$ ) im Salzgestein allgegenwärtig ist. Das entsprechende Löslichkeitsdiagramm ist das des hexären Systems  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  -  $\text{H}_2\text{O}$ . Die Lösungskonzentrationen an den Ionen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  werden durch die Auflösung von  $\text{CaSO}_4$  kaum verändert. Je nach den Konzentrationen an diesen Ionen sind aber unterschiedliche  $\text{CaSO}_4$ -haltige Mineralphasen langzeitstabil.

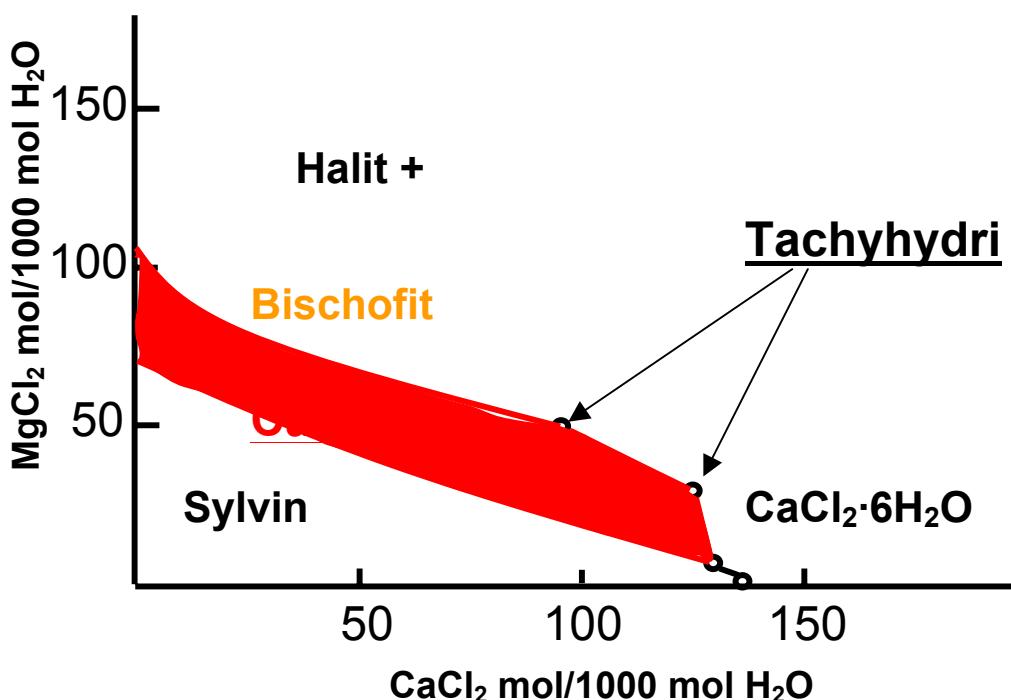
Die Darstellung in Abb. 4 macht deutlich, dass Punkt Q (bei  $\text{CaSO}_4$ -Sättigung IP21 genannt) und Punkt R (bei  $\text{CaSO}_4$ -Sättigung IP19 genannt) im Existenzgebiet von Polyhalit ( $\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) liegen. Das bedeutet, dass z.B. Anhydrit mit den entsprechenden Lösungen unter Aufnahme von  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  und Wasser unter Bildung von Polyhalit reagieren muss (Polyhalitisierung). Das geschieht unter Volumenzunahme an Feststoff, was zu einem Verschließen von Fließwegen beitragen könnte. Die Geschwindigkeit der Polyhalitbildung ist allerdings bei Temperaturen um 25°C sehr gering und schwer direkt zu quantifizieren, da diese außer von der Lösungszusammensetzung von einer Reihe weiterer Faktoren wie der Anwesenheit fein verteilter Feststoffe abhängt.

Während bei den leichtlöslichen Salzkomponenten darauf geachtet werden muss, dass durch technische Maßnahmen Sättigung gewährleistet wird, ist das in Hinsicht auf das schwerlösliche  $\text{CaSO}_4$  nicht notwendig, da aufgrund der geringen Löslichkeit eindringende Lösung mit dem im Salzgestein vorhandenen Anhydrit schnell die Sättigung erreicht.



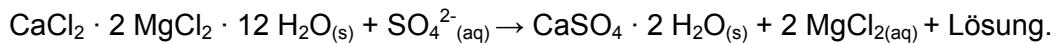
**Abb. 4:** Ausschnitt aus dem Jänecke-Diagramm für das hexäre System der ozeanischen Salze bei 25 °C (bei Sättigung an NaCl und CaSO<sub>4</sub>)

Die Grube Teutschenthal weist im Vergleich zu anderen Gruben die Besonderheit auf, dass hier größere Anteile an Tachyhydrit ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2 \text{MgCl}_2 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ) anzutreffen sind [8]. Um das Auflösen von Tachyhydrit zu verhindern, muss die Lösung einen bestimmten Gehalt an Calciumchlorid enthalten. Bei 25 °C sind die Gehalte aus dem Diagramm in Abb. 5 zu entnehmen.



**Abb. 5:** Stabilitätsgebiete für Carnallit und Tachyhydrit im System NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O bei 25 °C bei gleichzeitiger Sättigung an NaCl

Sobald eine Lösung jedoch Sulfat enthält wird Tachyhydrit unter Bildung einer  $\text{CaSO}_4$ -haltigen Phase (Gips, Halbhydrat, Polyhalit, Syngenit je nach Lösungszusammensetzung) zersetzt. Im Falle einer Gipsbildung wäre die Reaktion:

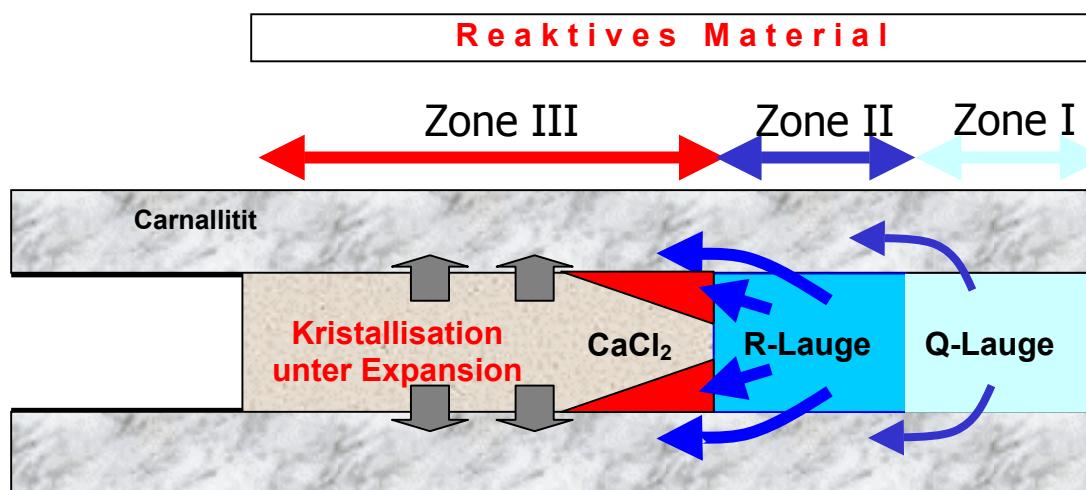


Das Volumen des gebildeten Gipes ist viel geringer als das des aufgelösten Tachyhydrites, so dass Erweiterungen von Fließwegen durch Reaktion mit Sulfat stattfinden. Es ist auch theoretisch **keine Salzlösungszusammensetzung** denkbar, **in der Tachyhydrit und Kieserit gleichzeitig im Lösungsgleichgewicht vorliegen und damit langzeitbeständig sind**. Es kann bei Lösungszutritt immer nur das Auflösen einer der beiden Minerale vollständig verhindert werden. Falls die Tachyhydritgehalte ein Risiko für die ALZ darstellen, sollte man sicher stellen, dass  $\text{CaCl}_2$ -haltige Lösungen in die ALZ eindringen, die Tachyhydrit nicht auflösen und Kieserit nur anlösen werden, da die Reaktion des Kieserits unter Volumenzunahme abläuft. Da die Lösung  $(\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_{(\text{s})} + \text{CaCl}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}_{(\text{s})} + \text{MgCl}_{2(\text{aq})})$  gleichzeitig an Carnallit gesättigt ist, wird das in Lösung gehende  $\text{MgCl}_2$  zusätzlich eine Kristallisation von Carnallit bewirken. In Vorversuchen mit einem kieseritischen Bohrkern, der in  $\text{CaCl}_2$ -Lösung gestellt wurde, konnten diese Überlegungen bestätigt werden.

Wesentlich attraktiver als nur Auflösung zu verhindern ist durch Kristallisation Risse in der ALZ allmählich zu verschließen. Hierzu können unterschiedliche Varianten von Kristallisationsreaktionen benutzt werden. Über die Ergebnisse der Untersuchungen zur lösungsinduzierten Kristallisation zur Abdichtung der ALZ wird im Abschnitt 4 berichtet.

### 1.2.2 Schlussfolgerungen für ein auf Kristallisation basierendes Dichtungskonzept

Im Ergebnis des vorliegenden Kenntnisstandes wird für die Bedingungen der Grube Teutschenthal folgendes Konzept zur Verhinderung von Auflöseerscheinungen durch lösungsinduzierte Kristallisation vorgeschlagen:



**Abb. 6:** Einbringen von reaktiven Sulfaten in 3 Zonen zum Sichern der Sättigungsbedingungen und Erzeugung einer Abdichtwirkung unter dem Gesichtspunkt eines gleichzeitigen Antreffens von Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit in der ALZ

In einer ersten Schüttung (**Zone I**) aus Carnallit und Kieserit oder anderer magnesium-sulfathaltiger Salze wird mindestens eine Sättigungszustand erreicht, der dem Punkt Q entspricht. Durch Zumischen von Halbhydrat wird bereits eine Übersättigung an  $\text{CaSO}_4$

erzielt, die auf weiteren Fließwegen zur Gips- oder Polyhalitabscheidung führen wird. Die sich daran anschließende **Zone II** dient dem Erreichen des Sättigungszustandes R und besteht im Wesentlichen wieder aus magnesiumsulfathaltigem Salz, Carnallit und Halbhydrat. Die Salze sollten hier bis an die Firsche angefüllt werden und in Richtung Zone III sollte der Halbhydratgehalt zunehmen. Im letzten Teil wäre es am günstigsten, Halbhydrat mit R-Lösung und zusätzlichem  $MgSO_4/K_2SO_4$  zu einem Brei anzurühren und damit den Streckenquerschnitt vollständig auszufüllen. In Zone II werden die Reaktionen des Halbhydrates mit den anderen Komponenten der Lösung bzw. der Schüttung zu einem abdichtenden Effekt in der Schüttung selbst und in der ALZ führen.

**Zone III** sollte mit teilentwässertem Calciumchlorid angefüllt werden. Bei Bedarf kann ein Anteil Steinsalz und  $CaSO_4$ -Halbhydrat zugemischt werden. Der Grad der Entwässerung und der Anteil Steinsalz regeln wesentlich die Wärmefreisetzung. Die bis in die Zone III vordringende Lösung (wegen der dichtenden Wirkung in Zone II nur geringe Zuflüsse) wird das Calciumchlorid unter Volumenzunahme hydratisieren. Die Lösung wird dabei vollständig verbraucht. Strömen größere Mengen an Lösung zu, die lokal nicht mehr durch Hydratisierung aufgebraucht werden, so ist dies R-Lösung, aus der der gesamte Sulfatgehalt unter Gipsbildung ausfallen wird und gleichzeitig ihre  $MgCl_2$ -Konzentration weiter erhöht wird, was zusätzliche Kristallisation von Carnallit hervorruft. Diese Überschusslösungen werden hochgradig übersättigt sein und beim Penetrieren in die ALZ zu Kristallisationen initiieren.

### 1.3 Schlussfolgerungen und prinzipielle Lösungswege für ein mögliches Grundkonzept

Die Abdichtung des Streckenquerschnittes ist entweder durch Dichtungskomponenten mit im Vergleich zum Gebirge geringer Steifigkeit oder großer Steifigkeit möglich.

"Weiche" Einschlüsse sind beispielsweise Dichtelemente aus Gelsystemen oder aus Schüttgütern (z.B. Bentonitgemische). Durch das fehlende Stützvermögen kommt es zur weiteren Auflockerung der ALZ. Deshalb müssen die neu entstandenen Dilatanzräume verschlossen werden. Dies soll durch sog. Intrusionsdichtungen erreicht werden. Der Grundsatz dieser Dichtungsvariante – Schaffung einer zusätzlichen Auflockerung mit dem Ziel, diese neugeschaffenen Umströmungswände in der aufgelockerten ausbruchsnahen Zone zu minimieren – ist zumindest zweifelhaft.

Bei einer steifen Dichtungskomponente wird die Konvergenz des Streckenquerschnittes durch die steifen Eigenschaften des Dichtmaterials (z.B. Sorelbeton) weitgehend verhindert. Die Steifigkeit des Materials sollte im Idealfall in etwa im Bereich der Steifigkeit des umgebenden Gebirges liegen. Da sich die aufgelockerte Zone bei diesem Konzept während der Funktionsdauer nur in sehr geringem Maße vergrößert, genügt hier die Vergütung bzw. Entfernung dieser Zone beim Einbau bzw. nach dem Einbau des Systems. Die Wirksamkeit der Entfernung bzw. Vergütung der aufgelockerten Zone hat auch in diesem Konzept entscheidenden Einfluss auf die Dichtheit des Gesamtsystems.

Um eine vollständige Abdichtung der ALZ zu erreichen, müssen möglichst alle potentiellen Fließwege erreicht werden. Die Injektion der aufgelockerten Zone sollte daher nicht über einzelne Bohrungen in diesem Bereich erfolgen, wodurch neue Imperfektionen (Fließwege) geschaffen werden können, sondern über den gesamten Streckenquerschnitt über so genannte Injektionskammern durchgeführt werden. Die Wirkungsweise der Injektionskammern kann durch umlaufende Schlitze, die in die aufgelockerten Zone führen, verstärkt werden.

Einen Sonderfall stellen Dichtelemente dar, die ihr Stützverhalten durch einen Quelldruck entwickeln. Bei Verwendung von Bentonit entsteht dieser Quelldruck nach Flüssigkeitszutritt.

Wenn eine sofortige Flutung des Dichtelementes nicht erwünscht oder nicht möglich ist, muss das Dichtmaterial ein genügendes Stützverhalten gegenüber dem Gebirge aufweisen. Bei Verwendung von Bentonitformsteinen mit Quarzsand als Zuschlagstoff ist dies prinzipiell möglich.

Einen Vergleich zwischen beiden Konzepten zeigt Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Vergleich der beiden Konzepte „weiches“ und „steifes“ Dichtelement

Weicher Einschluss	Steifer Einschluss
– ALZ vergrößert sich über die Funktionsdauer	+ ALZ bleibt konstant bzw. verkleinert sich über Funktionsdauer
– Wirksamkeit der Abdichtung erst nach Fluidzuritt zum System	+ Sofort nach dem Einbau wirksames System
– Dichtheitsprüfungen während des Einbaus nicht möglich	+ Dichtheitsprüfung während des Einbaus möglich (Kontur und Dichtelement) + Reparaturmöglichkeit bei unwirksamer Vergütung (z.B. Nachinjektionen oder Abriss und Neuerrichtung)
– statische Widerlager sind erforderlich, in dessen Bereich ein konzentrierter Lastabtrag ins Gebirge erfolgt	+ statische Widerlager können u. U. entfallen, da die Dichtelemente aktiv am Lastabtrag beteiligt sind

Untersuchungen über die prinzipielle Wirksamkeit der Dichtkomponenten zeigen, dass auf Grund einer Vielzahl von Vorteilen (keine bzw. sehr geringe Vergrößerung der Gebirgsauflockerung mit der Zeit, sofort wirksames System, Dichtheitsprüfung während des Einbaus möglich, Teilnahme am Lastabtrag) möglichst Dichtkomponenten mit hoher Steifigkeit oder/und mit unmittelbar nach dem Einbau einsetzender Quelldruckausbildung für einen Einsatz besonders günstig sind. Gleichzeitig ist eine Vergütung des konturnahen Gebirgsbereiches erforderlich. Dichtungskomponenten mit geringer Steifigkeit werden nicht empfohlen.

Zur Herstellung eines satten Kontaktes/Verbundes zwischen Dichtelement und Gebirge (vor allem hinsichtlich Firstspaltverfüllung), zur Erzeugung einer Druckvorspannung im Dichtelement sowie eines radialen Druckes auf das Gebirge und zur Abdichtung (großer) Rissweiten im aufgelockerten Gebirgsbereich eignen sich großflächige Injektionen über Injektionskammer/Injektionsringkammern und/oder radial verlegte Injektionsmanschettenrohre. Klassische Injektionen werden als nur begrenzt wirksam eingeschätzt.

Zur Verhinderung/Unterbrechung der Umströmung über den aufgelockerten, ausbruchsnahen Gebirgsbereich mit geringer Permeabilität und somit sehr geringen Rissweiten bieten sich schlitzförmige, möglichst mit inertem absolut dichten, möglichst plastischen, langzeitbeständigen Material ausgefüllte, in das Gebirge ausgestellte Hohlräume an; u.U. können diese „Gebirgsdichtungen“ in die Injektionskammern bzw. in die Injektionsringkammer integriert werden.

Folgende Wirkprinzipien zur Verminderung der Volumenströme über aufgelockerten Gebirgsbereich (I) und/oder Kontaktbereich (II) bieten sich an:

1. Verlängerung der Strömungswege (I; II; Reduzierung Druckgradient)
2. Radialer zeitabhängiger Gebirgsdruckaufbau (I; II; Überdrückung des Kontaktbereiches und Reduzierung des Spannungsdeviators bei steifem Einschluss)
3. Unterbrechung der Strömungswege im aufgelockerten Gebirge und im Kontaktbereich (I; II; Dichtungsschlitzte)
4. Schließen des Kontaktbereiches durch Einsatz quellender/schwellender Materialien unter Flüssigkeitseinwirkung (II)
5. Impermeabilisierung des Gebirges und des Kontaktbereiches durch aktiven Kontaktldruck der einwirkenden Salzlösungen auf einen impermeablen Gebirgsrand vor Flüssigkeitsdruckaufbau im Gebirge (I; II)
6. Injektion von Dichtmaterialien in das Gebirge/Kontaktbereich (I; II)
7. Selbsttätige Penetration von inerten Flüssigkeiten in das Gebirge (I; II)
8. Zuwachsen von Rissen, Klüften infolge chemischer Prozesse bzw. Kristallisation (I; II)

In den nachfolgenden Untersuchungen müssen diese Wirkprinzipien und die einsetzbaren Materialien unter *in situ* Bedingungen geprüft werden.

Als Injektions-, Bau- und Dichtmaterialien für horizontale Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Salinargebirge kommen entsprechend der chemischen Zusammensetzung der einwirkenden Salzlösungen und der vorliegenden Erfahrungen und Anforderungen (möglichst steifes System oder Quelldruckausbildung, Langzeitbeständigkeit, arteigenes/inertes Material) folgende Grundmaterialien in Betracht:

- Arteigene Salze: (Systeme, die die Polyhalitbildung begünstigen gelten hinsichtlich der Langzeitstabilität als vorteilhafter im Vergleich zu  $MgSO_4$ -Systemen)
- Hartgesteine: (insbesondere Basalt, als Schotter für Widerlager, u. U. mit Ton- / Bentonitzugabe)
- $MgO$ -Systeme: (bevorzugt  $MgO$ -Beton mit silikatischem Normzuschlag, alternativ steife Gelsysteme)
- Bentonit: (Bentonitformsteine)
- Bitumen, Asphalte: (als Dicht- und Injektionsmaterial)

Noch nicht einsatzreif ist der Einsatz neuartiger Versatztechnologien (Feuchtversatz aus Rückständen der Kalirohsalzverarbeitung), von Anhydritbaustoffen und der firstspaltfreie Einbau schüttfähiger Materialien mit hoher Trockendichte in horizontalen Grubenbauen. Der Nachweis der Langzeitstabilität durch natürliche Analoga ist für Basalt, Bentonit, Polyhalit, Anhydrit und Bitumen/Asphalt möglich.

## 1.4 Analyse der technischen Realisierbarkeit der favorisierten Prinzipien

Ausgehend von den favorisierten Materialien und den favorisierten Verschlussprinzipien ("Dichtungskomponente mit großer Steifigkeit" und "Quell- und schwelfähige Dichtungskomponenten") ist, auf Grund fehlender technischer bzw. *in situ* Erfahrungen sowie der unzureichenden Kenntnisse über die zu erwartenden geochemischen und geohydraulischen Verhältnisse, bei der Planung und Konzeptentwicklung von Verschlüssen im leichtlöslichen Salzgebirge eine diversitäre Vorgehensweise erforderlich. Dies kann durch Hintereinanderschaltung von Verschlusskomponenten mit gleicher Funktion und unterschiedlichen Wirkungsweisen erreicht werden. Die diversitäre Vorgehensweise soll vor allem für dichtende Komponenten umgesetzt werden. Sie ist aber auch für lastabtragende Elemente möglich. Dabei soll mit anwachsender Zeit das Sicherheitsniveau des Gesamtsystems durch die zeitabhängig ablaufenden Vorgänge (z.B. Konvergenz/Gebirgsdruckeinwirkung, Fortschreiten der Flüssigkeitsfront) anwachsen.

Falls das zu planende Verschlussystem nicht einem vorherigen *in situ* Test (Großversuch) unterworfen wird, ist das Verschlussystem in einzelne Systemkomponenten unterteilt so zu planen, zu errichten und technisch auszulegen, dass zumindest einige Systemkomponenten einer *in situ* Prüfung und somit zumindest durch einen Kurzzeittest einer Eignungsprüfung unterzogen werden. Dieser, während des Verschlusseinbaus durchzuführende, standortbezogene Test ist auch auf Grund der stark schwankenden, nicht normierbaren mineralogisch – feinstratigrafisch – geohydraulisch - geomechanischen Bedingungen außerordentlich vorteilhaft. Bisherige Kenntnisse gehen davon aus, dass diese mineralogisch – feinstratigrafisch – geohydraulisch - geomechanischen Bedingungen in sehr kurzen Abständen (im dm-Bereich) sehr großen Änderungen unterworfen sind.

Aus dieser Vorgehensweise resultiert ein Gesamtsystem, das aus unterschiedlichen, auf verschiedenen Wirkungsweisen und langzeitbeständigen Materialien beruhenden Einzelkomponenten besteht, die möglichst nach ihrem Einbau einen Kurzzeiteignungstest unterworfen werden. Auf Grund des derzeit lückenhaften und nicht ausreichenden Kenntnisstandes über horizontale Verschlussysteme im leichtlöslichen Salinargebirge sind alle Einzelemente auf einem hohen Sicherheitsniveau auszuführen. Um diese Grundprinzipien unterschiedliche Wirkungsweisen, unterschiedliche Bau-, Dicht- und Injektionsmaterialien, hohes Sicherheitsniveau jeder Einzelkomponente, möglichst *in situ* Kurzzeittests vieler Einzelkomponenten umzusetzen, müssen sehr große Verschlusslängen möglich sein.

In Tabelle 2 sind die in horizontalen Verschlussbauwerken im leichtlöslichen Salinargebirge einsetzbaren Materialien für die unterschiedlichen Verschlusselemente aufgeführt.

Aus jetziger Sicht **prinzipiell technisch realisierbar** erscheinen folgende Elemente:

- Vorschüttungen aus speziellen Salzgemischen,
- Dichtelemente aus Bentonitformsteinen,
- Dichtelemente aus Bitumen/Asphalt,
- Widerlager und Dichtelemente aus MgO-Beton (alternativ aus lastabtragenden Gelsystemen),
- Hochfeines MgO für Verpressarbeiten.

**Tabelle 2:** Favorisierte Prinzipien und Materialien für horizontale langzeitbeständige Verschlüsse im leicht löslichen Salzgebirge

Verschlusselement	Material	Zusätzliche Wirkung
<b>Vorschüttung/Aufsättigung</b>	<u>Zone 1:</u> Carnallitit, Kieserit und Halbhydrat <u>Zone 2:</u> Mg-haltiges Salz, Sylvan und Halbhydrat <u>Zone 3:</u> Calciumchlorid (teilentwässert), Steinsalz und Halbhydrat bei Bedarf	Abdichtung des Querschnittes und der Auflockerungszone
<b>Dichtelement (Querschnittsabdichtung mit hoher Steifigkeit)</b>	Bentonit	Quelldruck, Lastabtrag
	MgO-Beton	Lastabtrag
<b>Widerlager</b>	MgO-Beton	Querschnittsabdichtung
	Schotter (u. U. mit Füllstoff)	in Abhängigkeit vom Füllstoff u. U. Dichtfunktion
	Modifizierter Spülversatz, Feuchtversatz	Querschnittsabdichtung
<b>Vergütung der ALZ</b>	Suspensionen aus R-Lösung und hochfeinem MgO	u. U. Vorspannung, Kontaktfugendichtung
	Spezialbitumen	inerte Beschichtung, Kontaktfugendichtung
<b>Dichtungsschlitz</b>	Spezialbitumen	-
	Asphalte	
	Bentonitformsteine	

Eine weitere **Erprobung** ist für folgende Materialien erforderlich:

- Modifizierter Spülversatz / Feuchtversatz,
- Bitumen / Schotter - Systeme (als Injektionskammer),
- Spezialbitumen,
- Schotter und Schottergemische (Einbauverfahren, Gemischzusammensetzung).

## 2 Analyse der Wirkungsbedingungen und Ableitung der Anforderungen\*

Unter Wirkungsbedingungen werden alle relevanten Mechanismen und Prozesse, die während des Einbaues und der Funktionsdauer die Wirksamkeit der zu entwerfenden Konstruktion einer Querschnittsabdichtung im leichtlöslichen Salzgestein beeinflussen können, verstanden. Weiterhin müssen Prozesse, die bereits vor dem Einbau der Dichtung insbesondere den konturnahen Gebirgsbereich wesentlich beeinflusst haben, näher beleuchtet werden. Darüber hinaus muss auf die Bedeutung einer Detektion potenziell möglicher lokaler bzw. weitreichender Schwächezonen im Gebirgsverband, die zu Umläufigkeiten führen können und so die Wirksamkeit der Dichtungskomponenten negativ beeinflussen, hingewiesen werden.

Aus der Analyse der Wirkungsbedingungen ergeben sich Anforderungen an die zu konzipierenden Dichtungskomponenten hinsichtlich einer Stoßbehandlung vor Dichtungseinbau, der Baustoffzusammensetzung und -einautechnologie sowie der prinzipiellen Wirkungsweise der Verschlusskomponenten.

Weiterhin werden aus der Analyse der Wirkungsbedingungen wichtige Informationen für künftige Untersuchungs- und Versuchsprogramme gewonnen. Aufgrund der Komplexität der durchgeföhrten Untersuchungen werden unter Arbeitspaket 2 ausschließlich der natürliche Ursprungszustand des Wirtsgesteins und seine Veränderung durch den Streckenaufschluss sowie die Bereitstellung entsprechender Nachweis- und Erkundungsmethoden behandelt.

Zur Gewinnung der Basis- und Ausgangsdaten war, mit Rücksicht auf die Vielfalt der geologisch-mineralogischen, lösungskinetischen und geomechanischen Aspekte und deren gegenseitige Beeinflussung ein vergleichsweise breit angelegtes Untersuchungsprogramm konzipiert und realisiert worden. Die Zusammenarbeit der beteiligten Gesellschaften und Institute GTS, IfBB TU BAF, IfACh TU BAF, IBeWa, IfG und K-UTEC hat zur Bündelung der differenzierten Fachkompetenzen und Erfahrungen geföhrt. Erst durch diese Bündelung wurde eine zielführende Bearbeitung der anstehenden Aufgaben ermöglicht.

Zur Bewertung des Ursprungszustandes und des sekundären Zustandes nach dem Streckenaufschluss wurden im Wesentlichen auf die Ergebnisse der folgenden Untersuchungen zurückgegriffen:

- Untersuchung der mineralogischen, geologischen und lagerstättenkundlichen Bedingungen (K-UTEC)
- Mikrostratigraphie der Kieserit-Tachyhydrit-Schichten (K-UTEC)
- Bestimmung von Feuchtigkeitsprofilen und in situ-Probenentnahmen (K-UTEC)
- Lichtschnittaufnahmen am Referenzversuchsort (K-UTEC)
- Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten carnallitischer Gesteine (IfG)
- Geoelektrische Messungen in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik und Geologie der Uni Leipzig (IfG)
- Spannungssondierungen mittels Hydro-Frac (IfG)
- Ultraschallmessungen zur Charakterisierung der ALZ (IfG)
- Bohrkerngewinnung und Entnahme eines Großblockes zur Probengewinnung (IfG)
- Bohrlochkamera-Untersuchungen (IfG)
- In situ-Gaspermeabilitätsuntersuchungen (IBeWa)
- Bestimmung der Stoßsensibilität (IfBB TU BAF)

\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 2:

Seifert, G.; Fliss, Th.; Döhner, Chr.: Analyse der Wirkungsbedingungen und Ableitung der Anforderungen. KUTEC Sondershausen, September 2004.

- Georadarerkundung (K-UTECH)
- Geoelektrische Tomographie (K-UTECH)
- Geophysikalische Laboruntersuchungen an Carnallititproben (K-UTECH in Zusammenarbeit mit Institut für Geophysik, TU Clausthal)

Vor dem Hintergrund der Standortoptimierung für ein zu projektierendes Verschlussbauwerk wurden im Rahmen des FUE-Vorhabens eine Reihe von Verfahren erprobt, die Aufschluss über die Beschaffenheit der aufgelockerten und durchfeuchteten konturnahen Zone geben und deren Einsatzbedingungen größtenteils einer nicht invasiven Erkundung der Standortverhältnisse in den Tunnelstrecken der 3. und 3a-Sohle entsprechen. Der Schwerpunkt einer möglichst nicht invasiven Erkundung wird durch das extrem löseempfindliche Wirtsgestein bedingt, da bereits sehr geringe Veränderungen in den natürlich gegebenen Randbedingungen zu erheblichen Auswirkungen führen können.

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, den Zustand der Streckenauffahrung speziell im Hinblick auf die Ausbildung der konturnahen aufgelockerten Zone zu erfassen um sich ein Bild über die geomechanische sowie lösungskinetische Beeinflussung einer Tunnelstreckenauffahrung im Mittleren/ Hangenden Lagerbereich des Kaliflözes Staßfurt in der Grube Teutschenthal zu verschaffen. Die Untersuchungen wurden bewusst auf das durch einen sehr hohen Anteil an leichtlöslichen Salzen charakterisierte Niveau der 3a-Sohle fokussiert. Die Abdichtung der in diesem Niveau verlaufenden Streckenauffahrung nach Angersdorf muss im Vergleich mit der im stratigraphischen Niveau der 3. Sohle vorhandenen Auffahrung als höherrangige Aufgabenstellung gewertet werden.

## **2.1 Untersuchung der mineralogischen, geologischen und lagerstättenkundlichen Bedingungen**

### **2.1.1 Ausgangszustand**

Die während der Bergbauphase in der Grube Teutschenthal erkannte und praktisch angewandte stratigraphische Grobgliederung des Kaliflözprofils unterscheidet drei Bereiche, getrennt durch charakteristische Halitbänke dargestellt in Tabelle 3.

**Tabelle 3:** Stratigraphische Grobgliederung des Kaliflözes in Teutschenthal

Hangender Lagerteil	zusammen der Hangendgruppe des Kaliflözprofils entsprechend, demgemäß relativ engschichtig, carnallitreich, weitgehend frei von kompakten Halitlagen, hangendwärts zunehmender Tachyhydritgehalt
Spätbank	
Mittlerer Lagerteil	
Wurmbank	
Unterer Lagerteil	der Liegendgruppe des Flözprofils entsprechend einschließlich des Übergangs zum Staßfurtsteinsalz, mit kompakten, dm- bis m-starken Halitbänken

Die hangendwärts zunehmend feinere Schichtung, in Teutschenthal und Angersdorf gleichsinnig mit dem Ansteigen des Tachyhydritgehalts und der Häufigkeit toniger Einlagerungen gab Veranlassung, auf Gewinnungsarbeiten im Hangenden Lagerteil zu verzichten. Stark zum Aufblättern und Abschalen neigendes Gestein oberhalb der Spätbank verhinderten in diesem Bereich die Gestaltung einer standfesten Firste der Abbaukammern. Die dabei gemachten Erfahrungen waren der vornehmliche Ausgangspunkt dafür, dass in

diesem Abschnitt zugleich eine stärker lagige, schichtartige Anreicherung bzw. Einlagerung des Tachyhydrits gesehen wurde, im Gegensatz zu bevorzugt nestartigen Einsprengungen in den stratigraphisch tieferen Bereichen.

Aufgrund der Unzugänglichkeit der für die Dammbauwerke vorgesehenen Tunnelstrecken auf der 3.- und der 3a-Sohle erfolgte die Auswahl eines geeigneten Referenzversuchsortes im Bereich der Montagekammer auf der 3a-Sohle. Der Referenzversuchsort liegt im gleichen stratigraphischen Horizont wie die Tunnelstrecke auf der 3a-Sohle und stellt damit im Vergleich zur 3. Sohle die ungünstigeren Standortverhältnisse hinsichtlich des Einbaus einer Streckenabdichtung dar. Der Versuchsort befindet sich am Anfang einer Maschinenstrecke mit 3 m Durchmesser und weist eine Länge von etwa 50 m auf.

Unterschiede zwischen den Tunnelstrecken und dem Versuchsort bestehen hinsichtlich der Standdauer und des in den letzten Jahrzehnten herrschenden Wetterregimes. Das Wetterregime ist dadurch gekennzeichnet, dass die Tunnelstrecke 3a-Sohle langjährig als Abwetterstrecke in Verbindung mit dem Schacht Halle genutzt wurde. Abrupte Wechsel in der Wetterführung erfolgten nach der Abdichtung der Schächte Saale und Halle 1987/88 und der Wiedereröffnung des Schachtes Halle 1994. In Verbindung mit der Einlagerung von Versatzstoffen ab 1994 kam es zu einer Erhöhung des Feuchtegehaltes in den durch die Strecke ausziehenden Wettern. Die Differenziertheit der Wetter- und Temperaturbedingungen werden unter Anderem als Ursachen für die sekundären Ausscheidungen von Bischofit am östlichen Ende der Tunnelstrecke 3a-Sohle diskutiert. Ähnliche Beobachtungen wurden in Bohrlöchern gemacht, wobei es sich hier allerdings überwiegend um Gipsbildung handelt.

Das untersuchte Profilsegment der 3a-Sohle liegt im Grenzbereich Mittlerer/Hangender Lagerteil. Bezüglich des Tachyhydrits erlangen damit die Formen der Aggregate, ihre Verteilung und Assoziationen innerhalb des übrigen Gesteinsgefüges Interesse für die durchzuführenden Untersuchungen. Genetische Grundlagen für Rückschlüsse auf prinzipielle Abläufe und Erscheinungsbilder existieren dafür praktisch nicht. Die Bildung des Tachyhydrits generell, sein im Raum Teutschenthal besonders häufiges Auftreten, seine Verteilung in der Lagerstätte, seine stoffliche Assoziation insbesondere mit Kieserit und weitere Fragen sind bislang nicht geklärt. Insbesondere die lagerstättenkundliche Fachliteratur hält sich dazu bedeckt. D'ANS [9] hat mehrere Möglichkeiten der Bildung von Tachyhydrit an Hand der isothermen Gleichgewichte besprochen. Die physikochemischen Voraussetzungen dazu sind danach relativ gut zu übersehen. Das generelle Problem seines häufigen Auftretens im Raum Teutschenthal ist vor allem seine Assoziation mit Kieserit, obwohl die erforderlichen  $\text{CaCl}_2$ -reichen Lösungen die Gegenwart von  $\text{MgSO}_4$  (damit Kieserit) ausschließen. Unter stärkerer Einbeziehung der lagerstättengeologischen Situation sieht BRAITSCH [10] "nicht alle Probleme" der Tachyhydritbildung geklärt. Zusammenfassend wird dieser Stand bei RÖSLER & KOCH [11] dargestellt. Tachyhydrit ist "als Primärabscheidung in der Carnallit- und Bischofitregion ozeanischer Salzlagerstätten mit diesen Mineralen neben wenig Halit möglich. Die bekannten deutschen Vorkommen dürften metamorph durch Carnallitzersetzung oder aus hochtemperierten  $\text{CaCl}_2$ -reichen Metamorphoselösungen entstanden sein. Nur so ist das gemeinsame Auftreten von Tachyhydrit neben Carnallit, Halit, Kieserit und z. T. Sylvian ohne eine Bildung von Anhydritsäumen erkläbar".

Die Schichtung des Carnallits am Teutschenthaler Sattel ist weiträumig aushaltend und prinzipiell durch entsprechende Konstanz der Schichtungsmerkmale ausgezeichnet. Das Grundmuster ist die Sequenz einer Carnallit-, einer Kieserit- und einer Halitlage (z. T. mit feiner basaler Tonlage).

Die Mächtigkeit der Einzelglieder reicht von mehreren dm bis in mikroskopische Dimensionen. Zudem treten vielfach zusätzliche rhythmische Wiederholungen auf (z. B. Carnallit- Kieserit-Carnallit-Kieserit - MEIER [12]). Stoßaufnahmen zeigten, dass trotz

weitgehend unbedeutender salztektonischer Beanspruchung gewisse Deformationen auftreten können (DÖHNER et al. [13]):

- linsenartige Verdickungen bzw. Ausdünnungen von Einzelhorizonten bis zum Auskeilen bzw. Verschmelzen mit angrenzenden Carnallitschichten, die andernorts deutlich abgegrenzt und unterscheidbar sind,
- große Variabilität im Habitus der einzelnen, z. T. markanten Kieseritlagen (nach Anzahl im feinstratigraphisch definierten Profilbereich, Mächtigkeiten, Interngefuge, Abgrenzung und Verlauf, Gruppierung im Profil etc.), die sich bereits im engräumigen Bereich (Pfeilerdimension) bemerkbar macht,
- gelegentliche Deformationen der geringmächtigen Haliteinlagerungen (Kleinfaltung, Zerreissen), wodurch eine durchgängige Korrelierbarkeit derselben nicht generell gegeben ist - im aktuellen Untersuchungsbereich mit Ausnahme der Spätbank,
- Anzeichen auch stärkerer Deformationen in der Art bevorzugter Bewegungsbahnen, die visuell normalen Schichteinheiten ähneln können. Sie fallen u. a. durch kataklastische Intergefuge, durch z. T. diskordante Hangend- und Liegendgrenzen auf.

Die in aufgeschlossenen Carnallititprofilen daraus resultierenden Abweichungen sind unterschiedlich augenfällig und werden vielfach erst durch Vergleich benachbarter feinstratigraphischer Aufnahmen deutlich.

## 2.1.2 Durchgeführte Arbeiten

Der stratigraphisch untersuchte Profilabschnitt umfasst den Bereich ca. 1 m unter der Spätbank bis ca. 5 m über der Spätbank, in Summe etwa 6 m. Die geologisch/mineralogischen Ansprachen sowie die Laboranalysen an Probestücken erfolgten an drei verschiedenen Punkten am Referenzversuchsort im Bereich eines Untersuchungsschlitzes, einer ergänzenden Tiefbohrung BAGBL sowie den Hochbohrungen IfGUS 4 und IfGUS 5.

Die Aufnahme des feinstratigraphischen Profils im Streckenbereich erfolgte in einem ca. 50 cm breiten, 10 - 20 cm tiefen Untersuchungsschlitz (Abb. 13) am NE-Stoß der 1963 aufgefahrenen 3a Sohle. Aufgrund der örtlich gegebenen negativen Einflussfaktoren insbesondere für die Beprobung wurde auf die Entnahme von Stückproben als repräsentativere Sektionsbemusterung zurückgegriffen, deren Repräsentanz für das bearbeitete Profil durch weitest mögliche Dichte und Vollständigkeit der erfassten Mächtigkeit anzustreben war.

Die stratigraphische Gesteinsansprache und die Entnahme der Stückproben wurden nach Abtrag einer vorsorglich aufgebrachten Bitumenschutzhaut in Einzelstufen durchgeführt, unter Beachtung einer möglichst komplexen Erfassung der jeweiligen Schichtmächtigkeiten. Unmittelbar nach der Gewinnung wurden die Stückproben durch Verpackung mit Silikagel dem Zugriff der Feuchtigkeit entzogen. Die Stückproben wurden überwiegend photographisch dokumentiert. Ergänzend dazu erfolgte anhand punktuell entnommener Kornproben eine kristallographische Mineralbestimmung interessanter oder fraglicher Teilbereiche der Stückproben. Die Ergebnisse geben Hinweise auf die Variationsbreite des Mineralbestandes im Kleinstbereich (mm) der Probestücke und gestatten damit differenzierte Aussagen in Dimensionen, die im Rahmen des Gesamtthemas für Vorgänge zwischen Gestein und kontaktierender Lösungen durchaus Interesse besitzen.

Die Großlochbohrung BAGBL als zweiter Aufschluss stellt eine von vielen Schrägborhungen dar, die mit einem Einfalten von 45° in NE-Richtung, d. h. mit einem Differenzwinkel von ca. 41° zur Schichtung und Bohrlängen um 1,20 m gestoßen worden sind. Die Bohrung BAGBL besitzt einen der tiefsten Ansatzpunkte und ein Bohrkaliber von 150 mm, wodurch ein stratigraphischer Teufengewinn bis ca. 0,4 m unterhalb der Basis des Schlitzprofils erreicht wurde.

Die beiden Aufschlüsse im Firstbereich, die Hochbohrungen IfGUS 4 und IfGUS 5 wurden in 1 m Abstand ca. 3,0 m seiger in die Streckenfirsse mit einem Bohrkaliber von 10 cm gestoßen. Der Kernzustand erlaubte keine schlüssige Rekonstruktion des *in situ*-Profils. Es lagen fast ausschließlich Kernscheiben senkrecht zur Kernachse vor, 0,5 bis selten 4 cm dick, mit abgerundeten, nicht oder nicht eindeutig korrelierbaren Bruchflächen, dazu mehr oder weniger lose Brocken und Korngut. Die Erfassung von Schichtgrenzen, Schichtmächtigkeiten, Kernverlusten kann hier nur näherungsweise angestrebt werden. Die dennoch erfolgte stratigraphische Ansprache des Bohrgutes wurde durch fotografische Dokumentation charakteristischer Kernscheiben ergänzt. Dem Charakter des Materials entsprechend kamen dafür im Wesentlichen nur die etwa schichtungsparallel liegenden Bruchflächen der Kernscheiben in Betracht. Für die Mineralanalytik wurde der gesamte, jeweils vorhandene Bohrkern der Probesektionen einschließlich Feingut gemahlen, homogenisiert und auf Labormengen geteilt.

Die hangende Verarmungszone wird in den Hochbohrungen durch Zunahme des Halitgehalts bei Abnahme der Carnallit- und damit auch der Tachyhydritwerte charakterisiert. Aufschlüsse in diesem stratigraphischen Niveau existieren im Grubenfeld nicht, dementsprechend fehlen auch Ergebnisse von Gesteinsuntersuchungen. Für den von den Untersuchungen nicht mit erfasstem oberen Bereich des Hangenden Lagerteils sollten die festgestellten Verhältnisse extrapoliert werden können.

Der bereits erwähnte Anstieg der Tachyhydritverteilung im Grenzbereich Mittlerer/ Oberer Lagerteil kommt in den mineralanalytischen Untersuchungsergebnissen sehr markant zum Ausdruck. Die Stückproben aus dem Untersuchungsschlitz über der Spätbank zeigen Tachyhydritgehalte zwischen ca. 8,5 und 40 %, eine Ausnahmeprobe erbrachte ca. 3 %. Demgegenüber liegen die beiden Proben aus der Schicht unter der Spätbank wenig über 3 %. Aus der visuellen Erfassung des Bohrkerns aus der Großlochbohrung BAGBL setzen sich diese vergleichsweise geringen Werte zumindest zunächst weiter ins Liegende fort. Das findet Unterstützung in der Art der Einlagerung des Tachyhydrits in das Carnallitgestein, der hier vorzugsweise in mehr oder weniger isolierten Flocken, Nestern, und Adern vorliegt. Zu der oberhalb der Spätbank wesentlich stärker schichtigen Tachyhydritverteilung, häufig in Form durchgehender oder zumindest den Aufschlussradius überschreitender Lagen, besteht ein deutlicher Unterschied. Die im Schlitzprofil über der Spätbank entnommenen Stückproben deuten mit einem Durchschnittsgehalt von ca. 21 % diesbezüglich eine sprunghafte Entwicklung an.

Ob die so indizierte Veränderung in diesem stratigraphischen Bereich für ein größeres Areal zutrifft bzw. sich vorherrschend vergleichbar vollzieht, bleibt ungewiss. Dies muss auch für den vorgesehenen Dammstandort betont werden. Ein unmittelbarer Vergleich bzw. Rückschluss auf Basis der bergbaulichen Bemusterungsergebnisse ist auf Grund der Unschärfe aus deren konstanter Bindung an 1 m-Gestänge- und Probelängen nicht hinreichend aussagekräftig.

Während die erläuterte Charakteristik des Tachyhydritgefüges unter der Spätbank wegen der Kleinstückigkeit der Proben nur andeutungsweise zu Ausdruck kommt, wird der schichtbetonte Einlagerungscharakter im Hangenden Lagerteil durch die weiteren Stückproben und der Bohrkernproben in vielfältiger Weise verdeutlicht. Punktuell entnommene Kornproben lassen in Mächtigkeitsbereichen von mm bis cm durchaus Anreicherungen von 80 % Tachyhydrit und mehr erkennen. Erwähnenswert und in genetischer Hinsicht besonders problematisch sind in den Kernen der Hochbohrungen beobachtete, als bis cm-starke Einlagerung auftretende, weitgehend reine, grobkristalline bis späte Tachyhydritkörper (Abb. 8) sowie bis dm-große nestartige Aggregate von gleichartigem Tachyhydrit, die unmittelbar mit weißem, kleinkörnigen Kieserit (Abb. 7) kontaktieren. Der Mineralhabitus spricht in diesen Fällen für sekundäre Um- und Sammelkristallisationen, die aber in dieser Assoziation mit den bekannten physikochemischen Grundlagen unverträglich ist.



**Abb. 7:** Mittel- bis grobkristalline, reine Tachyhydritnester bis Dezimetergröße und weißer Kieserit (Hochbohrung Schicht B-7)



**Abb. 8:** Kompakte; cm-starke Lage von reinem, grobkristallinem bis späten Tachyhydrit (Hochbohrung Schicht B-13)

Im Rahmen der Aufgabenstellung ist Interesse am räumlichen Aushalten der besonders Tachyhydritreichen Schichtelemente geboten. Sie könnten im Langzeitbereich auch unter Mitwirkung von Kapillarkräften als bevorzugte Migrations- und Lösebahnen für vordringendes Fluid aktiv sein. Generelle Aussagen lassen sich aus den Arbeiten in der 3a-Sohle dazu nicht ableiten. Anhand der durch Tachyhydritverwitterung porigen Oberfläche markanter Einzelhorizonte (Untersuchungsschlitz: Unteres und Oberes Band) ist zumindest in diesen Fällen ein Aushalten des Tachyhydritreichtums bis in Hektometerbereiche wahrscheinlich. Konkrete, feinstratigraphisch und qualitativ abgesicherte Ergebnisse dazu liegen jedoch nicht vor.

Obwohl zumindest im Hangenden Lagerteil verbreitet als schichtig eingelagerte, quantitativ bedeutende Komponente auftretend, zeigt der Tachyhydrit keine einheitliche Positionierung innerhalb des grundsätzlichen Schichtungsprinzips im Carnallitit. Zu erkennen ist eine gewisse bevorzugte Bindung an dunklere, von toniger Substanz durchsetzte Carnallit- oder Kieseritlagen, die er saumartig begleitet, bei höheren Anteilen auch in feiner Wechsellagerung oder diffus durchsetzt. Gegenüber Carnallit werden bestehen bevorzugte Assoziationen mit blass gefärbten Varietäten, während kräftig rot gefärbte Carnallitlagen in der Regel Tachyhydritarm sind.



**Abb. 9:** Faltenstruktur A etwa 20 m östl. von Abbau 155, Blick nach Ost



**Abb. 10:** Faltenstruktur A am Nordstoß

An dieser Stelle ist auch auf die im Bereich des vorgesehenen Dammstandortes in der 3a-Sohle festgestellten, nicht unerheblichen Sinterbildungen von Bischofit hinzuweisen. Ihre Entstehung wird im Zusammenhang mit der Zersetzung von Tachyhydrit gesehen. Nähere Kenntnisse darüber existieren nicht, weder hinsichtlich der Verursachung nur in diesem Bereich, des Vorganges, der Form der Sinterbildung, noch in Bezug auf konkrete, dadurch bewirkte Veränderungen im benachbarten Anstehenden. Im Bereich des aktuellen Untersuchungsortes ergeben sich dazu keine Ansatzpunkte. Eine Klärung der Vorgänge am Ort des Geschehens wird in der Perspektive für erforderlich gehalten.

Die im näheren Umfeld des Versuchsortes beobachteten Faltenstrukturen, teilweise in Verbindung mit tief reichenden Hohlräumbildungen, lassen auf Bereiche schließen, in denen gegenüber den am Versuchsort beobachteten Verhältnissen mit einer deutlichen Erweiterung der beeinflussten Zone zu rechnen ist. Diesen Strukturen, insbesondere ihrer Lage und Erstreckung, muss bei der Standortwahl der Sperrbauwerke eine entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt werden.

### **2.1.3 Mikrostratigraphische Untersuchungen an Kieserit-TachyhydritSchichten mit besonders intensiven Verwitterungsscheinungen**

Die als Oberes Band (Schicht 4) und Unteres Band (Schicht 6) im Untersuchungsschlitz bezeichneten markanten Kieserit-Tachyhydrit-Bänder treten im Untersuchungsgebiet als besonders stark auswitternde Bereiche hervor. Um diese am Versuchsort auftretenden besonders intensiven Verwitterungsscheinungen näher zu untersuchen wurden an Proben aus diesem Bereich verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Dabei handelte es sich im Wesentlichen um mineralogische Untersuchungen an Kernproben und Auf- bzw. Anlöseversuche unter Laboratmosphäre.

Nach der geologischen Ansprache handelt es sich bei diesen Schichtengliedern um dunkle engschichtige Carnallitlagen. Kieserit und Carnallit treten hier in grob- bis mittelstreifigem Wechsel bei grauer Färbung auf. In den Kieseritlagen kann es zu teilweise knotenartigen Verdickungen kommen. Weiterhin treten tonige Substanzen eng feinstreifig angereichert auf. Das Auftreten des Tachyhydrit wird als flockig-nestartig charakterisiert und ist bevorzugt an die Ränder der Carnallitlagen gebunden. Das Untere Band enthält dabei höhere Tachyhydritanteile als das Obere Band, wobei der Tachyhydrit hier in maximal bändrigen Lagen konzentriert ist.



**Abb. 11:** Probe (UB 3) aus dem Unteren Band zu Versuchsbeginn



**Abb. 12:** Probe (UB 3) aus dem Unteren Band nach 42 Stunden, Tiefe der ausgewitterten Bereiche < 3 mm

Die Probennahmen vor Ort gestalteten sich aufgrund der hohen Sensibilität des Materials gegenüber Feuchtigkeit sehr schwierig. Das für die Untersuchungen verwendete Probenmaterial stammt aus einer Bohrung im Bereich des Unteren Bandes (Schicht 6). Neben der Sorgfalt bei den Arbeiten der direkten Probennahme mussten weiterhin die Feuchtigkeiteinflüsse bei Probenpräparation so gering wie möglich gehalten werden. Zur Präparation der untersuchten Proben aus dem Unteren Band wurde daher ein Verfahren angewendet bei dem die Probekörper nur sehr kurze Zeit der Laboratmosphäre ausgesetzt werden (deutlich unter 1 Minute). Die Proben werden nach der Präparation sofort wieder luftdicht verpackt und unter klimatisierten Bedingungen gelagert. Alle Arbeiten erfolgten dabei zusätzlich bei geringer Luftfeuchtigkeit. Die Proben wurden bei diesen Arbeiten mechanisch nur sehr gering beansprucht. Eine thermische Beeinflussung kann ausgeschlossen werden.

Zur Untersuchung der feinstratigraphischen Ausbildung der markanten Bandstrukturen wurden an verschiedenen Proben aus dem Unteren Band mineralogische Untersuchungen in Form von punktuellen halbquantitativen Mineralanalysen durchgeführt. Eine gezielte Probennahme an den frischen unbeeinflussten Proben im Ursprungszustand gestaltet sich aus verschiedenen Gründen sehr schwierig. Aufgrund der teilweise sehr geringen äußerlichen Differenzen in Farbe und Ausbildung der anstehenden Schichten sowie den stärkeren Schwankungen im Schichtverlauf und in der Mächtigkeit der teilweise sehr geringmächtigen Einzelschichten mit Schichtdicken <2 mm erfolgten die Mineralanalysen daher nicht immer in den für die Auswitterungsmechanismen relevanten Schichten. Einzelne Schichtenglieder können teilweise im nicht angewitterten Ursprungszustand nicht detektiert werden.

Zur Optimierung der Untersuchungen an Proben aus Bereichen der Kieserit-Tachyhydrit-Bänder wurde daher eine Vorgehensweise für weitere Arbeiten entwickelt, die es ermöglicht den vollständigen Schichtenaufbau zu detektieren und eine Probenentnahme entsprechend abzustimmen. Trotz der Schwierigkeiten bei den Probenentnahmen bestätigen die Mineralanalysen prinzipiell die Ergebnisse der in situ-Untersuchungen. Das betrifft insbesondere die grob- bis mittelstreifige Wechsellagerung von Kieserit, Tachyhydrit und Carnallit mit eng feinstreifig auftretenden tonigen Substanzen.

Im Anschluss an die mineralogischen Untersuchungen der Proben aus dem Unteren Band (Schicht 6) wurden unter Laboratmosphäre Anlöseversuche durchgeführt um daraus die besonders sensibel reagierenden Schichten zu bestimmen (Abb. 11 und 12). Der Feuchtigkeitsgehalt der Laboratmosphäre entsprach dabei in etwa dem Feuchtigkeitsgehalt des Grubenklimas am Referenzversuchsort im Winterhalbjahr.

Beim Anlöseversuch einer Probe aus dem Unteren Band (UB 1, Schicht 6) wurde beispielsweise durch außerordentlich intensive Verwitterungerscheinungen ein komplettes Bändchen bestehend aus 3 Einzelschichten bei der ungeschützten Lagerung durch die Luftfeuchtigkeit innerhalb weniger Tage über die Dimension des Bohrlochdurchmessers vollkommen zerstört. Der überwiegende Teil der Gesteinssubstanz des Bändchens wurde aufgelöst und trat als hochgesättigte Lösung aus. Die Analyse der Lösung belegt mit den dominierenden Anteilen von  $MgCl_2$  und  $CaCl_2$ , dass hier fast ausschließlich eine Tachyhydritauflösung stattgefunden hat. Der zurückbleibende zunächst nicht aufgelöste, faktisch nur wenige Ma.-% ausmachende Anteil kann in einen grobkörnigen Hauptbestandteil und einen feinkörnigen Anteil mit Korngrößen <0,1 mm unterschieden werden.

Bei dem Hauptbestandteil handelte es sich um Kieserit mit Korngrößen zwischen 0,8 und 1,5 mm wobei die Kornaggregate jeweils mit Feinstpartikeln besetzt bzw. teilweise durchsetzt waren. Der feinkörnige Anteil bestand aus Gips als sekundäre Bildung in Form feinster Nadeln (freie Einkristalle und büschelige oder sternartige Verwachsungen) sowie Kieserit, Polyhalit, und Sylvinit in Form unregelmäßiger Körner, die offenbar keine sekundären Bildungen darstellen. Weiterhin wurden Quarz in Spuren und Ton mit Korngrößen bis etwa 0,001 mm in sehr geringer Konzentration nachgewiesen.

Der Aufgrund der grauen Färbung zunächst angenommene höhere Tonanteil wird offenbar dadurch vorgetäuscht, dass faktisch allen Salzkörnern Tonpartikel anhaften. Dadurch wird insbesondere das Mineralgefüge charakterisiert, das durch eine besonders intensive Verwitterung gekennzeichnet ist.

Generell können aus den Anlöseversuchen und den Beobachtungen vor Ort folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Verwitterungsfähigkeit ist dem frisch aufgeschlossenen Material nicht anzusehen,
- etwa 50 % der anstehenden Schichten werden bei den untersuchten Proben des Unteren Bandes (Schicht 6) intensiv angegriffen und korrodiert,
- der Korrosionsfortschritt erfolgte sehr rasch innerhalb von wenigen Tagen.

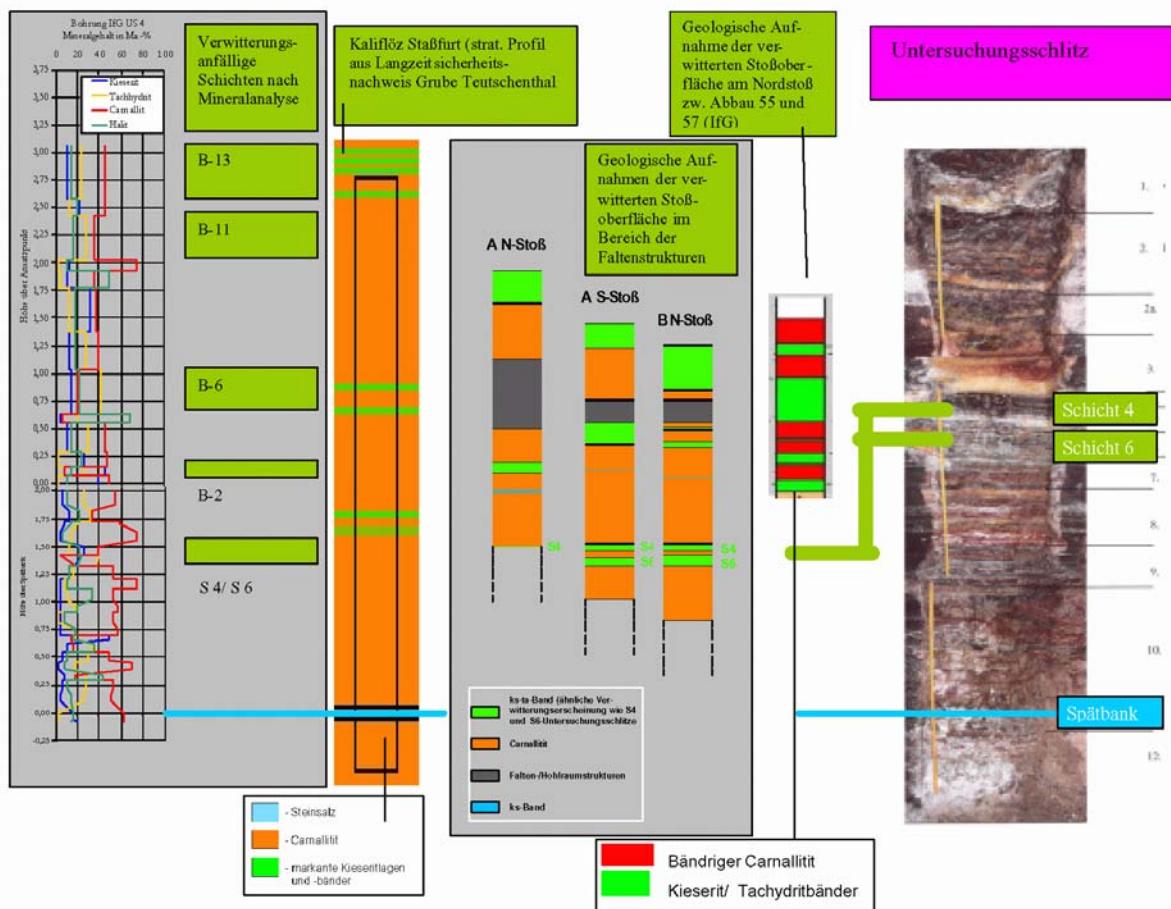
Als Auffälligkeit ist zu erwähnen, dass besonders aggressiv auswitternde Schichtstrukturen neben erhöhten Gehalten an Kieserit und Tachyhydrit weiterhin durch einen hohen Gehalt an unlöslichen Bestandteilen gekennzeichnet sind (Aufschluss Untersuchungsschlitz: Schicht 6), was als Hinweis auf die Ausbildung eines besonderen, die Verwitterung begünstigenden Interngefuges zu interpretieren ist. Verschiedene Proben aus Schichten direkt über der Spätbank (Aufschluss Untersuchungsschlitz: Schichten 9 und 10) weisen ebenfalls einen erhöhten Anteil an unlöslichen Substanzen auf, zeigen allerdings keine so ausgeprägten Verwitterungerscheinungen wie das Untere und Obere Band. Als Ursachen für dieses abweichende Verhalten kommen neben Variationen in den Kristallformen und texturellen Merkmalen geringere Schichtmächtigkeiten in Betracht. Die Verwitterung bevorzugt sowohl hellerer als auch dunklerer Bänder lässt weiterhin Variationen in den Kristallformen und texturelle Veränderungen vermuten. Geringere Schichtmächtigkeiten könnten eine mechanische Stabilisierung bereits angewitterter Bereiche bewirken, wodurch ein Fortschritt in tiefere Konturbereiche behindert werden kann. Durch Beobachtungen bei der Schlitzherstellung an bis in etwa 20 cm Tiefe völlig entfestigten Schichtengliedern analog dem Unteren und Oberen Band wird diese Vermutung weiter unterlegt. Die Schichten weisen augenscheinlich ein intaktes Material auf, sind aber im konturnahen Bereich vollständig entfestigt und können relativ leicht mit entsprechenden Werkzeugen gelöst werden.

Im Bereich der Hochbohrungen IfG US 4 und 5 treten wie auch schon bei den Untersuchungen von Proben aus dem Untersuchungsschlitz verschiedene Schichtstrukturen durch hohe Gehalte an unlöslichen Bestandteilen hervor. Diese Schichten werden nach den Ergebnissen der Untersuchungen des Unteren und Oberen Bandes als verwitterungsanfällige Schichten eingestuft. In den Hochbohrungen werden sie als dunkler/ dunkler kieseritreicher Carnallitit und dunkle, engschichtige Carnallit-Kieseritlage angesprochen. Die Schichtbeschreibungen decken sich weitestgehend mit der Ansprache des Unteren und Oberen Bandes aus dem Untersuchungsschlitz.

Bei den Aufnahmen von Falten- und Muldenstrukturen im näheren Versuchsortumfeld konnten verschiedene Schichtstrukturen mit ähnlichen Verwitterungerscheinungen wie die markanten Bänderstrukturen aus dem Untersuchungsschlitz festgestellt werden. Die beobachteten Ausbildungen korrelieren dabei in ihrer Lage mit den nach den geologischen Ansprachen und Mineralanalysen im Bereich der Hochbohrungen als verwitterungsanfällige Schichten ausgewiesenen Bereichen (Abb. 13).

Weiterhin korrelieren die als verwitterungsanfällig charakterisierten Schichten im Bereich der Hochbohrungen in ihrer Lage deutlich mit markanten Kieseritbändern, die im Rahmen von Untersuchungen zum Langzeitsicherheitsnachweis der Grube Teutschenthal angesprochen worden sind. Vergleiche hierzu die Darstellung der stratigraphischen Aufschlussverhältnisse des Kaliflözes Staßfurt in Abbildung 13 mit den markanten Kieseritbändern etwa 2, 3 und 5 m über der Spätbank. Dies gilt insbesondere für die mächtigeren Schichten aus den

Hochbohrungen (B-6 und B-13), wobei im Bereich der Schicht B-13 eine 1 bis 3 cm dicke kompakte Schicht reinen Tachyhydrits (Abb. 8) angesprochen wurde.



**Abb. 13:** Markante Kieserit-Tachyhydrit-Bänder im Bereich des Referenzversuchsortes und verwitterungsanfällige Schichtenstrukturen

- Strat. Profil Langzeitsicherheitsnachweis über Lage der Spätbank eingepasst
- geol. Aufnahmen der Faltenstrukturen über die Lage von Schicht 4 (Untersuchungsschlitz) in das Profil eingepasst
- geol. Aufnahme zw. Abbau 55 und 57 über die Lage von Schicht 1 (Untersuchungsschlitz) in das Profil eingepasst

Die Mechanismen, welche die intensiven Auswitterungen im Bereich der markanten Kieserit-Tachyhydrit-Schichten bedingen, werden durch eine Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand unterscheiden wir prinzipiell zwei Fälle:

### Fall 1: Ausfluss der Substanz in Form von Lösungen

Im Fall 1 erfolgt ein Ausfluss der gelösten Substanzen in Form von Lösungen. Es bilden sich kavernöse Strukturen bzw. Hohlräume im betroffenen Stoßbereich. Der Fall 1 tritt bei Feuchtigkeitsangriff in vorwiegend Tachyhydritreichen Zonen ohne die Mitwirkung bzw. Anwesenheit von Kieserit auf. Als Beispiel für den Mechanismus nach Fall 1 dienen die ausgeprägten Aussinterungen von Bischofit im derzeit nicht zugänglichen Bereich der Tunnelstrecken 3a-Sohle im Grubenfeld Angersdorf.

Weiterhin können im näheren Umfeld des Referenzversuchsortes verschiedene Hohlräumbildungen beobachtet werden bei denen keine Bischofit-Aussinterungen beobachtet werden

können. In diesen Fällen wird ein Abfluss der gelösten Substanz in den Sohlbereich vermutet. Die Ursachen für dieses Verhalten können in veränderten klimatischen Randbedingungen liegen.

Die Aussinterungen im Bereich der Tunnelstrecke auf der 3a-Sohle bestehen zu 95 % aus Bischofit. Zur Bildung des Bischofites aus Tachyhydrit muss geschlussfolgert werden, dass die stabilere Komponente aus  $\text{CaCl}_2$  nach unten in den Streckenbereich abgesetzt hat, während sich das  $\text{MgCl}_2$  in Form von Bischofit auskristallisiert hat.

Die Untersuchungen der Bischofit-Aussinterungen auf der 3a-Sohle in Angersdorf ergaben für den Bereich des Nordstoßes (Beprobung zwischen Streckenmeter 100,5 - 101,5 m) eine auskristallisierte Masse von 18,8 kg Bischofit pro Meter. Am Südstoß (Streckenmeter 107,6 – 108,6 m) betrug die ankristallisierte Masse an Bischofit 16,95 kg pro Meter. Die Umrechnung der Bischofitbildung auf das ursprünglich vorhandene Ausgangsmaterial Tachyhydrit ergab pro Meter Streckenlänge ein Volumen von ca. 40 l zersetzer und ausgeflossener Tachyhydritsubstanz.

Als Ursachen für die sekundären Auskristallisationen von Bischofit in diesem Bereich werden spezifische Wetter- und Temperatureinflüsse diskutiert. Bezuglich der Zersetzungsgeschwindigkeit und –tiefe muss die unter Fall 1 diskutierte Form der Salzgesteinsumsetzung als die aggressivste Form der Verwitterung angesehen werden.

## Fall 2: Zersetzung des Materials unter Bildung eines Rekristallisates

Beim Fall 2 erfolgt die Zersetzung des Tachyhydritischen Materials im Zusammenhang mit der anschließenden Bildung von Rekristallisat in Form von Gips. Analysen des Materials aus dem Bereich der ausgewitterten Bandstrukturen weisen einen hohen Anteil rekristallisierten Gipses auf. Dieser Mechanismus ist an die Anwesenheit von Kieserit gebunden, da sonst keine Gipsbildung möglich ist.

Durch die Bildung und Ablagerung des Rekristallisates werden Stofftransportprozesse im Oberflächenbereich eingeschränkt und behindert. Die Gipskristalle füllen die aufgelockerten Schichtstrukturen aus und verleihen dem Material eine minimale Festigkeit, durch die ein Ausfluss der Substanz verhindert werden kann. Geringmächtige Schichten verbleiben im Gesteinsverband (Fall 2b) während mächtigere Schichten intensiv auswittern können (Fall 2a). Insbesondere bei geringmächtigen Schichten ist es durch den Kontakt mit benachbarten intakten Schichten möglich, die ursprüngliche Form der Struktur beizubehalten. Eine Detektion dieser Schichten ist nur durch detaillierte Stoßaufnahmen und Gesteinsansprachen möglich.

Infolge der durch die Rekristallisatablagerung behinderten Stoffaustauschvorgänge ist letztlich auch von einer Einschränkung der Zersetzungsgeschwindigkeit in Richtung Anstehendes auszugehen, so dass im Vergleich mit der Verwitterung nach Fall 1 von einer geringeren Zersetzungintensität auszugehen ist.

### 2.1.4 Ausbildung einer aufgelockerten und durchfeuchteten Zone im Bereich der Montagekammer

Die Befunde der mineralogischen Untersuchungen deuten bereits darauf hin, dass die Ausbildung der aufgelockerten und durchfeuchteten Zone in starkem Maße von der Verteilung der sensiblen Mineralkomponenten abhängig ist. Die Ausbildung der aufgelockerten Zone (ALZ) um die Streckenauffahrung ist bedingt durch eine Überlagerung geomechanischer und geochemischer Effekte (siehe SEIFERT & LANDSMANN [7] SITZ, FLIß & GRUNER [14]). Beide Mechanismen beeinflussen sich gegenseitig, in jedem Falle begünstigt die mechanisch bedingte Gefügeauflockerung nach Überschreiten der Dilatanzgrenze des anstehenden Materials das Vordringen von Feuchtigkeit in den Gebirgsbereich.

Die durchgeführten geophysikalischen Untersuchungen, welche auf indirekten Verfahren beruhen, die Probenentnahmen und die Beobachtungen im Bereich des Referenzversuchsortes und im näheren Umfeld des Versuchsortes lassen daher hinsichtlich der Tiefenerstreckung der konturnahen aufgelockerten und durchfeuchteten Zone erwartungsgemäß ein stark differenziertes Bild entstehen. In Abbildung 14 ist dazu der Verlauf der 600 Ωm-Isoohme im Bereich des Geoelektrikprofils 4 (K-UTECH) dargestellt. Zwischen Profilmeter 4 und 6 ist hier deutlich die bis in fast 2 m Tiefe reichende Feuchteanomalie sichtbar.

Im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Geophysik und Geologie der Universität Leipzig (Dr. A. Just, cand. geophys. W. Schönfelder) und dem IfG Leipzig wurden in mehreren Messkampagnen drei Profilanordnungen. Insgesamt lagen dabei im Hangenden der Carnallitlagerstätte Teutschenthal für Salzgesteine sehr niedrige spezifische elektrische Widerstände zwischen 5 Ωm und 10.000 Ωm vor. Um die Strecke ergab sich eine Dreiteilung

- mit extrem niedrigen Widerstandswerten im Sohlenbereich mit nachgewiesenermaßen freier Lauge,
- mit einer teufenabhängigen Widerstandsvariation in den Stoßbereichen, die zusätzlich durch die höheren Feuchtigkeitsgehalte der Kieserit-Tachyhydritbänder mit der entsprechenden tiefgründigen Verwitterung modifiziert wurde.
  - Nachweis einer Saumzone (50 – 100 cm Ausdehnung, je nach Widerstandsniveau) im Bereich 100 - 1000 Ωm, ALZ
  - Tiefer als 1 m im Gebirge Widerstandszunahme bis  $10^6$  Ωm, abnehmende Feuchtigkeitsgehalte
  - signifikant reduzierte Widerstände im Bereich der Kieseritbänder, schichtparallele Feuchtigkeitsaufnahme infolge der intensiveren Verwitterung.
- mit höheren Widerstandswerten im Firstbereich in der Größenordnung 500 – 2000 Ωm bis maximal 10.000 Ωm
  - oberflächennahe Widerstände zwischen 500 bis 2000 Ωm je nach Lithologie.
  - Interpretation problematisch aufgrund von Anisotropieeffekten infolge von Sperrsichten (Tonlagen und offene Schichtflächen).

In Ultraschallmessungen zur Charakterisierung der ALZ hinsichtlich Rissbildungen (IfG) wurden Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten zwischen zwei parallel verlaufenden Bohrlöchern („Crosshole-Verfahren“) durchgeführt. Für die Durchschallung wurden parallel angeordnete Bohrungen mit einem Durchmesser von ca. 100 mm in Firste und Sohle genutzt. Die ALZ ist nach der Geschwindigkeitsvariation mit zunehmender Messteufe zweiteilig aufgebaut:

- in unmittelbarer Konturnähe (< 0,3 m) ergibt sich ein drastischer Geschwindigkeitsanstieg, konturnah entspannte und aufgelockerte Zone
- bis etwa 0,6 m ergibt sich ein Übergang bis zu einem nur noch schwach ausgeprägten, quasi linearen Geschwindigkeitsanstieg (Nichtparallelität der Bohrlöcher), begrenzte Reichweite der ALZ.

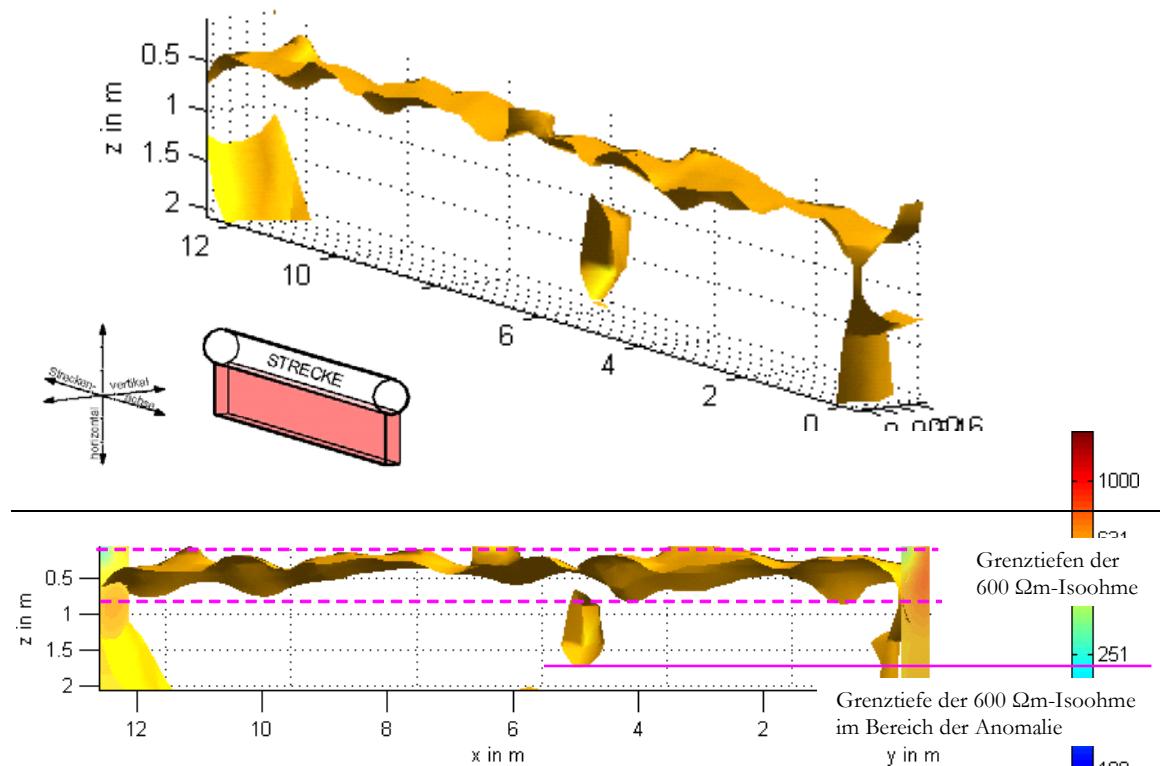
Die Höhe der Ultraschallgeschwindigkeiten wird dabei hauptsächlich durch den Kieseritgehalt bestimmt, wobei Kieserit-haltige Gesteine infolge der höheren Dichte von Kieserit gegenüber den anderen Mineralphasen Carnallit und Tachyhydrit sowie untergeordnet Steinsalz durch höhere seismische Geschwindigkeiten und größere Gesteinsfestigkeiten gekennzeichnet sind.

In den verschiedenen Untersuchungen zur Reichweite der aufgelockerten und durchfeuchteten Zone konnten als Tiefe einer deutlichen aufschlussbedingten Beeinflussung die in Abbildung 15 aufgeführten Bereiche bestimmt werden. Es zeigt sich, dass die Horizonte oberhalb der Spätbank, insbesondere die markanten Kieserit-Tachyhydrit-Bänder (Schichten 4 und 6) mit Tiefen bis 0,6 m eine größere Tiefenerstreckung des durchfeuchteten Bereichs aufweisen als die unterhalb der Spätbank gelegenen Bereiche der

Schicht 12. Die Messergebnisse der Geoelektrik im Bereich der Kieserit-Tachyhydrit-Bänder korrelieren dabei gut mit den Ergebnissen der Ultraschallmessungen.

Die maximalen Tiefenerstreckungen mittels Geoelektrik detekterter durchfeuchteter Bereiche liegen unabhängig von der Lage der Messorte oberhalb bzw. unterhalb der Spätbank bei etwa 1,2 und 2,0 m. Die Lage des Tiefenmaximas im H-Profil SSW-Stoß korreliert dabei mit der Lage einer im Untersuchungsbereich angesprochenen Faltenstruktur. Der im Geoelektrikprofil 4 detektierte Bereich einer erweiterten durchfeuchteten Zone bis in etwa 2,0 m Tiefe ist auf der Stoßoberfläche durch keinerlei Merkmale auffällig. Aufgrund der Ergebnisse des Laugeneinpressversuches BV 2 und der Überwachung durch eine Geoelektrikanordnung kann dieser Bereich als potenzielle Schwächezone charakterisiert werden. Das relative große, bei geringem Druck und in sehr kurzer Zeit verpresste Laugenvolumen unterstützen diesen Rückschluss zusätzlich.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen wird eine deutliche Zonierung der aufgelockerten Zone in die Bereiche Firste, Stöße und Sohle sichtbar, was auf die inhomogene Ausbildung des aufgeschlossenen Gebirgsverbandes zurückgeführt werden kann. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist im Bereich der Stöße eine variable Teufen erstreckung der ALZ entsprechend dem Gehalt an sensiblen Mineralkomponenten bzw. dem Auftreten bestimmter Mineralgefügeausbildungen. Weiterhin können in bestimmten Abständen Strukturen mit einer deutlich erweiterten Erstreckung des durchfeuchteten Bereichs beobachtet werden, die hinsichtlich einer Standortcharakterisierung von Dichtungsbauwerken eine besondere Beachtung finden müssen. Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche der ALZ näher beschrieben.



**Abb. 14:** in der Tiefenlage stark variierender Verlauf der 600  $\Omega\text{m}$ -Isohyme im Bereich des Geoelektrikprofils 4 (K-UTEc) am Nordstoß

## **Firstbereich**

Der Bereich der Firste weist gegenüber den Stoßbereichen deutlich geringere Feuchtegehalte auf. Dieser Umstand wird durch die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen, die sehr geringe Durchlässigkeiten ergaben, belegt. Weiterhin weisen die Lichtschnittaufnahmen auf eine intakte Struktur dieses Bereiches hin. Die Ultraschallgeschwindigkeiten sind im Firstbereich gegenüber den Stößen deutlich erhöht und die Geoelektrikmessungen weisen hier gegenüber den Stoßprofilen höhere Widerstandswerte aus.

Der Firstbereich wird als strukturell intakt, relativ trocken und gering permeabel charakterisiert.

Als Gründe für eine derartige Ausbildung dieses Bereichs werden Sperreffekte der mehr oder weniger horizontal verlaufenden Schichtstrukturen vermutet. Als Feuchtigkeitssperren fungieren hier mutmaßlich tonige Schichten bzw. weniger sensibel auf Feuchtigkeit reagierende Bereiche, wie beispielsweise Steinsalzhorizonte.

In bestimmten Abschnitten können relativ großräumige Ausbruchsstrukturen im Firstbereich beobachtet werden. Diese Ausbildungen werden auf den direkten Aufschluss von sensibleren Schichten zurückgeführt. Im Bereich von Faltungsstrukturen treten diese Ausbildungen in ihrer maximalen Tiefenerstreckung bis etwa 0,25 m auf.

## **Sohlenbereich**

Durch die Geoelektrikmessungen werden hier in einem größeren Bereich sehr geringe Widerstände diagnostiziert. In den Lichtschnittaufnahmen werden im Bereich des Fräsbanketts zudem deutliche Deformationen sichtbar. Für den Sohlenbereich werden daher die im Firstbereich wirkenden Sperreffekte ausgeschlossen, obwohl hier die Orientierungen der Schichtenstrukturen identisch sind. Die Beobachtungen lassen auf einen aufgelockerten und infolge des teilweise durchtränkten Strossenhauwerks intensiv durchfeuchteten Sohlenbereich schließen. Über eine mögliche Tiefenerstreckung dieses Bereichs sind derzeit keine Angaben möglich. Weiterhin ist in diesem Bereich auch durch das Anstehen wenngleich überwiegend gesättigter Lösungen mit petrophysikalischen Gesteinsveränderungen zu rechnen.

Der Sohlenbereich wird als entfestigt und durchfeuchtet charakterisiert. Es wird hier eine stark erhöhte Permeabilität vermutet.

Als Ursachen für diese Erscheinungen werden insbesondere auf die permanente Durchfeuchtung und damit geringere Festigkeiten im Sohlenbereich sowie auf die geomechanisch bedingte Ausbildung des Spannungsfeldes im Nahfeld der Streckenauffahrung verwiesen.

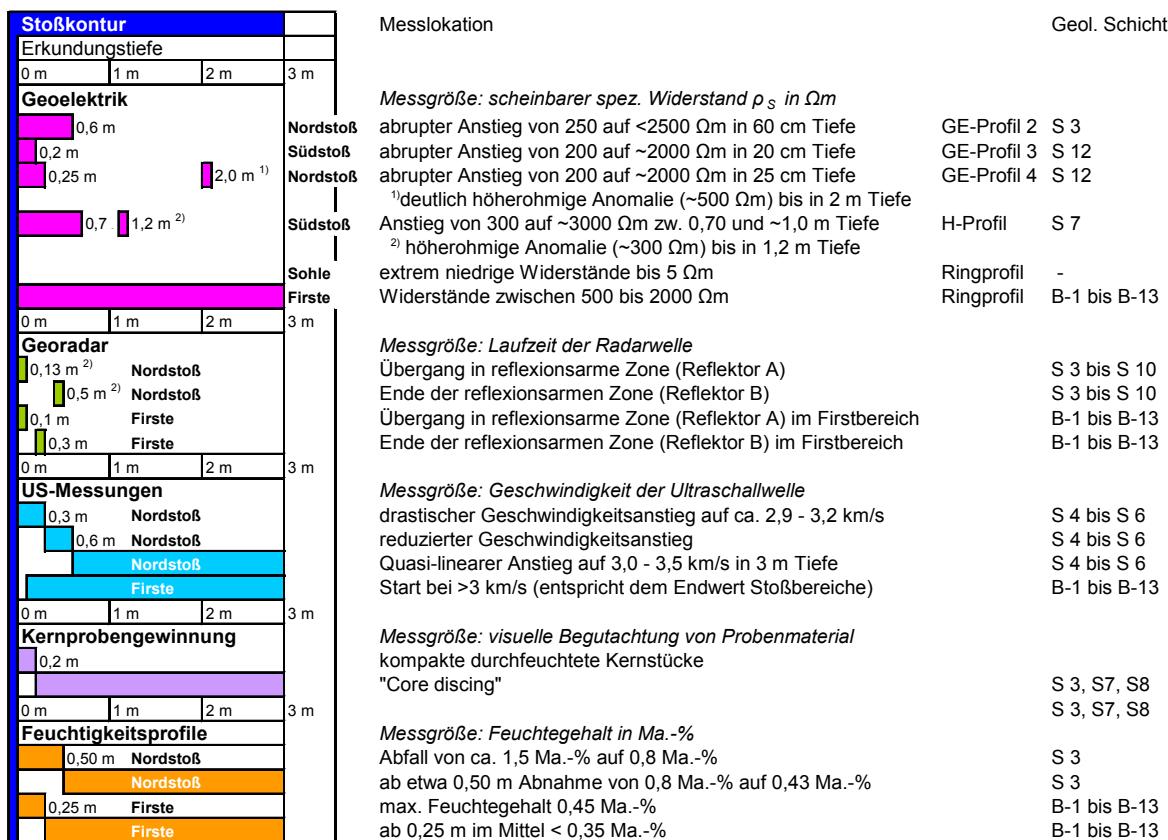
## **Stöße unter normalen Lagerungsverhältnissen**

Für die Stoßbereiche wird aufgrund der beobachteten Anomalien in den Ergebnissen der Geoelektrikmessungen sowie Beobachtungen an verschiedenen Faltenstrukturen im Nahfeld des Versuchortes die Unterscheidung:

- Stöße unter normalen Lagerungsverhältnissen und
- Stöße im Bereich von Falten und Muldenstrukturen getroffen.

Der Stoßbereich unter normalen Lagerungsverhältnissen zeigt gegenüber dem Firstbereich durch den Aufschluss der Schichtstrukturen in Richtung der Schichtung ein deutlich abweichendes Bild. In Abhängigkeit vom Gehalt an sensiblen Mineralkomponenten, der speziellen Mineralgefügeausbildung und der jeweils vorhanden Mächtigkeit der Schicht bildet sich eine durchfeuchtete Zone bis in eine bestimmte Teufe heraus. Diese Teufe variiert

entsprechend der Mineralzusammensetzung bei normal ausgebildeten Lagerungsverhältnissen der Schichten im Untersuchungsbereich zwischen 0,2 und 0,6 m. In den anschließenden tieferen Stoßbereichen liegen die gemessenen Feuchtegehalte noch deutlich über den Werten der Schichten aus dem Firstprofil. Diese Beobachtung legt den Schluss nahe, dass diese Bereiche bereits eine Beeinflussung durch den Streckenaufschluss erfahren haben. Aussagen über eine mögliche Tiefe der beeinflussten Zone im Stoßbereich sind aufgrund der begrenzten Erkundungstiefe der durchgeföhrten Untersuchungen derzeit nicht möglich. Beeinflussungen sind in Form von lösungskinetischen Migrationsvorgängen und Verbandsdeformationen als Folge der Hohlräumauffahrung denkbar. Zu klären ist bei den Betrachtungen zur Durchlässigkeit des Wirtsgesteins und der Ausbreitung der ALZ inwieweit die Beeinflussung in Form der festgestellten Durchfeuchtung eine negative Auswirkung auf die Durchlässigkeit des Materials darstellt. Beobachtungen an Kernproben der Bohrung IfG US 1 und 2 weisen bei sensiblen geologischen Formationen (hier als Tonlinien angesprochen) auf eine Durchfeuchtung bis in 3 m hin, mit besonders deutlichen Feuchtigkeitseffekten zwischen 1,5 und etwa 2,0 m.



**Abb. 15:** Untersuchung der konturnahen aufgelockerten und durchfeuchteten Zone am Versuchsort Montagekammer mittels verschiedener Verfahren und Methoden

Zur Bestimmung des natürlich vorhandenen Feuchtegehaltes des anstehenden Materials ist es erforderlich, unbeeinflusstes Probenmaterial in ausreichender Menge und aus einem repräsentativen Bereich zu analysieren. Aus den vorhandenen Ergebnissen sind Rückschlüsse auf diesen Parameter nur bedingt möglich. Unter der Annahme, dass im Firstbereich relativ unbeeinflusstes Material ansteht, müsste der natürlich vorhandene Feuchtegehalt von Carnallit in dieser Ausbildung etwa im Bereich von 0,35 Ma.-% liegen.

Der konturnahen durchfeuchteten Bereich der ALZ kann prinzipiell in zwei Bereiche unterteilt werden (vergl. auch Abschnitt 3). Ein konturnaher Bereich bis in ca. 20 cm ist gekennzeichnet durch die intensive Auswitterung der markanten Kieserit-Tachyhydrit-

Schichten Unteres und Oberes Band (Schichten 4 und 6). Er kann an Bohrkernen in Form von kompakten deutlich feuchteren Bereichen (Schichten S3 und S7/8) beobachtet werden.

Weiterhin gibt der detektierte Reflektor A der Georadarerkundung Hinweise auf diese Zone. Nach den Ergebnissen der Frac-Messungen umfasst dieser Bereich den nahezu vollständig mechanisch entlasteten Teil der ALZ. Das Eindringen von Feuchtigkeit wird hier durch das vorhandene entfestigte und aufgelockerte Material begünstigt.

Der zweite Bereich umfasst die übrige deutlich durchfeuchte Zone bis in die bereits beschriebenen Tiefen von 0,2 bis 0,6 m mit dem Reflektor B (Georadar) und dem beobachteten Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeiten.

Für den anschließenden Bereich bis in die Erkundungstiefe von 3 m ist aufgrund der Beobachtungen an den Kernmärschen sowie der Ergebnisse der Feuchtigkeitsprofile auch unter normalen geologischen Lagerungsbedingungen eine Materialbeeinflussung infolge des Streckenaufschlusses sehr wahrscheinlich.

### **Stöße im Bereich von Falten und Muldenstrukturen**

Neben der mineralgehaltsabhängigen Tiefenvariation des durchfeuchten Bereiches entsprechend der geologischen Schichtung bei normalen Lagerungsverhältnissen existieren deutliche Hinweise auf eine Variation der Tiefenerstreckung auch innerhalb der geologischen Horizonte. Entsprechende Bereiche wurden durch Messungen im Geoelektrikprofil 4 am Nordstoß (vergleiche Abb.14) und dem Horizontalprofil am SSW-Stoß detektiert. Weitere Belege für diese Strukturen sind die beobachteten Hohlraumstrukturen im Bereich der Faltungen, die ebenfalls auf eine Erweiterung der durchfeuchten Zone schließen lassen.

Durch diese Beobachtungen können unterschiedliche Trends in Messergebnissen zur Permeabilitätsbestimmung gedeutet werden, die ebenfalls auf eine Variation der Verhältnisse innerhalb bestimmter geologischer Formationen schließen lassen.

Als Ursachen für die Ausbildung dieser Strukturen kommen zum einen die Anreicherung von sensiblen und mobilen Mineralkomponenten (Kieserit, Tachyhydrit) im Bereich von Falten- und Muldenstrukturen und zum anderen eine mögliche Gefügeauflockerung- bzw. Gefügestörung in diesen Bereichen in Frage. Die mittels Geoelektrik detektierten erhöhten Feuchtegehalte dieser Strukturen könnten auf Reliktaugen syngenetischer Natur bzw. eine Feuchtebeeinflussung durch den Streckenaufschluss zurückgeführt werden.

Die am Versuchsort beobachteten Auswitterungen belegen die Variante der Beeinflussung als Folge des Aufschlusses. Ein geogen beeinflusster höherer Feuchtegehalt kann für diese Strukturen aber nicht völlig ausgeschlossen werden.

Eine bevorzugte Ausrichtung und Erstreckung der Strukturen geht aus den Beobachtungen und Untersuchungen nicht eindeutig hervor. Die Strukturelemente stellen im Hinblick auf die Errichtung von Dammbauwerken in jedem Fall bevorzugte Fließwege dar, was durch die Versuchsergebnisse des Injektionsversuches BV 2 (siehe Abschnitt 5.3.2) deutlich untermauert wird.

## 2.2 Untersuchungen zum geomechanischen Verhalten carnallitischer Gesteine

Im April 2004 wurden in der Maschinenstrecke der 3a-Sohle etwa bei Profilmeter 33 eine Hochbohrung (F-TTL-4) und eine Horizontalbohrung (F-TTL-3) in den Nordstoß niedergebracht. Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung des herrschenden Einspannungszustandes im Bereich des Messortes in der 1963 aufgefahrenen Maschinenstrecke mittels Hydrofrac-Messungen. Das Prinzip der Frac-Methode bzw. des hydraulischen Aufreißen besteht in der künstlichen Risszeugung im Gebirge in der Umgebung eines abgepackten Bohrlochabschnittes und der Ermittlung des Druckgleichgewichtes zwischen Innendruck (Riss) und der senkrecht zur Rissfläche wirkenden Gebirgsdruckkomponente.

Während die Horizontalbohrung, wie geplant, 15 m Teufe erreichte, wurde die Firstbohrung aufgrund bohrtechnischer Schwierigkeiten (zu hohe Bohrlochkonvergenzen) bei etwa 6 m abgebrochen.

Die in den Bohrungen F-TTL-3 und F-TTL-4 ermittelten Verläufe der minimalen Hauptspannung sind in Abbildung 16 graphisch dargestellt. Dabei wird deutlich, dass das Spannungsfeld nahezu rotationssymmetrisch bezüglich der Achse der Maschinenstrecke ausbildet ist. Die Horizontalspannungen liegen zwar etwa 10 – 20 % über den Vertikalspannungen, zeigen aber einen ähnlichen Verlauf. In beiden Bohrungen wird in einer Stoßtiefe von etwa 3 m eine Einspannung in Höhe des rechnerischen Teufendruckes von 18,25 MPa ermittelt. Die entspannte Zone hat sich aufgrund der nahezu idealen Spannungsgeometrie um die kreisförmige Maschinenstrecke nicht weit in das Gebirge hinein entwickelt. Zwischen 3 m und 6 m Stoßtiefe wird in durch die Horizontalmessung eine schwach ausgebildete Hochdruckzone abgebildet, die sich infolge der Streckenauffahrung sowie der Überzugswirkung des benachbarten Kammer-Pfeiler-Systems gebildet hat. In ihrem Maximum überschreitet die gemessene Druckeinspannung den lithostatischen Teufendruck um ca. 10 %. Dem schließt sich der von Hohlräumen weitestgehend unbeeinflusste Gebirgsbereich an.

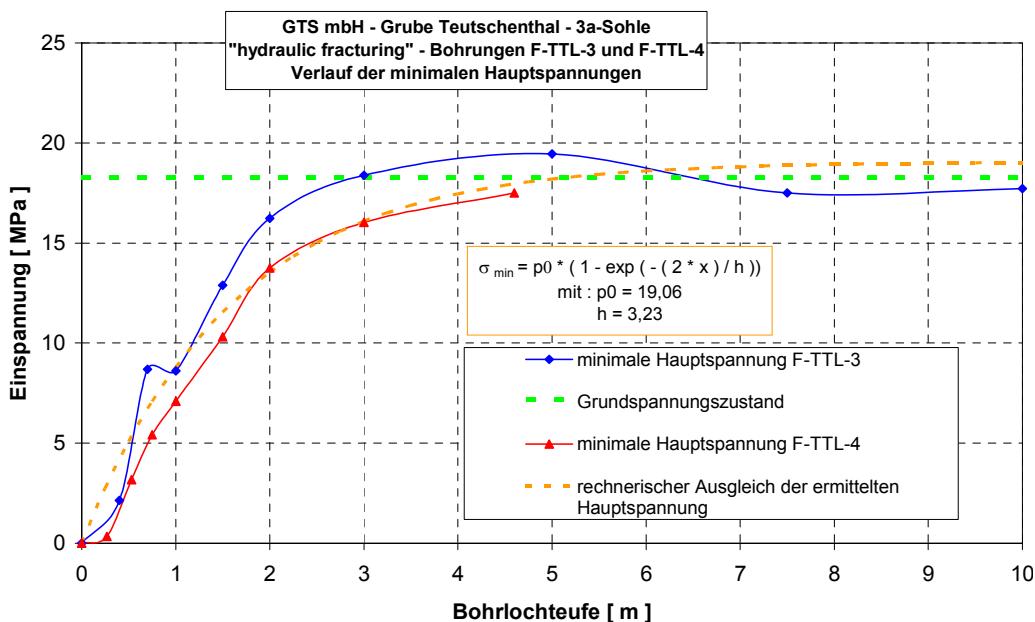


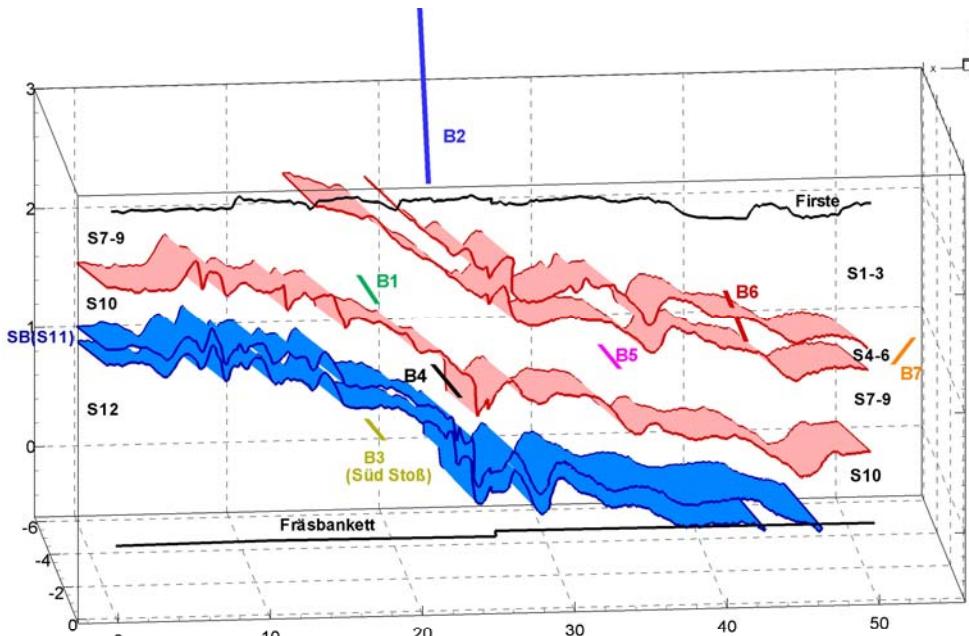
Abb. 16: Verlauf der minimalen Hauptspannung über die Bohrlochteufe in der Horizontalbohrung F-TTL-3 und der Firstbohrung F-TTL-4

Auffällig ist, dass die minimale Hauptspannung auf dem ersten halben Meter deutlich unterhalb der Ausgleichskurve liegt, und es danach in der Horizontalbohrung (F-TTL-3) zu einem Spannungsüberschwinger über die mittlere Ausgleichskurve kommt. Dieses Verhalten ist reproduzierbar und weist somit auf eine signifikant entspannte Zone von ungefähr 0,4 m Ausdehnung hin. Sie entspricht den Beobachtungen, dass unmittelbar an der Kontur bei Kernbohrungen ein kompakter Kern von bis zu 30 cm Länge erbohrt werden kann, während danach unmittelbar „Core-discing“ infolge einer erhöhten Einspannung des Gebirges einsetzt.

## 2.3 Permeabilitätsuntersuchungen

Zur Charakterisierung der Permeabilitätssituation am Versuchsstandort Montagekammer auf der 3a-Sohle der Grube Teutschenthal wurden durch IBeWa - Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser- und Deponietechnik Wilsnack & Partner Freiberg in 7 Bohrungen in unterschiedlichen Abständen zur Kontur die Gaspermeabilitäten gemessen (Abb. 17). Die Testbohrungen wurden im Trockenbohrverfahren hergestellt. Für die Bohrungen 1 und 2 erfolgte keine zusätzliche Trocknung der als Bohrfluid verwendeten Luft. Daher ist ein Eintrag von Feuchtigkeit mit dem Spülstrom (Gas) nicht auszuschließen. Für die Herstellung der Bohrungen 3 bis 7 kam eine zusätzliche Trocknungsanlage zum Einsatz, die eine hinreichende Trocknung des Gasstroms gewährleistete.

Die *in situ*-Gaspermeabilitätsuntersuchungen erfolgten nach dem instationären Mehrkammerversuchskonzept. Um die Permeabilität des Gesteins zu ermitteln, wird das Testintervall mit einem Anfangsdruck beaufschlagt und in allen durch Packer isolierten Abschnitten der Druckabfall über die Messdauer erfasst. Die Versuchsdaten werden kontinuierlich, über den gesamten Versuchsverlauf aufgezeichnet, wobei die Mess- und Erfassungsfrequenz dem Druckverlauf so angepasst ist, dass Bereiche großer Veränderungen genau dokumentiert werden (Messtakt minimal 0,1 s). Die zeitliche Entwicklung des Druckes, die Stoffdaten des verwendeten Fluides und die Versuchskonfiguration bilden die Grundlage der Bestimmung der Gesteinspermeabilität über die Lösung der Umkehraufgabe der rotations-symmetrischen, zweidimensionalen Strömung und die Parameteridentifikation.



**Abb. 17:** Schematische räumliche Darstellung der Lage der Bohrungen entlang des Streckenverlaufes der 3A-Sohle (geologische Schichtung am Stoß entsprechend geol. Ansprache K-UTECH und Modellannahme eines gleichförmigen Einfalls des Schichten mit 4° und einer konstanten Schichtmächtigkeit)

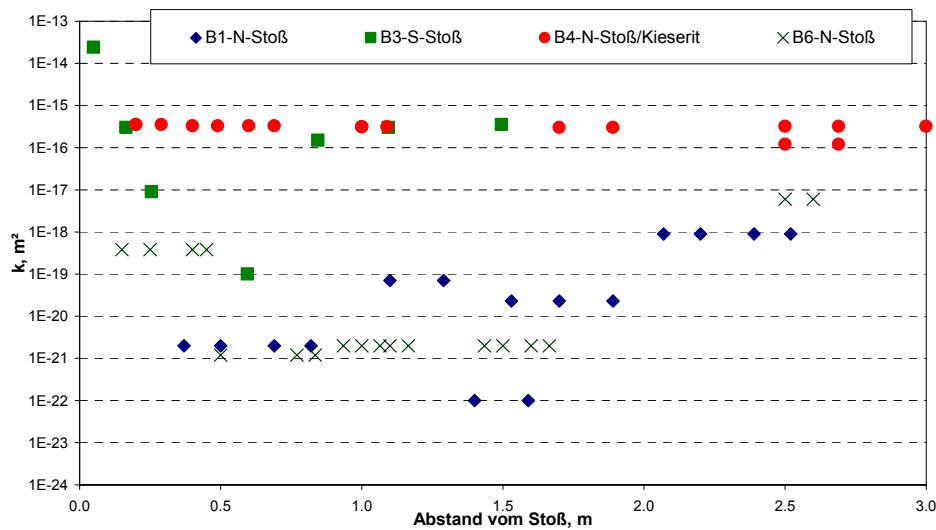


Abb. 18: Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom Abstand vom Stoß für die Bohrungen 1, 3, 4 und 6

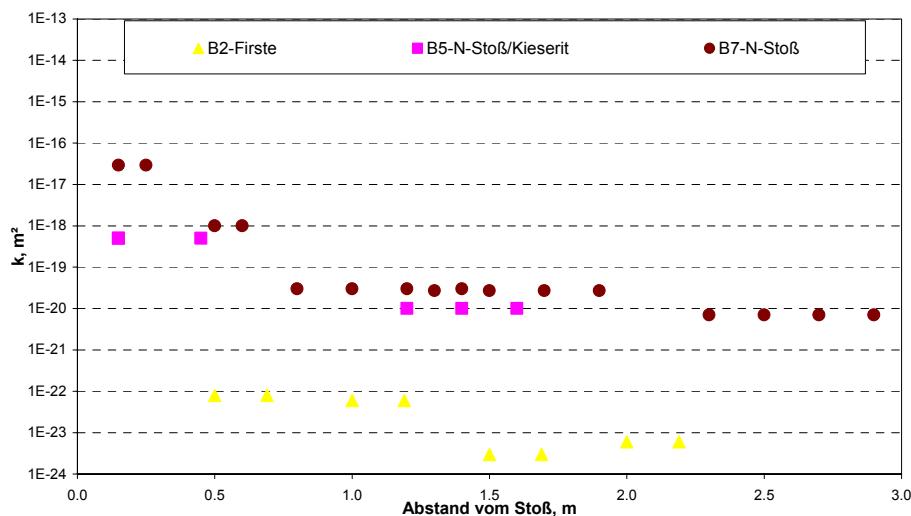


Abb. 19: Gaspermeabilität in Abhängigkeit vom Abstand vom Stoß für die Bohrungen 2, 5 und 7

In Auswertung der bisherigen in situ-Gaspermeabilitätsmessungen können für den untersuchten Standort folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Ein Eintrag von Feuchtigkeit durch das verwendete Bohrfluid Druckluft kann ab Bohrung 3 weitgehend ausgeschlossen werden.
- Die ermittelten Permeabilitäten werden wesentlich durch die inhomogene geologische Situation bestimmt.
- Eine Verringerung der Permeabilität mit zunehmendem Abstand vom Stoß, wie sie für Steinsalzgebirge bekannt ist, wurde für den untersuchten Standort nur in den Bohrungen 2, 5 und 7 (Abb. 19) nachgewiesen. In den Bohrungen 1, 3, 4 und 6 wurde eine Erhöhung der Gaspermeabilität in tieferen Bereichen der Bohrungen beobachtet (Abb. 18), die auf Veränderungen der durchteuften Geologie zurückgeführt werden.
- Im nicht verwitterten Bereich besitzt das Carnallititgebirge eine maximale Gaspermeabilität von  $3,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  (B3, S-Stoß; 1,5 m vom Stoß).

- Im verwitterten, stoßnahen Bereich wurden hohe Gaspermeabilitäten (max.  $2,4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  (B3, S-Stoß; 0,1 m vom Stoß) nachgewiesen.
- Das Permeabilitätsverhalten wird stark durch die lithologische Zusammensetzung und die stratigraphische Schichtung bestimmt, wobei eine Zuordnung von Permeabilitätswerten zu einzelnen lithologischen Horizonten aus den Messergebnissen bisher nicht in jeder Bohrung sicher möglich ist. Für eine Zuordnung ist eine genaue Aufnahme der geologischen Feinstratigraphie im Bereich der Bohrungsanztpunkte und im Bereich der Messpunkte in den Bohrungen (wenn möglich aus Kamerabefahrung) sowie eine mineralogische Ansprache der Bohrkerne (wenn vorhanden) erforderlich.
- Aus den durchgeföhrten Gaspermeabilitätsuntersuchungen kann keine Einschätzung zum Permeabilitätsverhalten des Carnallititgebirges gegenüber angreifenden Salzaugen abgeleitet werden.

## 2.4 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum Arbeitspaket 2

Mit dem im Rahmen von Arbeitspaket 2 des FuE-Vorhabens erarbeiteten Kenntnisstand ist es prinzipiell möglich, eine Standortauswahl und Standortcharakterisierung für ein Dichtungssystem im leichtlöslichen Salzgestein insbesondere bei hohen Tachyhydrit- und Kieserithalten hinsichtlich folgender Punkte durchzuführen:

- Detektion von potenziellen Schwächezonen,
- Bestimmung der Reichweite der stoßnahen durchfeuchteten Zone,
- spezielle Abstimmung von Baustoffsystemen für Dichtungselemente und Schutzelemente zur Vermeidung von Löseerscheinungen im Wirtsgestein.

Aus den Untersuchungsergebnissen können zusammengefasst die folgenden grundlegenden Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Als potenzielle Schwachstellen, welche bei einer Fluidbeaufschlagung eines Dichtungssystems in Strecken auf dem Niveau der 3a-Sohle zu erheblichen Umläufigkeiten führen können gelten die bereits unter dem Einfluss der Wetterfeuchte stark auswitternden Bereiche der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen. Die verwitterungsanfälligen Schichtstrukturen können neben visuellen Beobachtungen und Auflöseversuchen nach gegenwärtigem Kenntnisstand Anhand eines erhöhten Anteils an unlöslichen Bestandteilen über Mineralanalysen detektiert werden.
- Die Ausbildung der aufgelockerten und durchfeuchteten Zone in den Stoßbereichen ist in starkem Maße von der Verteilung der sensiblen Mineralkomponenten abhängig. Die Stoßbereiche sind mutmaßlich über die Erkundungstiefe von maximal 3 m hinausreichend durch die Streckenauffahrung beeinflusst. Sie weisen im Bereich der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen eine deutlich durchfeuchtete Zone bis etwa 0,6 m Tiefe auf.
- Weitere Schwächezonen werden in den in Muldenlagen bzw. Faltungszonen beobachteten tiefer reichenden durchfeuchteten Zonen gesehen, die auf Anreicherungen sensibler Minerale bzw. Gefügeauflockerungen zurückgeführt werden. Diese Bereiche werden durch die Strecken nicht in jedem Fall aufgeschlossen. Sie können je nach Orientierung und Ausdehnung die Wirksamkeit von Querschnittsabdichtungen wesentlich beeinflussen. Weiterhin sind in diesen Bereichen stärkere Wechselwirkungen und Beeinflussungen zwischen Baustoff und Wirtsgestein zu erwarten. Aus diesem Grunde ist eine detaillierte Stoßaufnahme im Bereich von Dichtungselementen in Verbindung mit geoelektrischen Erkundungsmaßnahmen erforderlich, um diese Strukturen bei der Standortauswahl ausschließen zu können. Gegebenenfalls wird eine Standortkorrektur des Elementes notwendig.

- Hinsichtlich der an den mit lichtlöslichen Mineralkomponenten angereicherten Gebirgsbereichen auftretenden Verwitterungsmechanismen lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Varianten unterscheiden:
  - Fall 1: Bildung kavernöser Strukturen durch Ausfluss der Substanz in Form von Lösungen in vorwiegend Tachyhydritreichen Zonen
  - Fall 2: Zersetzung des Materials unter Bildung eines Rekristallisates in Tachyhydritreichen Zonen in Anwesenheit von Kieserit
- Die durchgeführten Fracmessungen zur Ermittlung der Minimalspannungsverteilung in Firste und Nordstoß belegen eine nahezu rotationssymmetrische Spannungsverteilung im Umfeld der Maschinenstrecke mit einer nur geringen Überzugswirkung aus dem benachbarten Kammer-Pfeiler-System. Die Spannungsmessungen in unmittelbarer Nähe der Kontur ( $< 0,40$  m) deuten auf eine entspannte Zone hin, die qualitativ mit der Länge der kompakt erbohrten Bohrkerne übereinstimmt. Darüber hinaus steigt die Minimalspannung deutlich an, bis bei ca. 3 m nahezu der Grundspannungszustand erreicht ist.
- Im nicht verwitterten Bereich besitzt das Carnallititgebirge eine maximale Gaspermeabilität von  $3,5 \cdot 10^{-16}$  m<sup>2</sup>. Im verwitterten, stoßnahen Bereich wurden hohe Gaspermeabilitäten bis max.  $2,4 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup> nachgewiesen. Das Permeabilitätsverhalten wird dabei stark durch die lithologische Zusammensetzung und die stratigraphische Schichtung bestimmt. Aus den durchgeführten Gaspermeabilitätsuntersuchungen kann keine Einschätzung zum Permeabilitätsverhalten des Carnallititgebirges gegenüber angreifenden Salzlaugen abgeleitet werden.

Im Hinblick auf Anforderungen an Dammbauwerke und Dichtungskomponenten sowie Versuchsplanungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Für den Einbau von Dichtungskomponenten ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand der Einsatz eines Stoßbeschichtungsmediums unabdingbar. Dabei müssen die einzusetzenden Komponenten auf dieses Medium abgestimmt werden. Die Standzeit der getesteten Stoßbeschichtung mit fast 2 Monaten ist für eine technologische Realisierung von Baumaßnahmen ausreichend. Die Wirksamkeit des Anstrichelements sollte allerdings durch geeignete in situ-Probeentnahmen überwacht werden.
- Generell dürfen alle einzusetzenden Baustoffe bestimmte Wärmeabgabemengen nicht überschreiten, um die Freisetzung von Kristallwasser im Kontaktbereich zwischen Dammelement und Gebirgsverband zu vermeiden. Als Grenzwert sollte nach gegenwärtigem Kenntnisstand eine Temperatur von 80 °C nicht überschritten werden.
- Die Untersuchungen zur Stoßsensibilität ergaben für das verwendete Beschichtungsmedium eine Standzeit von mindestens 57 Tagen. Ein Feuchtegehalt von 0,5 Ma.-% im beschichteten Stoß wurde während dieser Zeit nicht überschritten.
- Die Durchführung von Laugeninjektionsversuchen sollte durch 3D-Geoelektrik-Messanordnungen begleitet werden, um sensible Bereiche, in denen ein erhöhter Feuchtegehalt vorhanden ist, vor den Messungen zu detektieren, da eine detaillierte Kenntnis der vor Ort-Verhältnisse für fundierte Aussagen und Rückschlüsse aus dieser Versuchsart unabdingbar sind. Die Eignung der durch K-UTEC eingesetzten 3D-Geoelektrikanordnung zur Erkundung und Überwachung von Versuchsanordnungen konnte am Beispiel des Bentonitversuchs 2 bewiesen werden. Die Interpretationsmöglichkeiten für Messergebnisse aus den Versuchen werden auf diese Weise erheblich erweitert bzw. unter Umständen erst ermöglicht.

### **3 Charakterisierung und Modellierung der ALZ als Werkzeug zur Bemessung des Verschlusses\***

Die Nachweisführung zur geomechanischen Standsicherheit und geohydraulischen Gebrauchsfähigkeit von Abschlussbauwerken erfordert die Entwicklung geeigneter Modellansätze zur Beschreibung der gekoppelten geomechanischen/hydraulischen Eigenschaften der standortspezifischen Wirtsgesteinsformationen vor allem hinsichtlich der Nahfeldeigenschaften mit Ausbildung einer Auflockerungszone und der zeitlichen Wechselwirkung mit dem Bauwerk.

Innerhalb dieses Arbeitspaketes werden unter Nutzung des von MINKLEY [15] entwickelten Stoffgesetzes zur Beschreibung des Entfestigungs- und Dilatanzverhaltens von Salzgesteinen, insbesondere von Camallitit, mit dem Programmsystem FLAC Voruntersuchungen zur Dimensionierung eines Bauwerkes durchgeführt. Diese basieren auf den Parametern aus den Laboruntersuchungen von Carnallitit des spezifischen Dammbaustandortes. Dabei werden Spannungs- und Verformungszustände im Bauwerk und im Gebirge bei verschiedenen Belastungsfällen untersucht. Voraussetzung für eine Validierung dieser Modellrechnungen ist, dass die Nahfeldeigenschaften des Gebirges hinsichtlich der Ausbildung einer Auflockerungszone verstanden und auch hinreichend dokumentiert sind.

Entsprechend dieser Zielsetzung erfolgte die Bearbeitung in den folgenden Arbeitsschritten:

- Zusammenfassung des Kenntnisstandes zur geomechanischen Charakterisierung der ALZ (basierend auf den Ergebnissen von AP2),
- Gewinnung standortspezifischer gebirgsmechanischer Parameter anhand von Laboruntersuchungen mittels dreiaxialer Festigkeitsuntersuchungen und Scherexperimenten,
- Anpassung der Stoffmodelle und -parameter an die Aufgabenstellung und
- rechentechnische Untersuchungen zu einem hypothetischen Dammbauwerk aus MgO-Beton, das gleichzeitig als lastabtragendes und dichtendes Element dient.

Die abschließend durchgeföhrten Untersuchungen zeigen beispielhaft die Vorgehensweise zur rechentechnischen Prognose und Bewertung des Trag- und Dichtverhaltens eines möglichen Verschlussbauwerkes auf MgO-Betonbasis unter den Rahmenbedingungen, wie sie am Untersuchungsort auf der 3a-Sohle der Grube Teutschenthal ermittelt wurden.

#### **3.1 Zusammenfassung des Kenntnisstandes zur ALZ und zum Spannungsfeld um die Maschinenstrecke auf der 3a-Sohle**

Die von IfG und K-UTEC durchgeföhrten geotechnischen und geophysikalischen Messungen zeichnen in Übereinstimmung mit den Permeabilitätsuntersuchungen von IBEWA ein umfassendes und konsistentes Bild der Auflockerungszone sowie der vertikal lithologisch sehr variablen Schichtenabfolge des Carnallitits der 3a-Sohle. Dabei resultiert die Ausbildung der ALZ in der Maschinenstrecke der 3a-Sohle primär aus dem wirkenden Spannungsfeld und den Festigkeitseigenschaften des Gebirges. In Wechselwirkung mit den Grubenwettern (vgl. Abschnitt 2) kommt es zu einer sekundären Beeinflussung des Gebirges, wobei durch die Auswitterung der darin enthaltenen extrem leichtlöslichen Minerale Tachyhydrit und Carnallit in Konturnähe zusätzliche Hohlräume geschaffen werden.

---

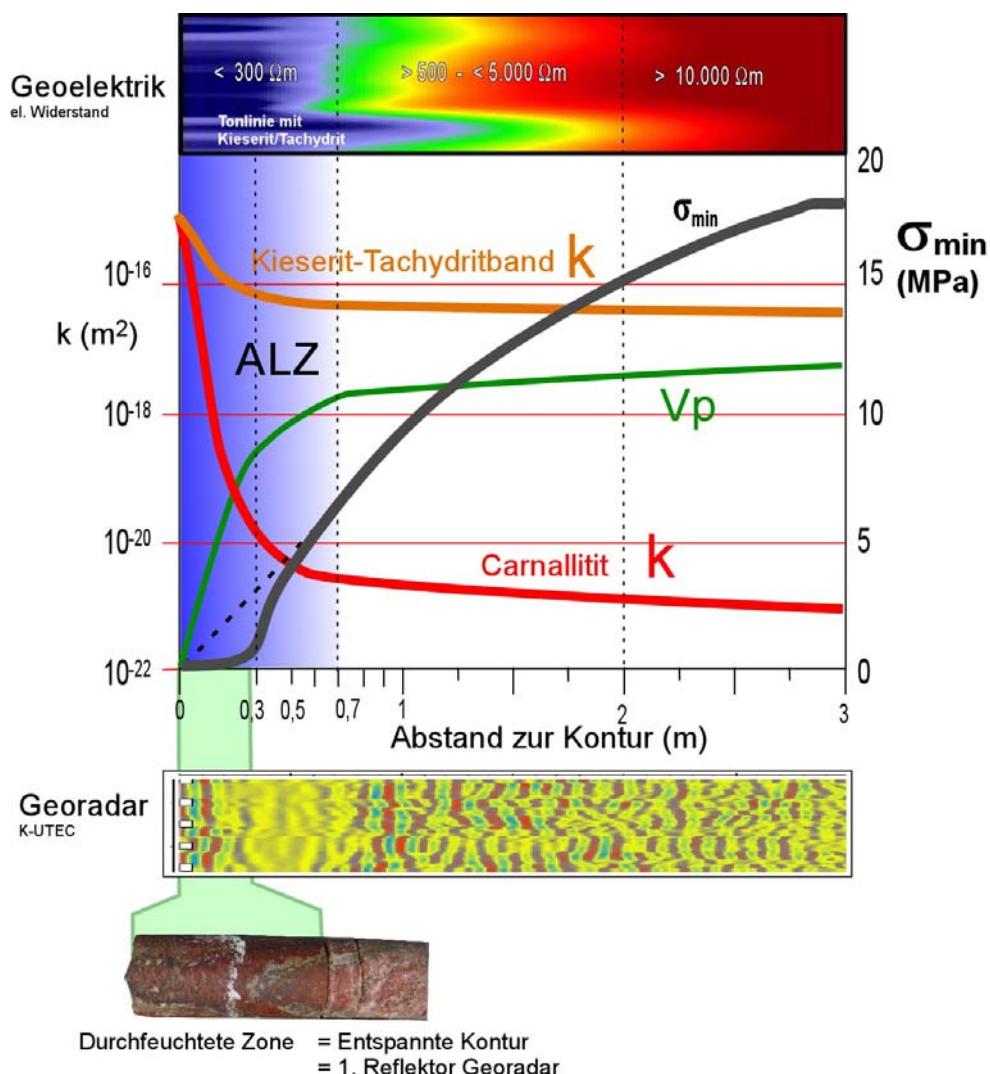
\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 3:

Salzer, K.; Popp, T.; Weise, D.: Charakterisierung und Modellierung der ALZ als Werkzeug zur Bemessung des Verschlusses. IfG Leipzig, September 2004.

### 3.1.1 Ausdehnung der ALZ

In Abb. 20 sind die Ergebnisse zur Ausbildung der ALZ der verschiedenen Arbeitsgruppen und unterschiedlichen Verfahren bzw. Indikatoren schematisch als Parametervariation mit zunehmendem Abstand zur Kontur dargestellt.

Die Bestimmung der Ausdehnung der ALZ ergibt sich jeweils aus der teufenabhängigen Variation des gemessenen Parameters. Nach Auswertung der verschiedenen Messverfahren liegt der Übergang von der rissbehafteten und durchfeuchteten ALZ zum weitgehend rissfreien Gebirge bei etwa 0,7 m. Entlang der Strecke ergeben sich nach Ausweis der linienhaft entlang der Strecke ausgeführten Geoelektrik- und Georadarmessungen nur geringe auf lithologische Effekte zurückführbare Variationen im dm-Bereich.

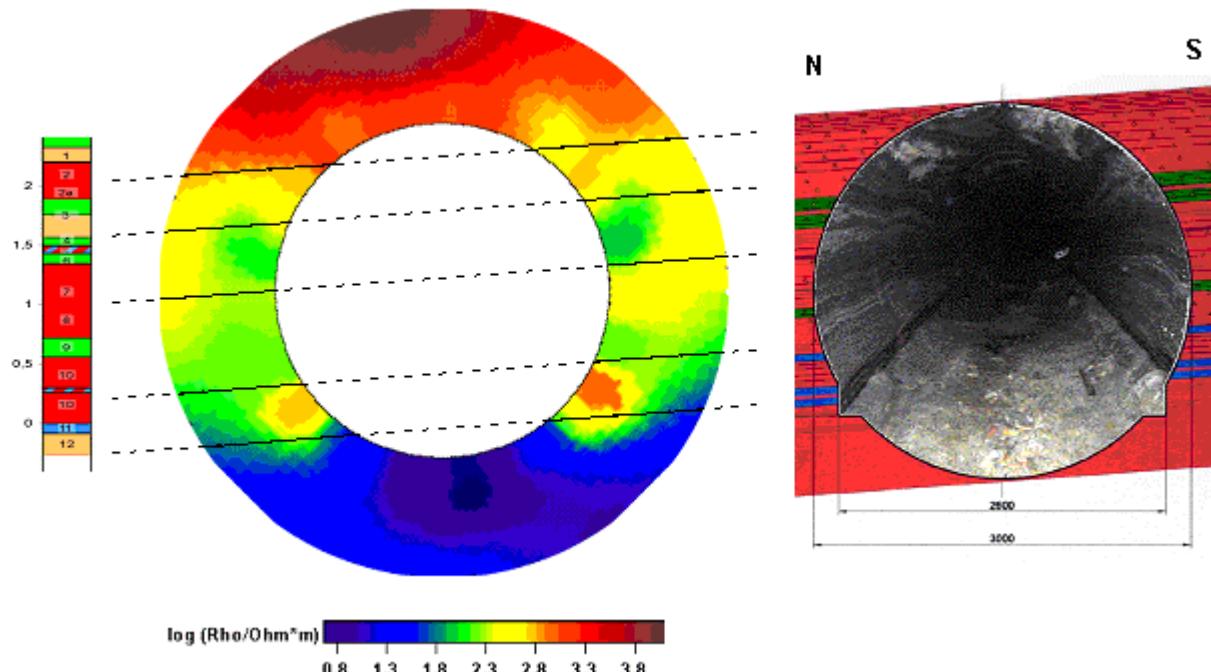


**Abb. 20:** Synthese zur Bestimmung der Ausdehnung der ALZ im Stoß anhand der teufenabhängigen Variation verschiedener Messverfahren und in situ-Beobachtungen

Je nach Auflösung des Verfahrens wird eine Zweiteilung der ALZ beobachtet, mit einer relativ kompakten, stark durchfeuchteten und entspannten Saumzone bis etwa 0,3 m, die als Schale die Streckenkontur bildet und an die sich eine geringer durchfeuchtete Zone anschließt, bis sich bei etwa 0,7 m ein Übergang zum unverwitterten Gebirge ergibt.

Die durchgeführten Fracmessungen zur Ermittlung der Minimalspannungsverteilung in Firste und Nordstoß belegen eine nahezu rotationssymmetrische Spannungsverteilung im Umfeld der Maschinenstrecke mit einer geringen Überzugswirkung aus dem benachbarten Kammer-Pfeiler-System. Die Spannungsmessungen in unmittelbarer Nähe der Kontur ( $< 0,30$  m) deuten auf eine entspannte Zone hin, die mit der Länge der kompakt erbohrten Bohrkerne aus Stoss und Firste übereinstimmt. Darüber hinaus steigt die Minimalspannung zunächst überproportional, danach progressiv schwächer an, bis bei ca. 3 m nahezu der lithostatische Teufendruck mit ca. 18,3 MPa erreicht ist. Entsprechend setzt mit zunehmender Gebirgsspannung „core-discing“ ein.

Entsprechend des Schichteinfallens werden durch die horizontal verlaufende Maschinenstrecke lokal jeweils stratigraphisch unterschiedliche Gebirgsseinheiten aufgeschlossen. Infolge der vorliegenden Schichtung mit Anisotropieeffekten hinsichtlich des Verwitterungsverhaltens, insbesondere infolge des Auftretens von Tonlagen, sind die Eigenschaften der Konturbereiche in Firste und Stoss bezüglich der Verwitterung unterschiedlich. Gleichzeitig können aufgrund kleintektonischer Diskontinuitäten mit Faltenbildung auch in horizontaler Erstreckung lokale Feuchteanomalien auftreten, die aber nach dem bisherigen Untersuchungsstand im m-Bereich lokal begrenzt sind.



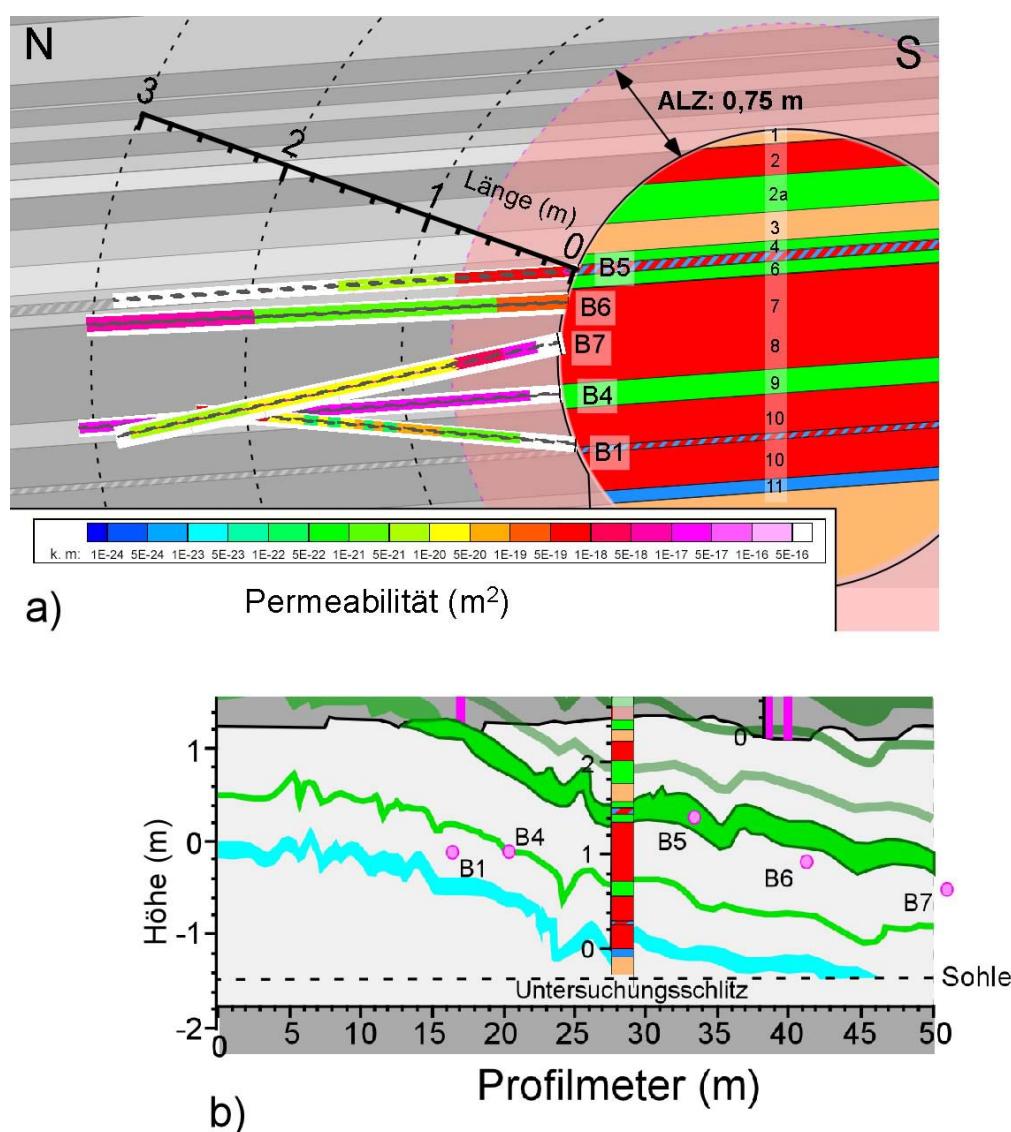
**Abb. 21:** Geoelektrisches Ringprofil bei Profilmeter 34,5 m (Quelle: Geophysik, Uni Leipzig). (li.) Widerstandsverteilung im Ringraum (bis 1m) im Vergleich zur geolog. Profilaufnahme; (re.) Blick in die Strecke mit dem vorläufigen geologischen Profil (nach Landsmann, K-UTEC)

Der dreidimensionale vertikale Schichtenaufbau des Gebirges mit einer schichtspezifischen und richtungsabhängigen Verwitterung konnte über die Vermessung eines geoelektrischen Ringprofils (siehe Abb. 21) mit Nachweis entsprechender schichtspezifischer Widerstandseffekte bestätigt werden. Die höchsten spez. Widerstände mit bis zu 10.000  $\Omega\text{m}$  werden in der Firste gemessen, während in den Stößen das Widerstandsniveau zwischen 100 und 1000  $\Omega\text{m}$  deutlich niedriger liegt, was auf eine relativ hohe Durchfeuchtung hindeutet. Gleichzeitig ist der Widerstand im Bereich des Kieserit-Tachyhydrit-Doppelbandes (Schichten 4 – 6) signifikant erhöht, was aus der schichtparallelen Feuchtigkeitsaufnahme mit zusätzlichem Verwitterungseffekt resultiert.

### 3.1.2 Charakterisierung potentieller Wegsamkeiten

Grundprinzip eines möglichen Generalisierungsansatzes ist das Vorliegen einer vertikal heterogenen Lagerstätte mit diskreten lithologisch verschiedenen Schichten oder Schichtpaketen, die schichtparallel unterschiedliche Durchlässigkeiten aufweisen können. Dies führt dazu, dass sich mit zunehmender Tiefe die Durchlässigkeitseigenschaften des vergleichsweise kompakten carnallitischen Gebirges von geschichteten Bereichen mit signifikanten Toneinlagerungen oder einzelnen prominenten Kieserit-Tachyhydritbändern unterscheiden können.

In Abb. 22 sind die entlang der Strecke verteilten Permeabilitätsbohrungen anhand ihrer geologischen Umgebung in ein vertikales Messprofil, in diesem Fall den Vertikalschlitz bei Profilmeter 28, projiziert worden, so dass sie entsprechend ihrer Lage zur vorliegenden Schichtenabfolge, hier vom Hangenden zum Liegenden, diskutiert werden können.



**Abb. 22:** Interpretation der Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen von IBEWA in verschiedenen Bohrungen in der Untersuchungsstrecke

- Projektion der Permeabilitätsbohrungen B1, B4, B5, und B6 in einen geologischen Vertikalschnitt (Untersuchungsschlitz in N-S-Richtung, mit einem mittleren Einfalten von 4°). Der Permeabilitätswert wird teufenabhängig über die Farbsignatur dargestellt.
- Lage der Permeabilitätsbohrungen entlang der Strecke.

Bemerkenswert ist, dass abweichend von den Erfahrungen im Steinsalz mit zunehmender Messteufe in verschiedenen Bohrlöchern kein genereller Trend einer Abnahme der Permeabilität zu beobachten ist, sondern dass in einigen Bohrungen im Trend die Permeabilität auf einem hohen Niveau erhalten bleibt oder nach einer anfänglichen Abnahme sogar wieder ansteigt.

Im weitständig gebänderten oder kompakteren Carnallitit wird das „normale“ Verhalten einer Permeabilitätsabnahme von  $10^{-16} \text{ m}^2$  zu  $10^{-20} \text{ m}^2$  mit Überschreiten der ALZ beobachtet, wobei generell die Ausbildung einer Auflockerungszone bis ca. 0,7 m Teufe nachgewiesen wird (vgl. Abb. 3-3: diskrete Abschnitte in den Bohrungen B3, B5, B6 und B7, sowie die Firstbohrung B2, die aber separat diskutiert wird).

In geschichteten Bereichen mit signifikanten Toneinlagerungen oder einzelnen prominenten Kieserit-Tachyhydritbändern wird dagegen eine teufenunabhängige vergleichsweise hohe Permeabilität im Niveau  $10^{-16} – 10^{-17} \text{ m}^2$  beobachtet (vgl. Abb. 22 - B4, sowie tiefer liegende Bereiche B1, B3 und B6). Dieser Effekt ist offenbar für zwei Zonen bzw. Schichtbereiche des untersuchten Schichtprofils charakteristisch:

- Kieserit-Tachyhydrit-Doppelband (Schichten 4 – 6): Bohrungen B5 und B6
- Wechsel von gebändertem zu engständig gebändertem Carnallitit (Schichten 8– 10): Bohrungen B1 und B4

In der Bewertung dieser auszugsweise dargestellten Permeabilitätsergebnisse wird deutlich, dass die Messungen in verschiedenen Bohrlöchern hinsichtlich ihrer geologischen Randbedingungen sehr genau betrachtet werden müssen.

Grundsätzlich dominiert der Effekt der vertikal sehr inhomogen zusammengesetzten Schichtenabfolge, woraus ein deutlicher Unterschied im Verwitterungsverhalten parallel zur Schichtung, d.h. in Stossrichtung, und senkrecht dazu, d.h. in der Firste resultiert. In den Permeabilitätsmessungen in Richtung Stoss wurde nachgewiesen, dass engständig gebänderte Carnallititbereiche mit hohen Kieserit- und Tachyhydritgehalten sowie Toneinschaltungen erhöhte Permeabilitätswerte in der Größenordnung zwischen  $10^{-17} \text{ m}^2$  zu  $10^{-15} \text{ m}^2$  aufweisen. Da diese im Maßstab des Experimentalortes nachgewiesenen Schichtbereiche nur mit einem geringen Einfallen zur Strecke auftreten, müssen sie als potentielle Wegsamkeiten entlang eines Verschlussbauwerkes bewertet werden und stellen somit Problemzonen dar.

Für die Konzipierung eines Verschlussbauwerkes ist der Nachweis schichtgebundener Permeabilitätsanomalien unter Berücksichtigung der vertikalen und horizontalen Variabilität der geschichteten Carnallititlagerstätte Teutschenthal in einem größeren Maßstab eine wichtige Planungsgrundlage.

### 3.2 Gesteinsmechanische Laboruntersuchungen

Die gesteinsmechanische Charakterisierung des Carnallitits umfasst drei Arbeitspunkte:

- Laboruntersuchungen zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten des Camallitits,
- Laboruntersuchungen zur Scherfestigkeit in geschichteten Camallititgesteinen und
- Entwicklung von Untersuchungsmethodiken zur Bestimmung der Kontaktbedingungen zwischen Dammbaustoff und Wirtsgestein (vgl. hierzu Detailbericht zum AP 3).

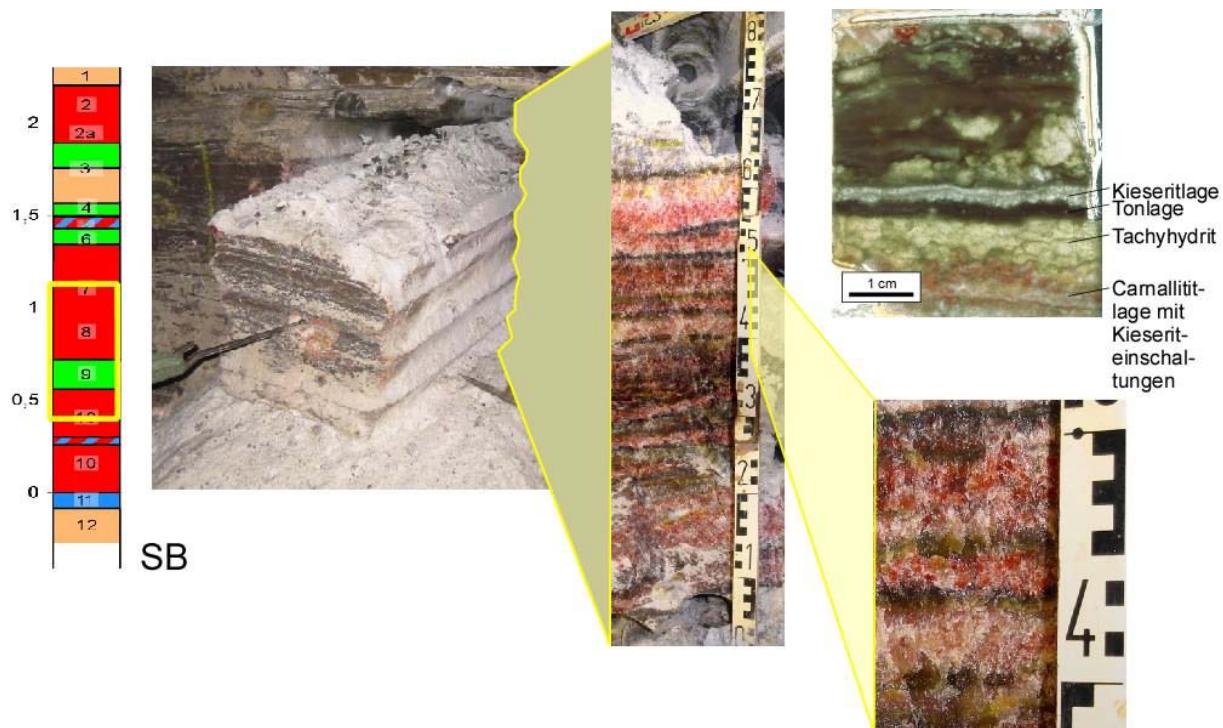
Voraussetzung für die Durchführung der Laboruntersuchungen war die Gewinnung geeigneten Probenmaterials, für die zunächst Kernbohrungen in der Untersuchungsstrecke vorgesehen waren. Dabei konnten aufgrund von „Core discing Effekten“ nur Carnallititkernstücke bis max. 100 mm Länge erbohrt werden. In der Auswertung von

Scheruntersuchungen an entsprechenden Probenkörpern zeigte sich, dass dieses Kernmaterial aufgrund der Vorschädigung infolge Auflockerung nur Restfestigkeitswerte ergab (siehe Abb. 26). Erst mit der Gewinnung eines Gesteinsgroßblockes am Experimentalort in der Maschinenstrecke war eine Herstellung geeigneter Probekörper möglich.

### 3.2.1 Probenmaterial - Lithologische Charakterisierung

Für die Untersuchungen wurde anfänglich Probenmaterial aus zwei Kernbohrungen (IfG US1 und US2), die auch für die Durchschallungsmessungen genutzt wurden und innerhalb der Schicht 8 (nach DÖHNER & FLIß [16]) liegen, verwendet. In einer zweiten Probennahmekampagne wurde ein repräsentativer Großblock gewonnen, der im Wesentlichen die geschichteten Bereiche 7 und 9 zwischen 0,3 m und 1,2 m oberhalb der Spätbank umfasst (Abb. 23). Nach Ausweis der mineralchemischen Analyse (DÖHNER & FLIß [16]) entspricht das Material in etwa einem C<sub>60</sub> mit Tachyhydritgehalten zwischen 3 und 17%, sowie Kieseritgehalten zwischen 3 und 15%.

Das Material ist makroskopisch im cm-Maßstab geschichtet (Abb. 23), wobei nach Ausweis von Dickschliffuntersuchungen (Schliffdicke ca. 200 µm) bis in den mm-Maßstab noch eine Feinschichtung von z.T. monomineralischen Wechsellegerungen der enthaltenen Minerale vorliegen kann.



**Abb. 23:** Stratigraphische Zuordnung der gewonnenen Großblockprobe bei Profilmeter 39. Gefügedarstellung Tachyhydrit-Carnallitit in verschiedenen Maßstäben bis zur Mikrogefügedarstellung im Dickschliff (Schliffdicke ca. 200 µm) aus der Schicht 8 des IfG-Großblockes

Das gewonnene Gesteinsmaterial wurde unmittelbar nach der Entnahme noch vor Ort eingeschweißt und nach Anlieferung in der Salzkammer des IfG bei ca. 40°C Raumtemperatur und ca. 25% r.F. gelagert.

Die bestimmten Ultraschallgeschwindigkeiten weisen probenspezifisch, aber auch richtungsabhängig (quer oder axial zur Probenachse) eine erhebliche Streuung auf und variieren in axialer Richtung zwischen 2,9 und 3,6 km/s mit einer Häufung bei 3,1 km/s,

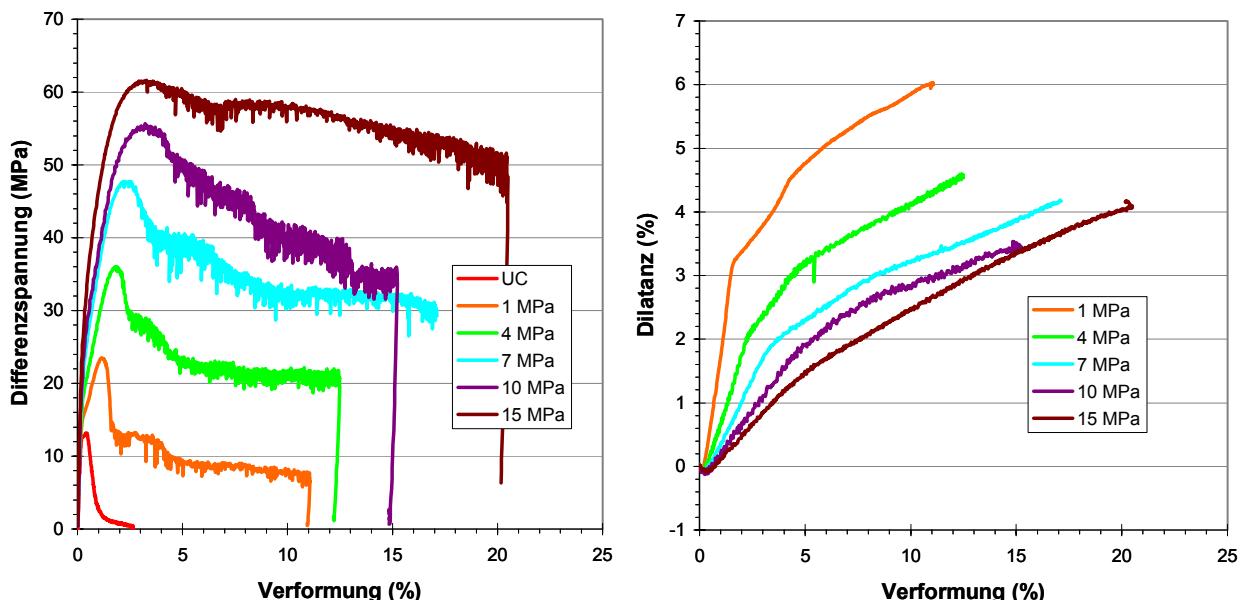
wobei im Mittel die Geschwindigkeiten in radialer Richtung, d.h. parallel zur Foliation, generell ca. 10% niedriger sind (schichtbezogene Anisotropie: ca. 15%).

Die Dichte beträgt im Mittel  $1,75 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$  und ist damit deutlich niedriger, als für einen vergleichbaren mittleren  $C_{60}$  mit einer Dichte von  $1,85 \text{ g/cm}^3$  (hauptsächlich Carnallit und Steinsalz, ohne Kieserit). Ursache dafür ist der hohe Volumenanteil des Tachyhydrits, in der Größenordnung von 10 – 15 %, der mit  $1,6 \text{ g/cm}^3$  eine zu Carnallit vergleichbare, geringe Mineraldichte aufweist, was somit zu einer einem  $C_{70}$  –  $C_{80}$  entsprechenden Gesteinsdichte führt.

### 3.2.2 Ergebnisse zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Carnallitit

Die Untersuchungen zum spezifischen Spannungs-Verformungsverhalten des am Experimentalort aufgeschlossenen Carnallitits wurden mittels der servohydraulischen Prüfmaschine des IfG mit definiert getrockneten Prüfkörpern im Druckeinspannungsbereich  $0 \leq \sigma_3 \leq 15 \text{ MPa}$  durchgeführt. Die ein- und dreiaxialen Druckversuche mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit von  $\dot{\varepsilon} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , bilden die Basis zur Beurteilung der Festigkeit und der Dilatanz in Abhängigkeit von der Verformung.

Abb. 24 zeigt die Spannungs-Verformungskurven zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Tragfähigkeit und der Dilatanz von der Verformung bei unterschiedlicher Einspannung (Manteldrücke  $\sigma_3$ ) für die untersuchten Proben. Zusätzlich sind in Abb. 25 die Festigkeits- und Dilatanzentwicklung in Abhängigkeit vom Manteldruck dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Bruchspannung und die Tragfähigkeit im Nachbruchbereich mit wachsendem Manteldruck zunehmen. Aus den gleichzeitig mit den Festigkeitskennlinien bei konstantem Manteldruck aufgenommenen Dilatanzkurven geht hervor, dass der Prüfkörper bei Beginn der Axialstauchung zunächst eine elastische Volumenverringerung erfährt, bevor mit Überschreiten der Dilatanzgrenze durch die verformungsabhängige Zunahme der Rissdichte sich das Volumen vergrößert.



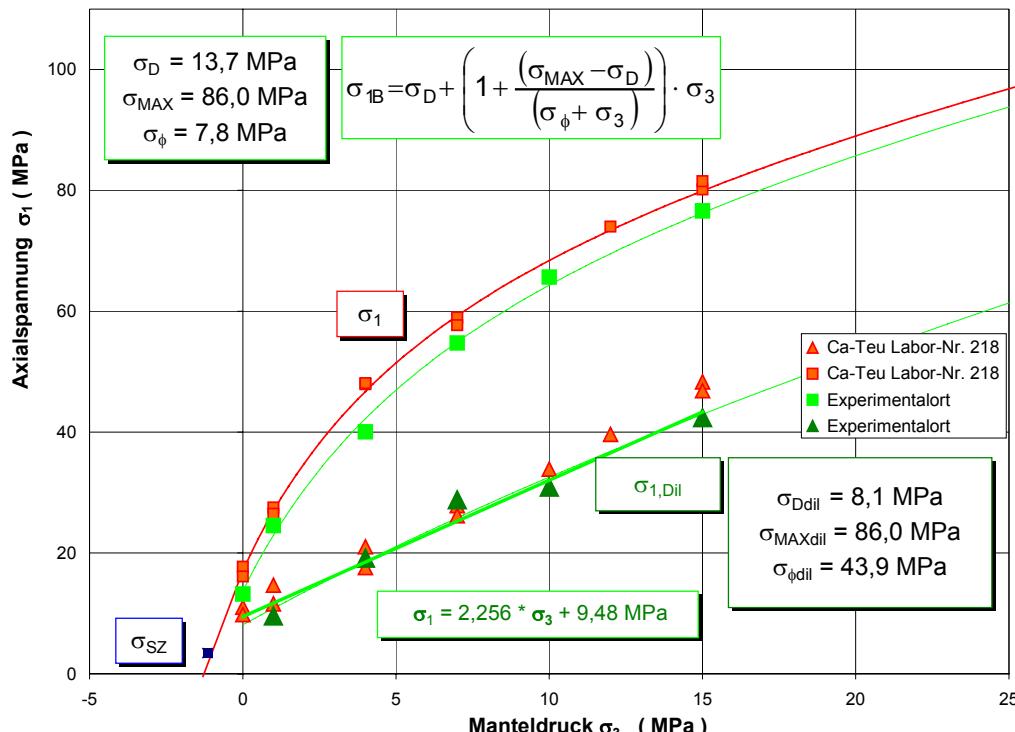
**Abb. 24:** Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Carnallitit in Abhängigkeit von der Verformung für verschiedene Manteldrücke - Labor Nr. 304: Teutschenthal-Experimentalort 3a-Sohle

Da das Mineral Carnallit im Gegensatz zu Steinsalz keine kristallographischen Gleitebenen aufweist, resultiert die inelastische Verformung von Carnallit hauptsächlich aus rupturer Deformation, d.h. Zwillingsbildung, Rissbildung und der Verschiebung auf Scherflächen, was in einer Zunahme der Dilatanz mit wachsender Axialverformung dokumentiert ist.

### 3.2.3 Materialparameter zum Festigkeits- und Entfestigungsverhalten

Zur Beschreibung des Festigkeits- und Entfestigungsverhaltens von Carnallit wird der von MINKLEY [15] entwickelte Zusammenhang auf der Grundlage des elasto-plastischen Stoffmodells benutzt. Dabei wird die Festigkeit nicht nur im Bruchpunkt oder im Minimum der Dilatanzkurve bestimmt, sondern es wird eine Schar von Festigkeitskennlinien in Abhängigkeit von der plastischen Deformation  $\varepsilon^P$  ermittelt. Analog werden zur Beschreibung des Dilatanzverhaltens ebenfalls volumetrische Verformungswerte nach Überschreiten der Festigkeits- bzw. Dilatanzgrenze ( $\varepsilon^P = 0$ ) in diskreten Verformungsschritten für  $\Delta\varepsilon_1 = 0,1\%$  bestimmt. Im Ergebnis dieser Auswertung erhält man eine von den untersuchten plastischen Verformungszuständen abhängige Anzahl von Kurven, die eine detailliertere Charakterisierung unterschiedlicher Verformungszustände erlaubt. Für die Parameterbestimmung werden zusätzlich die als Tangentenanstieg im Dilatanzbereich ermittelten Werte  $\tan \beta$  in Abhängigkeit vom Manteldruck dargestellt und angepasst.

Die Materialparameter für den C<sub>60</sub>-Carnallit 304 vom Experimentalort sind in Tabelle 4 aufgelistet.



**Abb. 25:** Festigkeitsdiagramm Teutschenthal-Carnallit (Labor Nr. 304: Experimentalort 3a-Sohle) im Vergleich mit älteren Untersuchungen an Teutschenthal-Carnallit (Labor-Nr. 218 – ca. 1 m unterhalb der Spätbank)

**Tabelle 4:** Festigkeits- (a) und Dilatanzparameter (b) von Carnallitit C60 – Experimentalort 3a-Sohle Teutschenthal (trocken)

a)

$\varepsilon_p$ (%)	0,0	0,2	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
$\sigma_D$ ( MPa )	13,6	10,9	5,3	5,6	0,9	0,0	0,0
$\sigma_\phi$ ( MPa )	7,7	7,9	7,8	8,2	9,5	9,8	16,8
$\sigma_{MAX}$ ( MPa )	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0	86,0

b)

$\varepsilon^P$ [%]	0,2	0,5	1	2	3	5
$\sigma_\psi$ [MPa]	5,9	7,63	5,6	11,4	12,8	42,0
$\tan \beta^0$	0,22	0,81	2,95	4,5	7,4	4,5

### 3.2.4 Untersuchungen zur Scherfestigkeit von geschichtetem Carnallitit

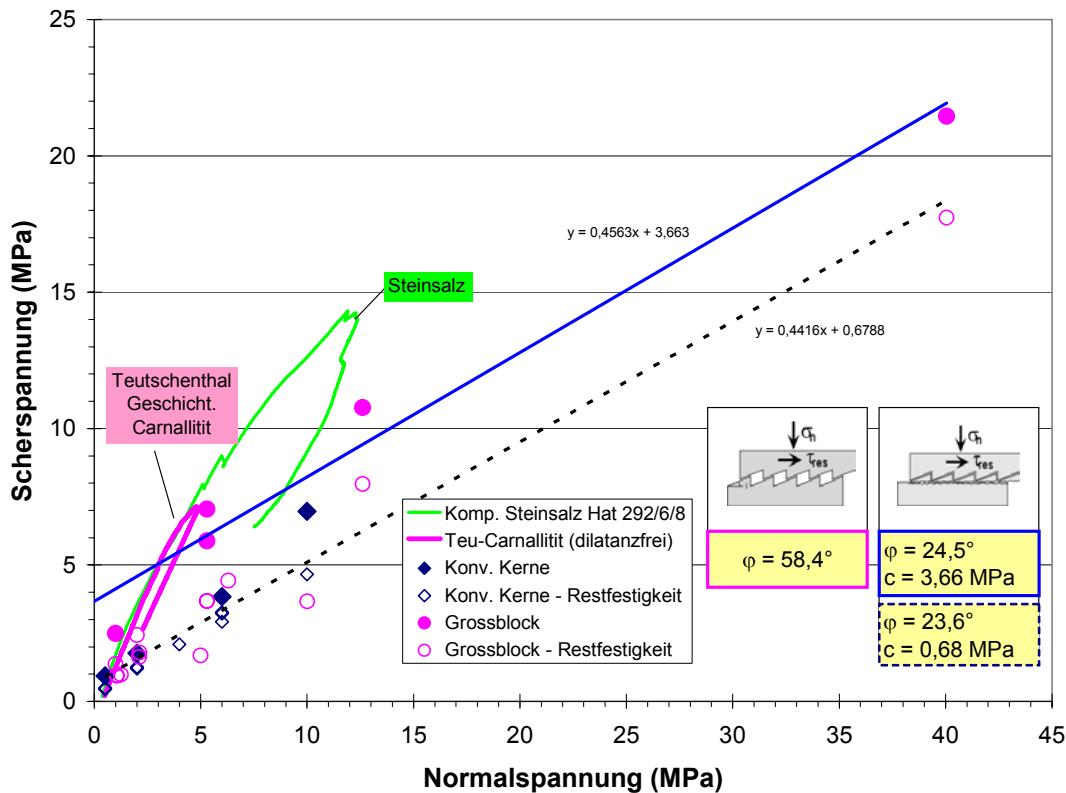
Für eine Stabilitätsanalyse von untertägigen Hohlräumen bzw. für eine Vorhersage des Verhaltens des Gebirges sind zusätzlich zu den Festigkeits- und Verformungseigenschaften des kompakten Gesteinsmassivs die Eigenschaften potentieller Schwächezonen von Bedeutung.

Der hier untersuchte Carnallitit liegt primär geschichtet mit Lagen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung vor, wobei diese lithologischen Inhomogenitäten als Trennflächen gebirgsmechanisch aktiviert werden können und somit die Festigkeitseigenschaften des anstehenden Gesteins reduzieren.

Mit dem neuen MTS-Scher-Test-System des IfG (Modell 816) ist es möglich, die zu untersuchenden Schicht- oder Trennflächen im direkten Scherversuch so auszurichten, dass die Wirkungslinie der Scherkraft unmittelbar in dieser Ebene bzw. die Wirkungslinie der Normalkraft senkrecht dazu liegt, so dass die effektive Schubspannung gleich der totalen ist. Die ermittelten Versuchsergebnisse stammen von zwei Probenserien, wobei sowohl Kernmaterial aus Kernbohrungen als auch kompaktes Material aus dem Probenblock verwendet wurde. Das Versuchsprogramm umfasst:

- 9 klassische Scherversuche mit Durchscheren der Prüfkörper mit einer konstanten Scherverschiebungsrate von 0,002 mm/s bei jeweils konstanter Normalbelastung von  $\sigma_n = 0,2$  bis 40 MPa bis zur Bestimmung der Spitzenscherfestigkeit. Nach Erreichen des Restfestigkeitsniveaus wurde in bis zu drei Stufen die Normalbelastung variiert und erneut die Restfestigkeit bestimmt.
- 1 sogen. Dilatanz-freier Scherversuch, bei dem kontinuierlich während der Scherung mit einer konstanten Scherverschiebungsrate von 0,002 mm/s automatisch die Vertikalspannung zur Vermeidung einer Aufgleitung erhöht wird.

Die aus den Versuchskurven abgeleiteten Einzeldaten aller Versuche mit der Scherfestigkeit sowie den weiteren Restfestigkeiten sind in Abb. 26 grafisch zusammengefasst.



**Abb. 26:** Scherfestigkeit von geschichtetem Teutschenthal Carnallitit (Labor-Nr. 304)

Dabei zeigt sich in Abhängigkeit von der Normalspannung ein zweiphasiger Festigkeitsverlauf. Im Anschluss an den initialen Aufgleit- und Scherprozess, hier repräsentiert durch den dilatanzfreien Scherversuch und den Scherversuch bei  $\sigma_n = 1$  MPa, stellt sich für die Scherproben aus dem Großblock bei  $\sigma_n \approx 5$  MPa ein nahezu linearer Verlauf der Festigkeiten mit einem nur geringen probenspezifisch bedingten Streubereich ein. Die dazugehörigen Restfestigkeiten zeigen einen vergleichbaren Reibungswinkel mit nur noch geringer Kohäsion. Gleichzeitig wird deutlich, dass die an Kernmaterial bestimmten Festigkeiten nur im allgemeinen Restfestigkeitsniveau liegen und somit nicht das unbeeinflusste Gebirge repräsentieren.

Über eine Regressionsanalyse wurden aus den Einzelwerten der Aufgleit- bzw. Reibungswinkel, die Mohr-Coulomb-Festigkeitsparameter der Trennfläche, sowie deren Restscherfestigkeiten bestimmt. Die entsprechenden Werte für den Winkel der inneren Reibung  $\varphi$  und die Kohäsion  $c$  sind in Abhängigkeit von den wirkenden Druckeinspannungen:

$$\varphi_G = 24,5^\circ \quad c_G = 3,66 \text{ MPa} \quad \text{bzw. f\"ur die Restscherfestigkeit } \varphi_{\text{Rest}} = 23,6^\circ \quad c_{\text{Rest}} = 0,68 \text{ MPa}$$

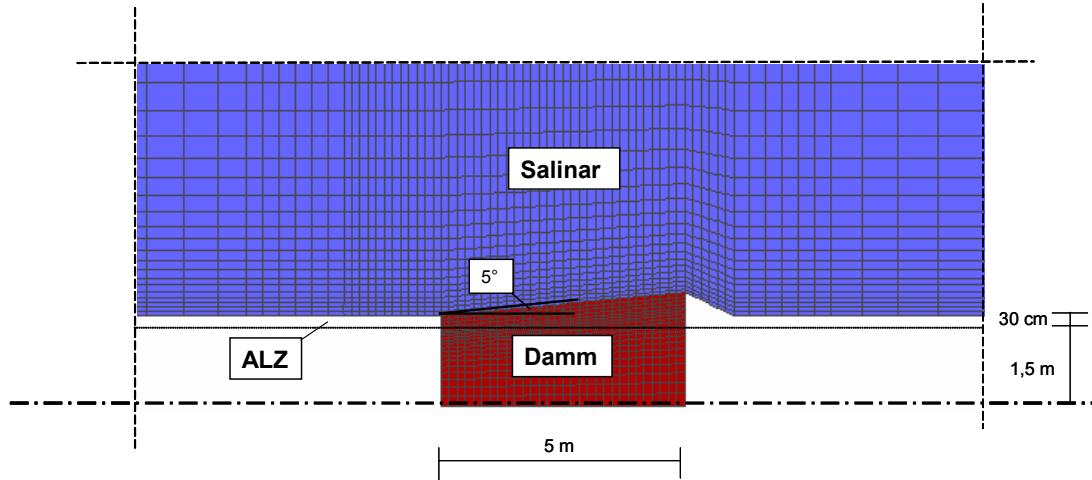
### 3.3 Modellstudie für ein hypothetisches Verschlussbauwerk Teutschenthal

Ziel der Modellrechnungen zu einem Dammbauwerk aus MgO-Beton ist, unter den Rahmenbedingungen, wie sie am Untersuchungsort auf der 3a-Sohle der Grube Teutschenthal ermittelt wurden, das Trag- und Dichtverhalten eines möglichen Verschlussbauwerkes zu untersuchen. Dazu wurden an einem rotationssymmetrischen Berechnungsmodell mechanische Berechnungen, Durchströmungsberechnungen und gekoppelte fluidmechanische Berechnungen unter Berücksichtigung typischer aus dem aufkriechenden Gebirge und dem angreifenden Fluid zu erwartender Belastungen durchgeführt.

Da sowohl die Dammabmessungen als auch der Dammbaustoff derzeit noch in der Diskussion sind, wird bei den Berechnungen am rotationssymmetrischen Modell eine fiktive Dammgeometrie gewählt, die ggf. auch für einen Versuchsdamm geeignet und in der 2. Vorhabensphase zu testen ist. Als Dammbaustoff wird der MgO-Beton MB6, der am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (siehe Abschnitt 6) entwickelt wurde, angenommen.

#### 3.3.1 Berechnungsmodell

Die Berechnungen wurden an einem rotationssymmetrischen Modell, das radial eine Breite von 50 m und in Achsrichtung von 70 m umfasst, durchgeführt. An den äußeren Rändern ( $y = 0$  und  $y = 70$  m) wurden Gleitlager und normal zum Rand bei  $x = 50$  m Spannungsrandbedingungen (18 MPa, entsprechend der In-situ-Bedingungen am Versuchsort) angeordnet. In Abb. 27 ist der hier modellierte Damm als Modellausschnitt dargestellt.



**Abb. 27:** Ausschnitt aus dem rotationssymmetrischen Berechnungsmodell

Der zentral liegende Damm mit einer Länge von 5 m ist kegelstumpfförmig ausgebildet, hat luftseitig einen Durchmesser von 3,6 m und einen Aufweitungswinkel von 5°. Für die Berechnungen wurde das Programmsystem FLAC 4.0 der ITASCA Consulting Group Incorporation (siehe ITASCA [17]) verwendet.

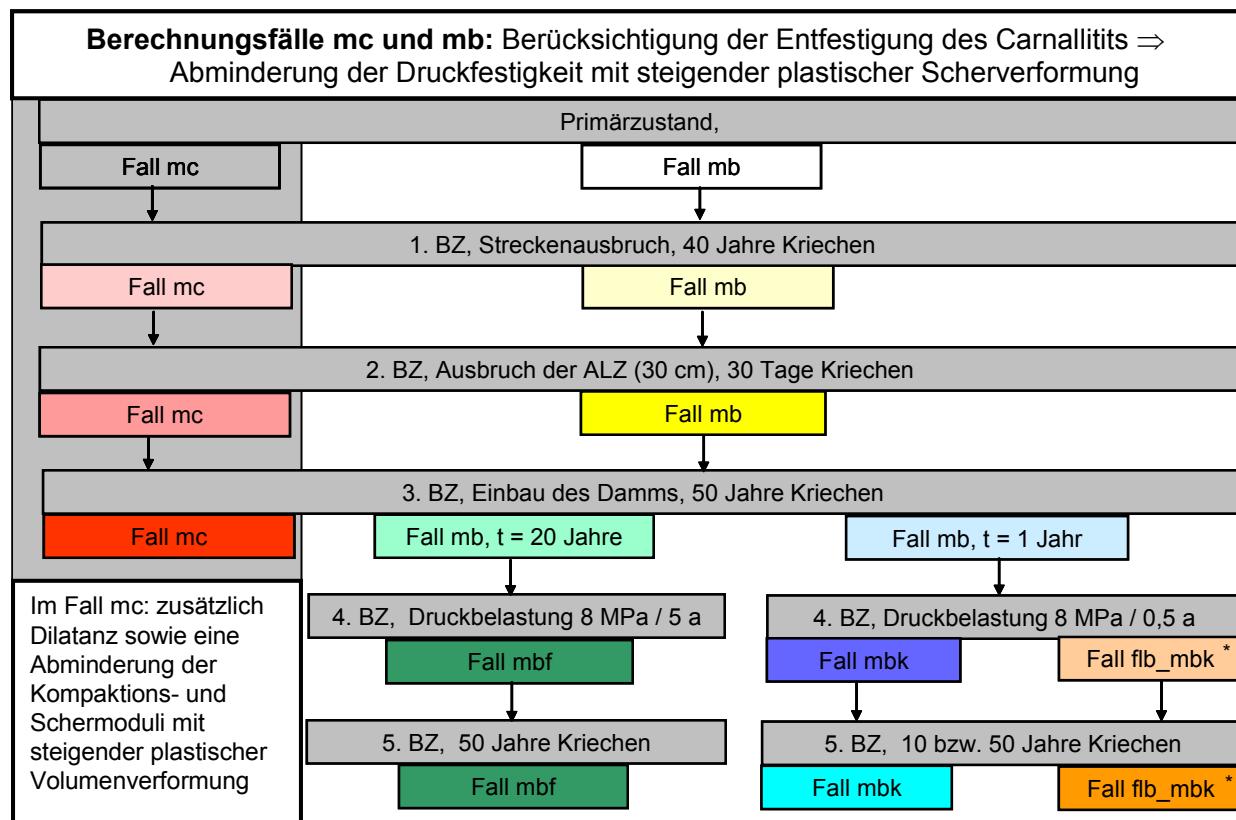
### 3.3.2 Berechnungsfälle und Berechnungsablauf

Die Berechnungsfälle und der Berechnungsablauf für die mechanischen Berechnungen, die Durchströmungsberechnungen und die gekoppelten fluidmechanischen Berechnungen unter Berücksichtigung typischer aus dem aufkriechenden Gebirge und dem angreifenden Fluid zu erwartenden Belastungen sind in der Abb. 28 zusammengestellt.

Nach der Simulation des Primärspannungszustandes (Initialisierung eines lithostatischen Grundspannungszustandes von 18 MPa) wurde im **1. Bauzustand** (BZ) die Strecke aufgefahren und entsprechend ihres heutigen Alters eine Kriechberechnung über einen Zeitraum von 40 Jahren durchgeführt.

Im **2. Bauzustand** werden die Auflockerungszone bis in eine Tiefe von 30 cm entfernt, das Salinar im späteren Dammabschnitt entsprechend der Bauwerksgeometrie ausgebrochen und eine Kriechberechnung über einen Zeitraum von 30 Tagen durchgeführt.

Der **3. Bauzustand** umfasst den Einbau des Damms und eine 50 Jahre andauernde Kriechberechnung, in der das Gebirge auf den Dammkörper aufkriecht. Bis zum 3. Bauzustand werden 2 Berechnungen (Fälle mb und mc) durchgeführt. Wie in Abb. 28 dargestellt, werden im Berechnungsfall mb lediglich die Entfestigung des Carnallitits (Abminderung der Druckfestigkeit mit steigender plastischer Scherverformung) berücksichtigt, während beim Fall mc zusätzlich Dilatanz sowie eine Abminderung der Kompaktions- und Schermoduli mit steigender plastischer Volumenverformung berücksichtigt werden.



**Abb. 28:** Berechnungsablauf mechanische und gekoppelte Berechnungen für die Bauzustände BZ1 bis BZ5. Beachte die Berechnungsunterschiede mc und mb

In den weiteren Berechnungen (**4. Bauzustand**) wird die Flutung des druckseitigen Grubenbereiches nachgebildet. Der Fließdruck wird als sich zeitlich ändernde Normalspannung auf die druckseitige Stirnfläche des Widerlagers und das im druckseitigen Streckenbereich anstehende Salinar simuliert.

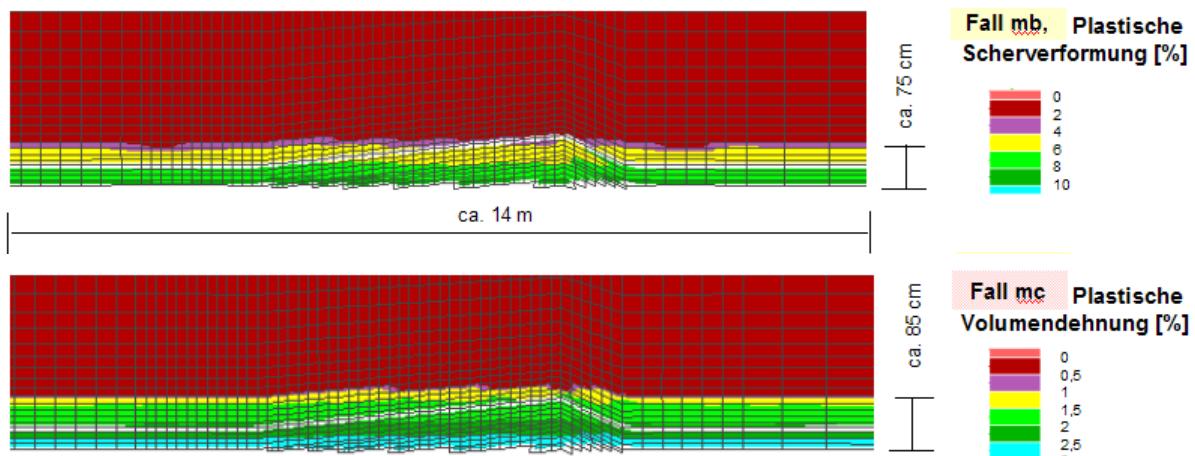
Beim Berechnungsfall mbf (grüner Zweig, Abb. 3-9) wird eine planmäßige Flutung simuliert, indem 20 Jahre nach dem Dammeinbau (3. BZ) innerhalb von 5 Jahren ein Fließdruck von 8 MPa aufgebracht wird. Beim Berechnungsfall mbk (blauer Zweig, Abb. 28) wird ein außerplanmäßiger Wassereinbruch (z.B. Laugeneinbruch) unterstellt. Der Beginn des Wassereinbruchs wird 1 Jahr nach Dammerstellung (3. BZ,  $t = 1$  Jahr) angenommen und die Druckerhöhung auf 8 MPa erfolgt innerhalb eines halben Jahres.

Im **5. Bauzustand** wird eine Kriechberechnung über 50 Jahre durchgeführt, wobei die einseitige Fluidbelastung von 8 MPa konstant gehalten wird.

### 3.3.3 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

Die Ergebnisse der Durchströmungsberechnungen zeigen, dass das relativ kurze Bauwerk ( $l = 5$  m) bei Annahme in situ relevanter Verhältnisse ( $k_{\text{Damm}} = 10^{-18} \text{ m}^2$ ,  $k_{\text{ALZ}} = 10^{-17} \text{ m}^2$ ) innerhalb weniger Jahre durchströmt ist, wobei die Durchtrittsmengen mit ca. 0,5 bis 1,3 Litern pro Tag gering sind.

Die mechanischen Berechnungen des 1. Bauzustandes (Streckenausbruch und 40 Jahre Kriechen, Abb. 29) führen bei dem hier verwendeten Parameterdatensatz für den Carnallitit der Grube Teutschenthal und den Randbedingungen am Versuchsort (Grundspannungszustand 18 MPa) zur Ausbildung eines ca. 75 bis 85 cm tiefen entfestigten und aufgelockerten Konturbereichs (Auflockerungszone ALZ) in der offenen Strecke, was den Ergebnissen der geophysikalischen und gebirgsmechanischen Charakterisierung der ALZ entspricht (vgl. Abb. 20).

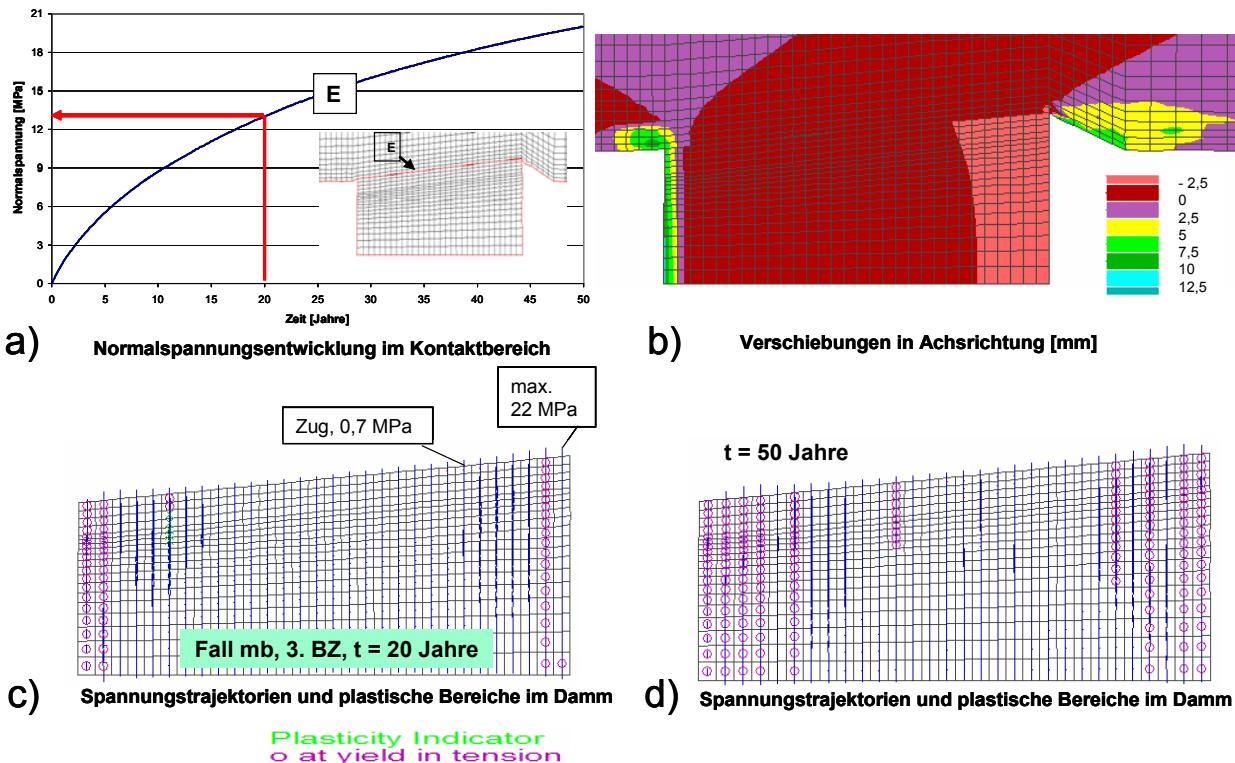


**Abb. 29:** Fälle mb und mc, 1. Bauzustand,  $t = 40$  Jahre, Ausdehnung der ALZ

Die wesentlichen Berechnungsergebnisse für den 3. Bauzustand sind in der Abb. 30 zusammengestellt.

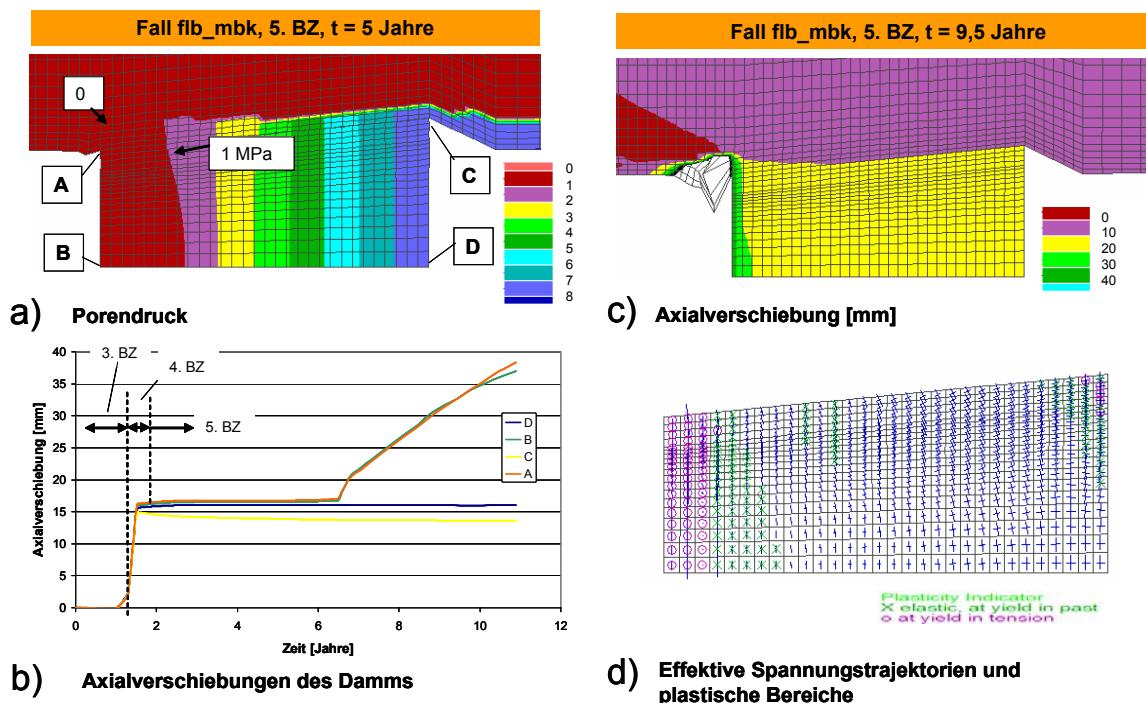
Infolge des Einbaus des Damms (3. Bauzustand) und dem Aufbau einer Normalspannung im Kontaktbereich durch das aufkriechende Gebirge wird der Auflockerungsprozess in der ALZ gestoppt, so dass zumindest von einem Erhalt der im Konturbereich zum Zeitpunkt des Dammeinbaus vorhandenen Permeabilität ausgegangen werden kann. In der Realität kann davon ausgegangen werden, dass die unter dreiaxialer Einspannung beobachteten

Verheilungsprozesse zu einer Verringerung der Permeabilität mit fortschreitender Zeit führen.



**Abb. 30:** Mechanische Berechnungen für den 3. Bauzustand:

- a) Normalspannungsentwicklung im Kontaktbereich als Funktion der Zeit (Punkt E);
- b) Verschiebungen in Achsrichtung ( $t_1 = 20$  Jahre);
- c) Spannungstrajektorien und plastische Bereiche im Damm ( $t_1 = 20$  Jahre);
- d) Spannungstrajektorien und plastische Bereiche im Damm ( $t_2 = 50$  Jahre).



**Abb. 31:** Ergebnisse gekoppelter fluidmechanischer Berechnungen

In den Übergangsbereichen vom Bauwerk zu den offenen Teilen der Strecke nehmen die Volumenverformungen (Dilatanz) in der Streckenkontur mit fortschreitendem Aufkriechen des Gebirges auf dem Dammkörper zu, so dass hier von einer weiteren Schädigung des Gebirges auszugehen ist (Abb. 30). Auch im Dammkörper selbst werden im Berechnungszeitraum von 50 Jahren infolge der fehlenden Einspannung im Bereich der Stirnflächen Zugfestigkeitsüberschreitungen bis in eine Tiefe von ca. 1 m zu den Stirnflächen ausgewiesen. Daraus resultierende plastische Verschiebungen des Damms und der Kontur in die offenen Strecken hinein nehmen mit fortschreitendem Aufkriechen des Gebirges stetig zu, so dass in diesen Bereichen von einer Beeinträchtigung der Dichtheit des Bauwerkes ausgegangen werden muss.

Die Durchströmung des Damms (4. und 5. Bauzustand) führt luftseitig zu einer Beschleunigung des oben erläuterten Schädigungsprozesses. Die Strömungskräfte bewirken luftseitig eine Vergrößerung der Verschiebungsraten der Stirnflächen und der Gebirgskontur (Abb. 31).

### 3.3.4 Zusammenfassende Bewertung der Modellrechnungen

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass beim Einbau eines kurzen, steifen Abdichtungsbauwerkes im Übergangsbereich Damm/offene Strecke Belastungen zu erwarten sind, die auch bei hohen Festigkeiten des Dammbaustoffes in den Randbereichen des Damm selbst sowie dem umgebenden Salinar zu Schädigungen führen. Um solche Schädigungen in dem für den Langzeitsicherheitsnachweis relevanten Dammabschnitt zu vermeiden, muss konstruktiv für eine dreiaxiale Einspannung dieses Dammabschnittes gesorgt werden. Eine Verlängerung des Dammbauwerkes um einen Betrag von ca. dem doppelten Durchmesser gegenüber der im Langzeitsicherheitsnachweis für das Bauwerk geforderten Länge (1 x Durchmesser je Seite) ist erfahrungsgemäß ausreichend.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die Einspannung des Dammbauwerkes und damit die Normalspannungen auf der Kontaktfuge zwischen dem Bauwerk und dem Gebirge erhöht, wird in erster Linie durch die Steifigkeit des Bauwerks und die Kriechparameter des anstehenden Carnallitits bestimmt. Um diese Parameter realistisch abschätzen zu können, sind unbedingt Konvergenzmessungen im Bereich der geplanten Dammstandorte möglichst bald zu beginnen.

Weiterhin konnte der Einfluss der flachgelagerten Tachyhydrit-Kieserit-Schichten mit einer erhöhten Permeabilität gegenüber dem anstehenden Carnallitit in den bisherigen Berechnungen mit einem rotationssymmetrischen Modell nicht erfasst werden. Aufgrund der Ausrichtung der Schichten sollten diese in der folgenden Bearbeitungsphase mit einem dreidimensionalen Berechnungsmodell abgebildet werden.

## 3.4 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Die im Rahmen dieses Arbeitspaketes durchgeführten Untersuchungen belegen in ihrer Komplexität beispielhaft den innerhalb des Vorhabens erreichten aktuellen Kenntnisstand in der Herangehensweise zur Modellierung und Dimensionierung von Dammbauwerken und zeigen darüber hinaus die zu schließenden Kenntnislücken auf. Voraussetzung für die Durchführung dieser Modellrechnungen ist, dass einerseits die Nahfeldeigenschaften des Gebirges hinsichtlich der Ausbildung einer Auflockerungszone verstanden und auch hinreichend dokumentiert sind, und weiterhin, die notwendigen standortspezifischen Materialparameter bestimmt werden.

- Die Ausbildung der ALZ hängt primär von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des aufgeschlossenen Salzgesteins und dem Spannungszustand im Bereich der Maschinenstrecke ab. Die ALZ wird entlang des Streckenaufschlusses schichtspezifisch durch eine schichtparallel tiefgründige Verwitterung der leichtlöslichen Salzkomponenten überprägt. Unter Auflösung hygroskopischer Salzminerale wie Tachyhydrit und Kieserit kommt es zur Ausbildung entsprechender Wegsamkeiten.
- Die Reichweite und Größenordnung der durch Verwitterungsprozesse überprägten ALZ ergibt sich in Abhängigkeit der Dauer und Intensität der Einwirkung über den Volumenanteil und Verwachsungsgrad dieser Minerale. Sie ist schichtspezifisch für die vertikal heterogene Gesteinsabfolge unterschiedlich, wobei aber die genauen Ursachen für dieses unterschiedliche Materialverhalten z. Z. noch nicht bekannt sind (vgl. AP2). Anzumerken ist noch, dass in Kernen, die parallel entlang von Tonlinien erbohrt wurden, erhöhte Feuchtigkeitsgehalte bis 3 m Stosssteufe beobachtet wurden.

Insgesamt macht die am Experimentalort beobachtete lithologische Heterogenität entlang der Strecke deutlich, dass für ein zu erstellendes Verschlussbauwerk eine entsprechende spezifische Standortcharakterisierung erforderlich ist. Unabhängig davon, ist festzuhalten, dass die generellen Wirkprinzipien, die zur Ausbildung der ALZ in diesen leichtlöslichen Gesteinen führen, über den hier dokumentierten interdisziplinären Ansatz erkannt werden konnten.

Ausgehend von hier vorgestellten Ergebnissen besteht ein weitergehender Untersuchungsbedarf in den folgenden Arbeitsschwerpunkten:

- Die hier bestimmten Festigkeitsuntersuchungen wurden nur an definiert getrocknetem Probenmaterial durchgeführt und eine mögliche Festigkeitsreduktion dieser extrem hygroskopischen Gesteine durch erhöhte Feuchtigkeitsgehalte infolge der Beeinflussung durch Grubenwetter bisher vernachlässigt. Vergleichsuntersuchungen von MINKLEY & BRÜCKNER [18] an Probenmaterial unterhalb der Spätbank belegen, dass die Festigkeiten im Bereich geringer Einspannungen und bei hohen plastischen Verformungen mit dilatanter Gefügeauflockerung um bis zu 25% reduziert sein können, wobei sich gleichzeitig das Verformungsverhalten von spröd zu mehr duktil ändert. Dieser Aspekt ist im Rahmen des nachfolgenden Forschungsvorhabens aber noch genauer zu untersuchen.
- Bei den bisherigen Berechnungen konnte die Problematik einer möglichen Öffnung der Kontaktfuge durch sich im Kontaktbereich aufbauende Porendrücke und eine Durchströmung der Kontaktfläche mit dem verwendeten Programmsystem bisher nicht nachgebildet werden. Die Ergebnisse des Berechnungsfalls, bei dem ein unplanmäßiger Wassereinbruch simuliert wurde (geringes Normalspannungsniveau im Kontaktbereich), weisen jedoch darauf hin, dass die Problematik der Durchströmung der Kontaktfläche relevant ist.
- Um eine realistische Modellierung dieser Prozesse zu ermöglichen, ist die Kontaktzugfestigkeit zwischen dem anstehenden Carnallit und möglichen Dammbaustoffen zu ermitteln, die in den bisherigen Betrachtungen konservativer Weise mit Null angenommen wurde.

Für die experimentelle Charakterisierung der Trennflächeneigenschaften wurde eine Untersuchungsmethodik basierend auf direkten Zug- und Scherversuchen an künstlich hergestellten Probenkörpern mit Trennflächen entwickelt und erprobt. Sie sind spezifisch für das gewählte Dammbaumaterial sowie die Oberflächeneigenschaften des am Einbauort anstehenden Salzgesteins durchzuführen.

- Weiterhin konnte der Einfluss der flachgelagerten Tachyhydrit-Kieserit-Schichten mit einer erhöhten Permeabilität gegenüber dem anstehenden Carnallitit in den bisherigen Berechnungen mit einem rotationssymmetrischen Modell nicht erfasst werden. Aufgrund der Ausrichtung der Schichten sollten diese mit einem dreidimensionalen Berechnungsmodell abgebildet werden.

Insgesamt stehen für die Simulation der gesteinsmechanischen und geohydraulischen Prozesse geeignete Werkzeuge zur Verfügung, die aber material- und standortspezifisch anzupassen sind. Auf dieser Grundlage ist eine gebirgsmechanische Bemessung des untertägigen Dichtsystems sowie eine Berücksichtigung der hydraulisch-mechanischen Wechselwirkung in und um den Streckendamm möglich. Darüber hinaus gestattet diese Herangehensweise auch eine Nachweisführung zur langzeitlichen Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit des Dichtsystems.

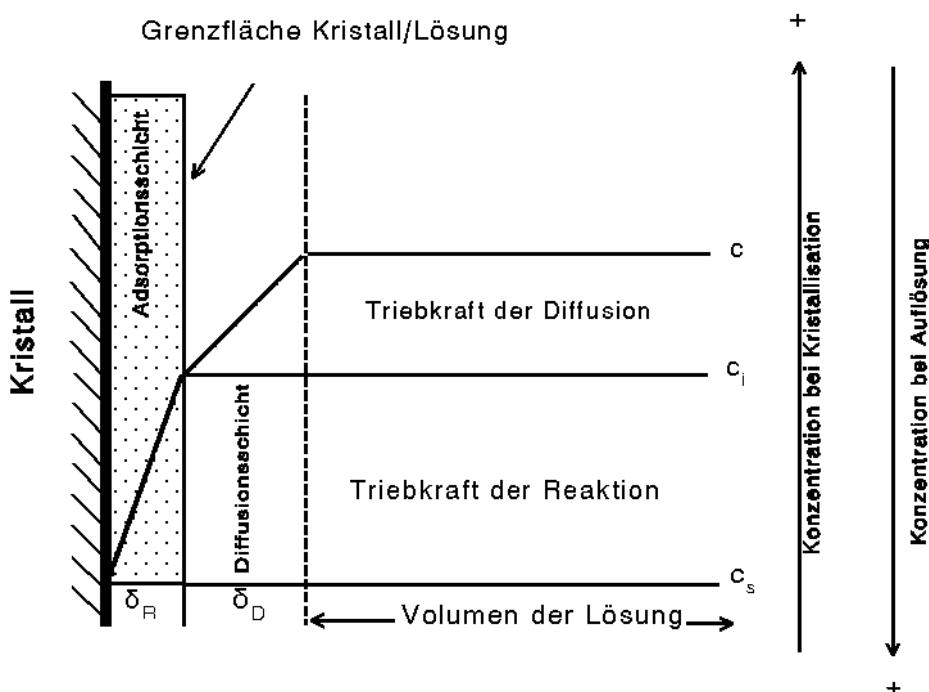
## 4 Voraussetzung für eine lösungsinduzierte Kristallisation zur Abdichtung der ALZ\*

### 4.1 Quantitative und qualitative Analysen der Löse- und Kristallisationsgeschwindigkeiten

Triebkraft für das Auflösen oder Kristallisieren eines Minerals ist die Abweichung der Lösungskonzentration von der thermodynamischen Gleichgewichtskonzentration, die auch Sättigungskonzentration,  $c_s$ , genannt wird. Bei einer Untersättigung der Lösung tritt Auflösung, bei einer Übersättigung Kristallisation ein. Die makrokinetischen Gleichungen zur Beschreibung dieser Prozesse basieren sowohl für die Kristallisation als auch für die Auflösung auf einem zweistufigen Mechanismus, bestehend aus:

- einem Transportschritt (An- oder Abtransport durch Diffusion)
- einem Reaktionsschritt (Einbau oder Herauslösen der Kristallbausteine)

Jedem dieser beiden Schritte kann eine eigene Triebkraft zugeordnet werden wie in unten stehendem Schema (Abb.32) veranschaulicht ist.



**Abb. 32:** Grundvorstellung zur Ableitung der löse- und kristallisationskinetischen Gleichungen (nach [19])

\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 4:

Voigt, W.; Freyer, D.; Moßig, R.: Kristallisation von carnallitstabilen Mineralphasen - Voraussetzungen für eine lösungsinduzierte Kristallisation zur Abdichtung der ALZ. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie, Dezember 2004.

Für die Betrachtung der Kristallisation oder der Auflösung gelten nur jeweils entgegengesetzte Richtungen der Konzentrationsgradienten. Für die Kristallisation ergibt das 1. Ficksche Gesetz für die pro Zeiteinheit zur Adsorptionsschicht diffundierende Masse Salz

$$(dm/dt) = \{D^*A/\delta\}^*(c - c_1) \quad (1)$$

mit  $\delta$  als der Diffusionsschichtdicke, die den Kristall umgibt und im Allgemeinen von der Relativgeschwindigkeit Kristall – Lösung abhängt. Beschreibt man den Einbau der Teilchen aus der Adsorptionsschicht in die Kristallstruktur mit einer Reaktion erster Ordnung so resultiert für die pro Zeiteinheit eingebaute Masse Gl. (2)

$$(dm/dt) = k_R^*A^*(c_1 - c_S) \quad (2)$$

Das Zusammenführen beider Gleichungen unter Eliminieren der experimentell kaum zugänglichen Grenzschichtkonzentration  $c_1$  liefert für die Gesamtkinetik

$$(dm/dt) = A^*\{\delta/D + 1/k_R\}^*(c - c_S) = A^*K^*(c - c_S) \quad (3)$$

Die spezifische Löse- oder Kristallisationsgeschwindigkeit ist über Gl. (4) definiert.

$$k_L = (dm/dt) / A \text{ bzw. } k_K = (dm/dt) / A \quad (4)$$

Der reziproke Wert (1/K) in Gl.(5) wird als Stoffübergangswiderstand bezeichnet und setzt sich aus dem Diffusionswiderstand,  $\delta/D$ , und dem Reaktionswiderstand,  $1/k_R$ , zusammen.

$$(1/K) = \delta/D + 1/k_R \quad (5)$$

Für sehr schnelle Einbaureaktionen, also sehr großen Werten von  $k_R$ , hängt die Gesamtgeschwindigkeit nur von der Diffusionsgeschwindigkeit ab, das Kristallwachstum oder die Auflösung sind dann diffusionskontrolliert. Umgekehrt kann auch reaktionskontrolliertes Wachstum oder Auflösung auftreten. Die Stoffübergangszahl ist die auf die aktuelle Untersättigung bezogene spezifische Lösegeschwindigkeit, also

$$\beta = k_L / (c - c_S) \quad (6)$$

Die Stoffübergangszahl ist relativ unabhängig von der aktuellen Lösungskonzentration. Sie sollte für den Diffusionstyp z. B. konstant bleiben solange sich die hydrodynamischen Bedingungen und die Viskosität der Lösung nicht wesentlich ändern. In Lösungen mit mehreren gelösten Komponenten ist die Abhängigkeit von  $c_S$  von der Lösungszusammensetzung zu berücksichtigen. Angaben für Stoffübergangszahlen bei ein und demselben Mineral schwanken auch bei vergleichbaren Bedingungen erheblich. Dies liegt vor allem daran, dass die spezifische Oberfläche bei Mineralkornkollektiven nicht genügend genau bekannt ist und die hydrodynamischen Verhältnisse nicht exakt reproduziert werden. Für die Übertragung dieser Zahlenangaben auf geologische Verhältnisse in einer Strecke nehmen die Unsicherheiten weiter zu, da die wirksame, von der Lösung erreichte Oberfläche und das Strömungsregime nur unter stark vereinfachenden Annahmen definierbar sind. Weiterhin sind an einem Löseprozess zumeist mehrere Minerale gleichzeitig beteiligt und von Mineralneubildungen überlagert. Löse- und Kristallisationsprozesse sind daher nicht als Einzelprozess wie in der technischen Kristallisation modellierbar. Man ist daher auf eine summarische Verfolgung der Prozesse in bestimmten geologischen Formationen angewiesen, wie es für Carnallit von SIEBLER [20], LIEBMANN [21] und VOIGT [22] gezeigt wurde und wird.

Für die Kristallisation gilt in hohem Maße das Gleiche wie für die Auflösung nur mit dem Unterschied, dass bei der Kristallisation zusätzlich der Schritt der Keimbildung eine wesentliche Rolle spielt. Keimbildung ist ebenso wie die Kristallwachstumsgeschwindigkeit

von der Übersättigung der Lösung abhängig. Darüber hinaus spielen für die Keimbildung Oberflächen und ihre energetische und kristallchemische Beschaffenheit eine große Rolle. Diese Faktoren sind gegenwärtig noch nicht in Form mathematischer Zusammenhänge formulierbar. Quantitative Angaben zur Keimbildungsgeschwindigkeit sind daher nicht verfügbar bzw. nicht für die Bedingungen einer Salzformation zur Berechnung von Kristallbildungsgeschwindigkeiten anwendbar. Lediglich qualitative Regeln und Beobachtungen stehen zur Verfügung. So ist z. B. bekannt, dass die Keimbildungsgeschwindigkeit für Kainit, Syngenit, Polyhalit und Kieserit bei Temperaturen unter 45 °C extrem klein ist, Anhydrit sich unter diesen Bedingungen überhaupt nicht bildet [23]. Letztere Tatsache ist für dieses Vorhaben von besonderem Interesse. Wird in Lösungen eine Übersättigung an Calciumsulfat erzeugt, so wird sich entweder Gips oder bei niedrigen Wasseraktivitäten Calciumsulfat-Halbhydrat bilden. Bei genügend hohen Kaliumsulfatkonzentrationen auch Syngenit und mit  $MgSO_4$  später auch Polyhalit. Das Kristallisieren von Calciumsulfatphasen ist demnach ein langsamer Prozess, was in der Umsetzung einer induzierten Kristallisation zur Abdichtung von Rissen zu berücksichtigen ist.

## 4.2 Laboruntersuchungen für die Bedingungen der GTS

Entsprechend dem in AP 1.2. erarbeiteten Drei-Zonen-Konzept einer Dammvorschüttung zur Erzeugung einer Lösung, die das anstehende Salzgebirge nicht angreift und gleichzeitig durch lösungsinduzierte Kristallisation eine selbstabdichtende Wirkung entwickelt, werden im Folgenden die Reaktionen der Salzminerale in den einzelnen Zonen in Laborversuchen bezüglich ihrer erwünschten Wirkung getestet und hinsichtlich der Anwendbarkeit eingeschätzt.

### 4.2.1 Zone I

In Abb.33 sind der Aufbau und das Funktionsprinzip der Zone I dargestellt.

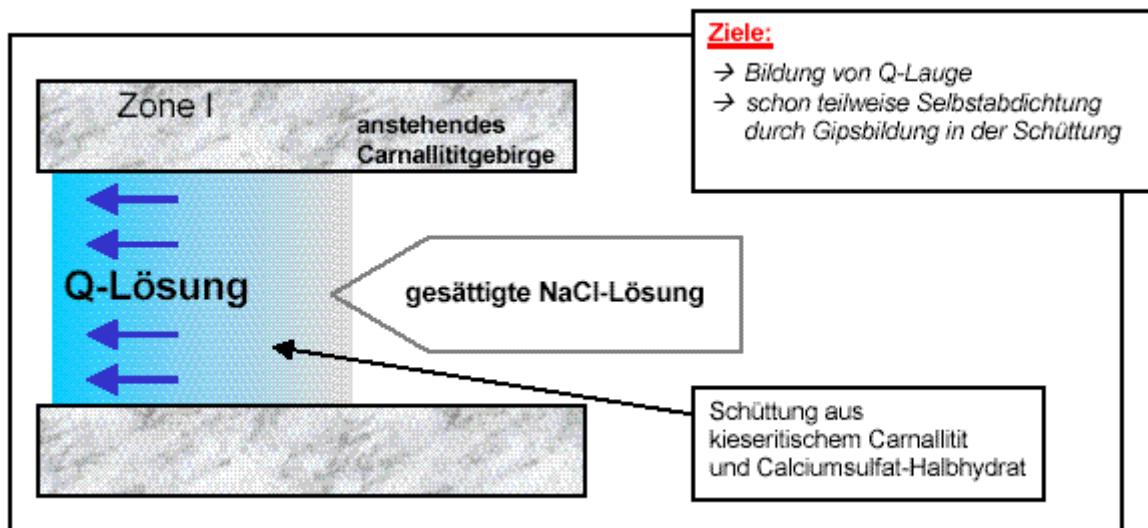
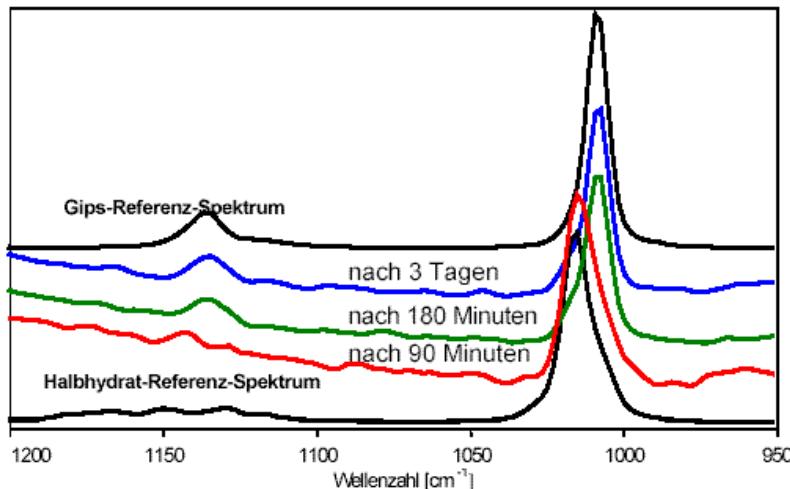


Abb. 33: Schema Zone I

Ausgehend von einer beliebigen ankommenden Salzlösung, z.B. auch eine gesättigte NaCl-Lösung, besteht Zone I aus Carnallit und Calciumsulfat-halbhydrat (HH). Eine ankommende NaCl-Lösung löst Carnallit unter Kristallisieren von NaCl und KCl. Ist der vorgeschrüttete Carnallit kieserithaltig kommt es weiterhin zur Bildung von Kainit. Die sich dabei einstellende Lösungszusammensetzung entspricht dann einer so genannten Q-Lösung, welche aufgrund ihrer Zusammensetzung die Salze Halit, Sylvin, Carnallit und Kainit nicht mehr angreift. Ein solcher Umlöseprozess findet auch schon mit dem anstehenden

Carnallitgebirge entlang der Fließwege statt. In Zone I soll nachträglich das Erreichen einer Q-Lösungs-Zusammensetzung gesichert werden. Gleichzeitig wandelt sich mitaufgeschüttetes HH unter Volumenzunahme in Calciumsulfat-dihydrat (Gips) um, was zu einer ersten "Selbstabdichtung" und mechanischen Stabilisierung der Schüttung führt. Ein schneller Lösungszutritt zu weiteren Dichtelementen wird dadurch eingedämmt.

Versuche zum Reaktionsverhalten von HH führten in gesättigter NaCl - Lösung bei Raumtemperatur relativ schnell zur Gipsbildung, wie beispielhaft in Abb. 34. anhand der RAMAN-Spektren gezeigt wird. Nach 3 Stunden war der Hydratationsprozess unter Verfestigung des Bodenkörpers vollständig abgelaufen (Abb.34). Während der Reaktion kristallisiert optisch sichtbar zusätzlich NaCl aus.



**Abb. 34:** Ausschnitt aus den RAMAN-Spektren während der Umsetzung von HH in ges. NaCl-Lsg.

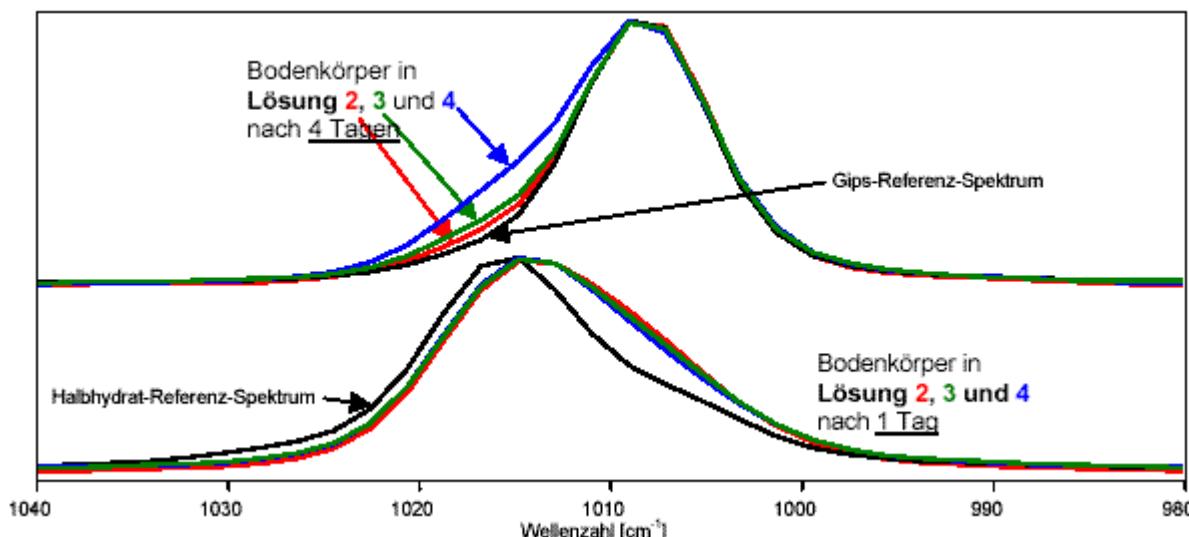
Im Weiteren wurde das Reaktionsverhalten von HH mit Lösungen untersucht, deren Zusammensetzungen zwischen gesättigter NaCl-Lösung und Q-Lösung liegen. Mittels RAMAN-Spektroskopie wurde der Festphasenbestand in-situ tageweise (Tab. 5 und Abb. 35) analysiert. In jedem Fall wurde die Hydratation des HH zu Gips, verbunden mit einer Verfestigung des Bodenkörpers, beobachtet. Durch den Verbrauch an Wasser kommt es außerdem zur Kristallisation von NaCl und teilweise Carnallit. In den Lösungen mit höherem Magnesium- und Chloridgehalt (näher der Q-Lösungszusammensetzung) verlangsamt sich die Umsetzung vom HH zum Gips, wie die RAMAN-Spektren in Abb. 35 verdeutlichen. In Lösung 4 ist demnach der HH-Anteil nach 4 Tagen im Vergleich zu Lösung 2 und 3 noch am größten, nach 1 Woche jedoch ebenfalls komplett in Gips umgewandelt.

**Tabelle 5:** Reaktionsverhalten von  $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5 \text{ H}_2\text{O}$  in Lösungen: ges. NaCl-Lösung → Q-Lösung

Lösung <sup>A)</sup>	Festphasenbestand (in-situ RAMAN-Spektroskopie)			
	nach 1 Tag	nach 2 Tagen	nach 4 Tagen	Nach 7 Tagen
<<1*	Gips, HH	Gips	nicht untersucht	Gips
<1**	HH, wenig Gips	Gips, HH	nicht untersucht	Gips
1	HH	Gips, HH	nicht untersucht	Gips
2	HH, wenig Gips	HH, wenig Gips	Gips, wenig HH	nicht mehr untersucht
3	HH, wenig Gips	Gips, HH	Gips, wenig HH	nicht mehr untersucht
4	HH, wenig Gips	nicht untersucht	Gips, HH	Gips

\*: 75g Carnallit + 100g ges. NaCl-Lösung, <sup>A)</sup> steigender  $\text{MgCl}_2$ -Gehalt von Lösung 1→4

\*\*:100g Carnallit + 100g ges. NaCl-Lösung

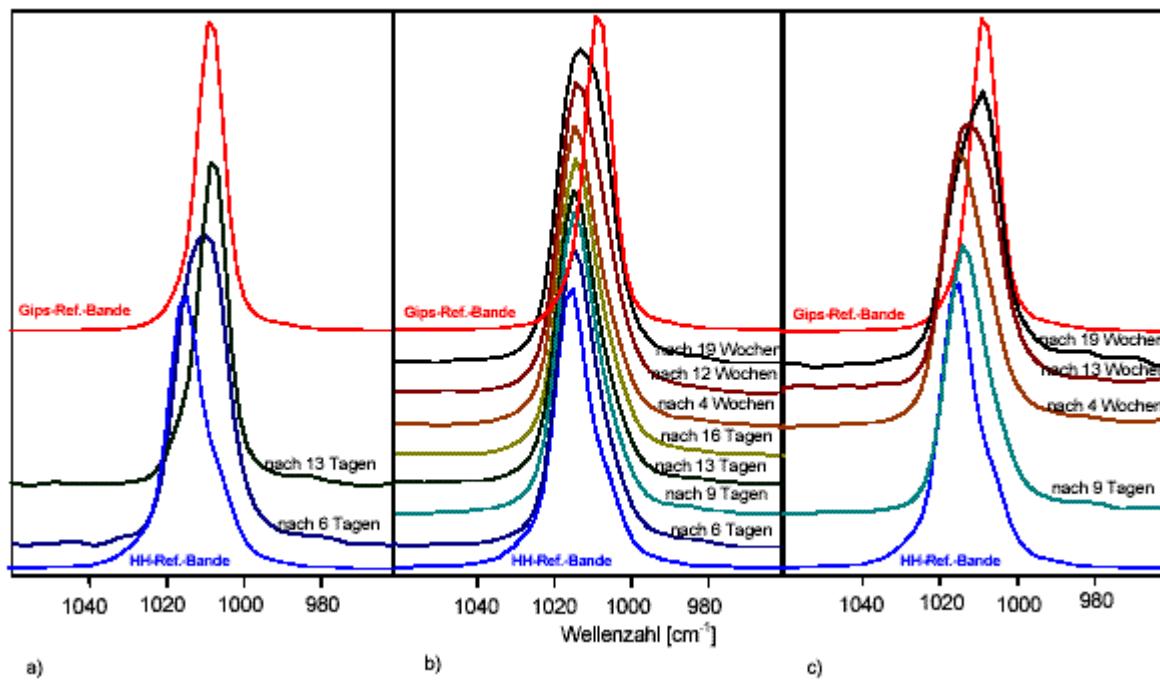


**Abb. 35:** Ausschnitt aus den in-situ RAMAN-Spektren der Bodenkörper: Änderung des HH-Phasenbestands bei der Umsetzung in den Lösungen 2 - 4 nach 1 Tag und nach 4 Tagen

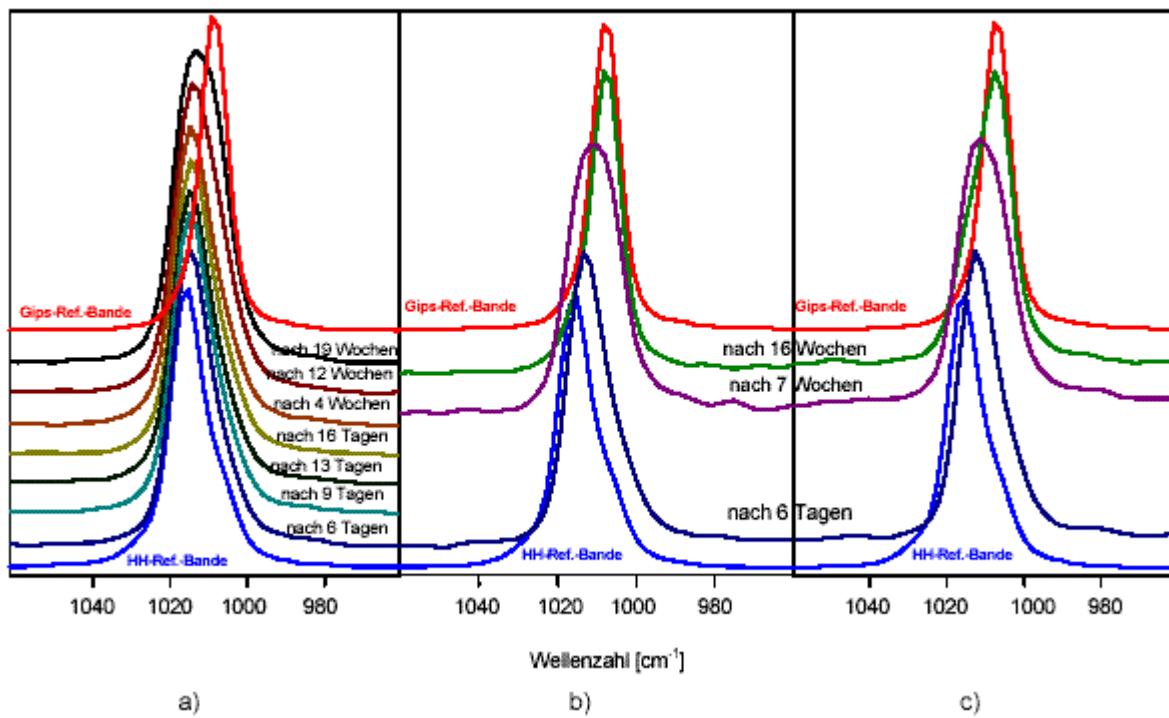
Am Ende der Zone I soll die Umwandlung der gesättigten NaCl-Lösung in Q-Lösung erfolgt sein. Aus diesem Grund wurde auch das Reaktionsverhalten von HH in Q-Lösung untersucht. Dazu wurden eine etwas verdünnte Q-Lösung A1 und eine Q-Lösung A2 mit HH umgesetzt und die Veränderung des Bodenkörpers ramanspektroskopisch verfolgt. Zusätzlich wurde eine Mischung aus HH und synthetischem Carnallit (1:1) mit dem 4-fachen an Lösung A1 umgesetzt, sodass gleichzeitig eine Aufsättigung der Lösung erfolgen konnte und am Ende der Reaktion eine Konzentration annähernd zu A2 erreicht wurde.

Im Fall der Q-Lösung A1 bildet sich das HH innerhalb von 13 Tagen vollständig in Gips um (Abb. 4.5. a). Bedeutend langsamer verläuft die Hydratation in Q-Lösung A2. Hier hat auch nach 19 Wochen noch keine vollständige Umsetzung stattgefunden (Abb. 4.5. b). Im HH-Carnallit-Gemisch ist nach 19 Wochen bereits der größere Anteil HH zu Gips hydratisiert (Abb. 36 c). In allen 3 Ansätzen betrug das Feststoff-Lösungs-Masseverhältnis 1: 4,2. Um den Einfluss dieses Verhältnisses zu untersuchen, wurden für den Fall b): HH in Q-Lösung A2, weitere Umsetzungen im Verhältnis 1 : 65 und 1 : 130 verfolgt (Abb. 37). Im Ergebnis zeigt sich, dass bei einem höheren Lösungsanteil, wobei es keinen Unterschied zwischen den Ansätzen: 1 : 65 und 1 : 130 gibt, das HH bereits nach 16 Wochen vollständig in Gips umgewandelt ist. Mit dem Verhältnis 1 : 4,2 war die Hydratation nach 19 Wochen nur teilweise erfolgt.

Als Resümee der Experimente kann festgestellt werden, dass HH in Q-Lösung zu Gips hydratisiert. Die unvollständige Gipsbildung bei hohem Massenverhältnis HH : Q-Lösung geht auf den Wasserverbrauch zurück. Bei dem gewählten Verhältnis HH/Q-Lösung von 1:4,2 würden der Lösung bei vollständiger Gipsbildung ca. 7% Wasser entzogen. Dies müsste bezogen auf die HH-Masse mit der Kristallisation von ca. 15% Carnallit, 1,8% NaCl und etwas Kainit einhergehen. Ob in diesem Fall eventuell das Überwachsen des HH mit Carnallit oder geringfügige Übersättigungen der Lösung die vollständige Gipsbildung verhindern kann gegenwärtig nicht entschieden werden.



**Abb. 36:** Ausschnitte aus den RAMAN-Spektren zur Detektion der zeitabhängigen Umwandlung von HH zu Gips in Q-Lösungen: a) in "dünnerer" Q-Lösung A1, b) in Q-Lösung A2, c) 1:1 HH-Carnallit-Gemisch in "dünnerer" Q-Lösung A1



**Abb. 37:** Ausschnitte aus den RAMAN-Spektren zur Detektion der zeitabhängigen Umwandlung von HH in Q-Lösung A2 bei unterschiedlichem Feststoff-Lösungs-Verhältnis:  
 a) 1 : 4,2                    b) 1 : 65                    c) 1 : 130

Mit Säulenversuchen wurden Tests bezüglich der Wirkung von HH zur Beeinflussung der Sickergeschwindigkeit zugesetzter ungesättigter Lösung durchgeführt. Von Vorteil ist bei dieser Art der Versuchsdurchführung, dass definierte Fließwege mit bekanntem Fließquerschnitt vorliegen. Es wurde grundsätzlich die Volumenänderung der "Schütt"-Salze

beobachtet, die Änderung der Festphasenzusammensetzung (Schüttsalze) und die Änderung der Lösungszusammensetzung nach Zonendurchgang, sowie die Durchflussrate (DFR) bzw. deren Änderung bestimmt. Insgesamt wurden 8 Säulenversuche durchgeführt (Tabelle 6).

Die jeweils als Säulen eingesetzten Glasrohre mit einer Wandstärke von 2 mm wurden senkrecht positioniert und variierten in der Länge zwischen 330 mm und 500 mm, im Durchmesser zwischen 18 mm und 25 mm. Die Füllstände wurden auf dem Glasrohr markiert. Nach der Feststoffbefüllung wurde in das oben offene Rohr entsprechende Lösung so gefüllt, dass immer ein gewisser Füllstand zu verzeichnen war. Detaillierte Angaben sind in Tabelle 6 finden.

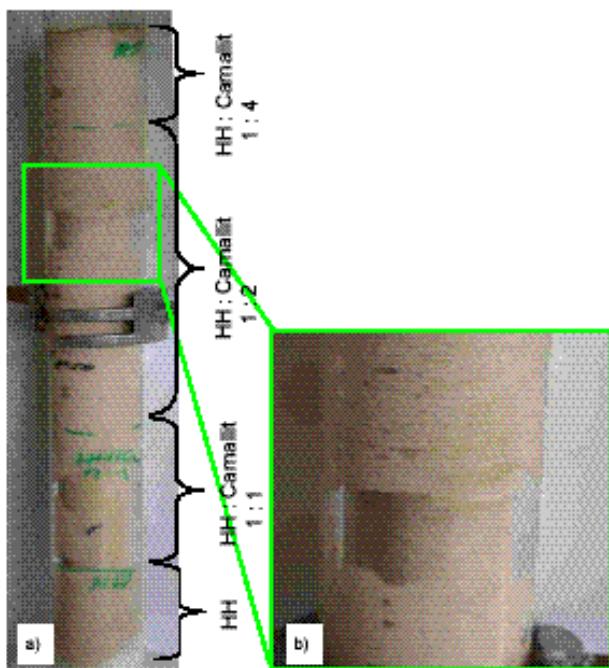
**Tabelle 6:** Säulenversuche

	Säule 1	Säule 2	Säule 3	Säule 4	Säule 5	Säule 6	Säule 7	Säule 8
Länge [mm]: Ø [mm]:	400 25	330 18	360 25	500 23	500 23	500 23	500 23	500 23
zufließende Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	gesätt. NaCl - Lösung	Q-Lösung A2	Q-Lösung A2
Feststoffabfolge								
Menge Füllhöhe	Carnallit 100 g 200 mm	HH 40 g 130 mm	HH/ Carnallit 50g 4:1 FH100 60g 2:1 FH100 40g 1:1 FH90	Carnallit 80 g 175 mm	HH 80 g 140 mm	HH/ Carnallit 60g 4:1 FH10 60g 2:1 FH105 60g 1:1 FH100	Carnallit 100 g 230 mm	HH/ Carnallit 30g 4:1 FH110 60g 2:1 FH110 60g 1:1 FH110
Menge Füllhöhe	HH 123,4 g 200 mm	Carnallit 40g 165 mm	HH 30 g 60 mm	HH 80 g 140 mm	Carnallit 80g 175 mm	HH 60g 100 mm	HH 50g 110 mm	
Lösungs- durchtritt nach	3 h	> 8 h	6,5 h	3 h	n.b.	n.b.	Innerhalb von 30 min	
Anfangs-DFR Ø-DFR	2,9 mL/h 0,6 mL/h	0,8 mL/h 0,3 mL/h →0	0,3 mL/h 0,3 - 0,5 mL/h	n.b.	ca. 0,5 mL/h	ca. 0,5 mL/h →0, nach Erschütterung der Säule: 4 mL/h	50 mL/h 100 mL/h	1mLh 1,4 mLh
inges. zugeführte [mL] Lösung	295	70	325	125	600	550	50	650
Zusammen- setzung [mol/kg H <sub>2</sub> O] der ersten [mL] Austritts- Lösung	Mg <sup>2+</sup> : 4,32 Cl <sup>-</sup> : 9,10 20 mL	nicht bestimmt, da Auskrist. von Carnallit, Gips, NaCl durch Verdunsten	Mg <sup>2+</sup> : 4,24 Cl <sup>-</sup> : 9,03 24 mL	Mg <sup>2+</sup> : 3,76 K <sup>+</sup> : 0,67 Na <sup>+</sup> : 0,58 Cl <sup>-</sup> : 8,75 ca. 20mL	nicht bestimmt, da Auskrist. von Carnallit durch Verdunsten	Mg <sup>2+</sup> : 4,42 K <sup>+</sup> : 0,34 Na <sup>+</sup> : 0,30 Cl <sup>-</sup> : 9,47 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : n.b. * ca. 20mL	Mg <sup>2+</sup> : 4,44 K <sup>+</sup> : 0,305 Na <sup>+</sup> : 0,35 Cl <sup>-</sup> : 9,00 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 0,27	Auskrist. von Carnallit u. Gips Mg <sup>2+</sup> : 4,38 K <sup>+</sup> : 0,17 Na <sup>+</sup> : 0,35 Cl <sup>-</sup> : 9,04 SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 0,12 Ca <sup>2+</sup> in Spuren
resul- tierender Festphasen- bestand (zoniert)	NaCl  Gips (etwas HH) NaCl	Gips (wenig NaCl) NaCl	Gips (etwas HH) NaCl	NaCl  Gips (etwas HH) NaCl	Gips (wenig NaCl) NaCl	Gips (etwas HH) NaCl	Carnallit  HH (etwas Gips) Carnallit	

FH: Füllhöhe [mm];  
DFR: Durchflussrate;  
n.b.: nicht bestimmt;

Beispielhaft sei hier das Ergebnis des Säulenversuches 3 erläutert (Abb.38). Die aufgegebene NaCl-Lösung durchsickerte in dieser Säule Teilzonen aus Mischungen von Carnallit und Halbhydrat, angefangen mit dem Verhältnis 4:1, 2:1 und 1:1. Die Feststoffabfolge wurde mit reinem Halbhydrat als unterste Teilzone in der Säule abgeschlossen (Tabelle 6). Nach dem Lösungsdurchgang weist der durchgängig gebildete Gipskörper (NaCl-Kristallite eingeschlossen) größere Hohlräume auf (Abb. 38 a, b), welche durch das Umlösen des schüttddicht vorgelegenen Carnallits entstanden sind und somit permanente Lösungswegsamkeiten darstellen. Es stellte sich eine geringe Durchflussrate von ca. 0.3-0.5 mL/h ein. Die austretende Lösung weist Magnesium- und Chlorid-Gehalte auf, die einer Q-Lösung entsprechen.

Aus großtechnischen Versuchen (Grube Bischofferode) ist bekannt, dass in einem mit ungesättigter Lösung durchtränktem Haufwerk von Carnallit sich innerhalb einer Woche Q-Lösung gebildet hat. Diese kurze Umwandlungszeit konnte im Labormaßstab anhand der Säulenversuche bestätigt werden. Eine Verdichtung wird durch Reaktion von HH mit NaCl-Lösung erreicht, da bei dieser Lösungszusammensetzung das HH sehr schnell zum Gips abbindet, dabei verdichtet und hohe mechanische Festigkeit erreicht. Dringt in das HH eine Lösung ein, die bereits Q-Lösungscharakter zeigt, erfolgt die Gipsbildung langsamer bei gleichzeitiger Einlagerung kristallisierenden NaCl und Carnallits in das Gefüge. Das resultierende Gipsgefüge ist daher etwas lösungsdurchlässiger, da die Phasengrenzen Gips – Salzkristall permanente Fließwege darstellen, was in Zone durchaus erwünscht ist.

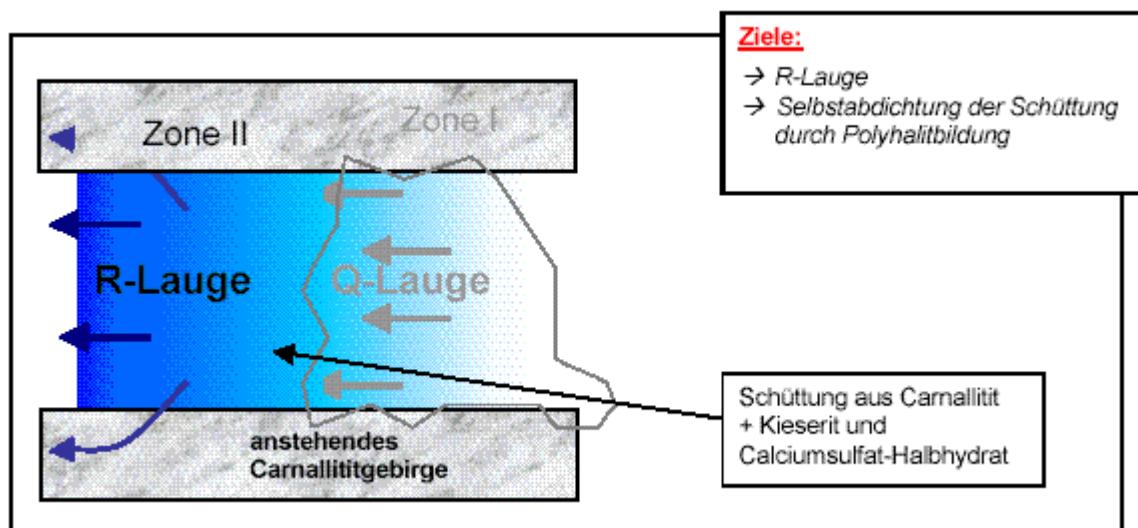
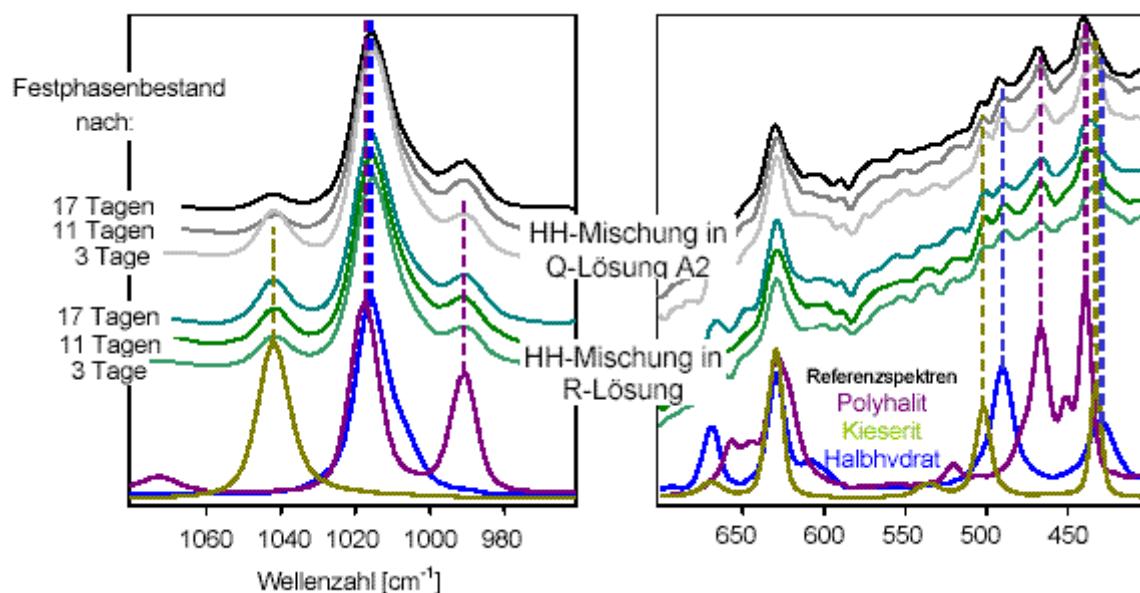


**Abb. 38:** a) Ansicht Säule 3      b) Ausschnitt aus Säule 3 nach Lösungsdurchgang

#### 4.2.2 Zone II

In Abb. 39 sind der Aufbau und das Funktionsprinzip der Zone II dargestellt. Die Schüttung in Zone II ist im Wesentlichen eine Wiederholung der Zone I, wobei der Carnallit aber hier ausreichend Kieserit (mind. 16%) enthalten muss. Die vorerst in Zone I gebildete Q-Lösung wandelt sich unter Auflösung von Kieserit in eine R-Lösung um, in welcher Halit, Carnallit, Kainit und Kieserit beständig sind. Das in der Zone II befindliche HH ist noch etwas mit Kaliumsalz angereichert und kristallisiert bei Lösungszutritt unter Volumenzunahme zu Polyhalit ( $MgSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot 2 CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ) um, was einen weiteren verdichtenden Effekt zur Folge hat.

In einer Vielzahl von Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Polyhalitbildung in Q-Lösung bei Zusatz von kaliumsulfathaltigen Salzen und in R-Lösung ohne Zusätze als auch mit K-Mg-Salzzusätzen abläuft. In Abb. 40 ist das Ergebnis der RAMAN-spektroskopischen Verfolgung der Zeitabhängigkeit der HH-Umwandlung in Polyhalit in Q- und R-Lösung dargestellt. Nach 3 Tagen hat sich bereits Polyhalit gebildet.

**Abb. 39:** Schema Zone II**Abb. 40:** Ausschnitte der RAMAN-Spektren zur Umsetzung von HH mit K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> und Kieserit in R- und Q-Lösung bei 28°C

Die Zusätze von K-Mg-Sulfaten haben beschleunigende Wirkung auf die Polyhalitbildung. Auch in Fall des Einsatzes von Gips als Ausgangsphase, statt HH, konnte die Polyhalitbildung in R-Lösung nachgewiesen werden, aber nicht für Anhydrit.

#### 4.2.3 Zone III

In Abb. 41 ist der Aufbau und das Funktionsprinzip der Zone III dargestellt. Sie besteht aus einer Aufschüttung von wasserarmen CaCl<sub>2</sub>. Trifft R-Lösung auf diese Salzschüttung, entsteht eine MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-Lösung, welche den in größeren Lagen im Carnallit auftretenden Tachyhydrit nicht mehr auflöst. Der Wassergehalt der CaCl<sub>2</sub>-Schüttung ist so optimiert, dass bei Zutritt von R-Lösung keine Wärmeentwicklung zu verzeichnen ist (typischer Effekt von

$\text{CaCl}_2$ -Hydratphasen beim Auflösen) und somit keine Dehydratisationsprozesse am umliegenden Gebirge stattfinden können. Gleichzeitig kristallisieren höhere Hydrate unter Expansion und die Wasseraktivität der anstehenden Lösung wird weiter herabgesetzt.

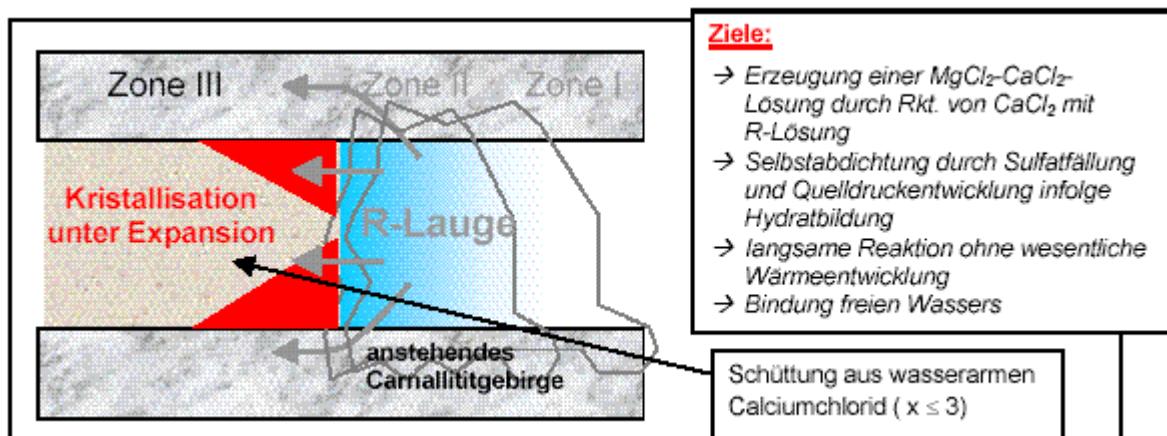


Abb. 41: Schema Zone III

Insgesamt wird mit der 3 Zonen-Vorschüttung eine mehrfache Selbstabdichtung durch Kristallisationseffekte initiiert. Falls am Ende der 3 Zonen-Vorschüttung dennoch Lösung austreten sollte, dann hat diese eine Zusammensetzung erreicht, welche das anliegende Gebirge nur bezüglich des Kieserits kurzeitig anlösen kann. Die Reaktion  $[\text{Ca}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O} + \text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot x \text{H}_2\text{O} + \text{Mg}^{2+} + 2 \text{Cl}^- + (1-x)\text{H}_2\text{O}]$  führt quasi zu einer Umbildung des Kieserits in eine Calciumsulfatphase, welche, wie alle anderen Salzkomponenten des Carnallititgebirges bei weiterem Lösungszutritt nicht mehr aufgelöst wird.

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde gefunden, dass Calciumchlorid mit einem Wassergehalt von 2.75 mol  $\text{H}_2\text{O}$  pro mol  $\text{CaCl}_2$  sich in R-Lösung quasi ohne Temperatureffekt auflöst. Das für die Schüttung einzusetzende  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat wurde daher als „ $\text{CaCl}_2 \cdot 2.75 \text{ H}_2\text{O}$ “ hergestellt (Mischung verschiedener Hydratphasen). In Abhängigkeit vom Hydratwassergehalt kann beim Auflösen von  $\text{CaCl}_2$ -Phasen zum einen Wärmeentwicklung aber auch Abkühlung auftreten. Bekannt waren diese Effekte bisher für das Auflösen in reinem Wasser, nicht jedoch für die hier relevanten Lösungen.

Mit einem  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat wurde ein Säulenversuch durchgeführt und der verdichtende Effekt durch Hydratation des  $\text{CaCl}_2$ -Hydrats in Gegenwart von R-Lösung labormäßig nachgewiesen. Nach einem kurzen Lösungsdurchtritt blieb nach Einsetzen der Reaktion der Rest der R-Lösung im oberen Teil der Säule über dem Hydrat stehen.

Es wurde auch experimentell gezeigt, dass sowohl Reaktionen mit Q- als auch R-Lösung nach 7 Tagen bei 30°C zu Lösungszusammensetzungen führen, welche gegenüber Tachyhydrit stabil sind (Tabelle 7).

Tabelle 7: Lösungszusammensetzungen vor und nach dem Umsatz von Q- und R-Lösung mit  $\text{CaCl}_2 \cdot \text{„}2,75\text{“ H}_2\text{O}$

	Ausgangs-R-Lösung →	nach 7 Tagen bei 30°C	Ausgangs-Q-Lösung A2 →	nach 7 Tagen bei 30°C
		mol/kg $\text{H}_2\text{O}$		
$\text{Mg}^{2+}$	4,87	2,61	4,17	2,70
$\text{Ca}^{2+}$	-	5,36	-	5,31
$\text{Cl}^-$	9,28	16,04	8,59	16,12

Die Tachyhydrit-stabile Lösungszusammensetzung (auch stabil gegenüber Carnallit und NaCl) liegt bei 25 °C im Bereich von 2,85-1,94 mol Mg<sup>2+</sup>/kg H<sub>2</sub>O, 5,05-6,94 mol Ca<sup>2+</sup>/kg H<sub>2</sub>O und 15,80-17,76 mol Cl<sup>-</sup>/kg H<sub>2</sub>O.

#### **4.3 Konsequenzen für den Aufbau einer Vorschüttung**

Die theoretischen und praktischen Untersuchungen belegen, dass es möglich ist, bei Zutritt ungesättigter Lösungen zu einem beliebigen Zeitpunkt durch geeignet gewählte, trockene Aufschüttungen von Mineral- und Bindemittelkombinationen die Lösungszusammensetzungen so zu transformieren, dass Schäden durch Umfließen von Dammbauwerken in der ALZ verhindert werden können. Es kann weiterhin festgestellt werden, dass es zu der im 3-Zonenkonzept vorgesehenen Reihenfolge der Sättigungszustände

1. Q-Lösung
2. R-Lösung
3. MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-Lösung

unter den Bedingungen der Grube Teutschenthal keine Alternative gibt. Carnallit hat von den leichtlöslichen Mineralen den höchsten prozentualen Anteil und daher ist das Erreichen einer Sättigung gegenüber diesem Mineral vordringlich. Dies wird bei einer Aufsättigung von Steinsalzlösung (bzw. einer mehr oder weniger MgCl<sub>2</sub>-haltigen NaCl-Lösung) zuerst und am schnellsten bei einer Zusammensetzung Q erreicht. Kieserit folgt in der Häufigkeitsverteilung dem Carnallit und ist nur gegen Lösungen mit gegenüber Q höheren MgCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub>-Gehalten beständig (= Punkt R), die erst in einem zweiten Schritt der Aufsättigung erzielt werden können. Ein Überspringen des Lösungszustandes R um sofort von Q zu einer MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-Lösung zu gelangen ist nicht ratsam, da dann

- eine Lösung Q mit dehydratisiertem Calciumchlorid unter größerer Wärmeentwicklung reagiert,
- größere Mengen an Calciumchlorid-hydrat eingesetzt werden müssten, die das Lösungsvolumen noch entsprechend vergrößern,
- eine angestrebte Übersättigung bezüglich Tachyhydrit ist kaum realisierbar.

Aus Bilanzrechnungen geht auch hervor, dass eine R-Lösung mit Tachyhydrit und Tachyhydrit-Kieserit-Gemischen nur unter geringfügiger Vergrößerung des Lösungsvolumens reagiert, im Gegensatz zu einer Q-Lösung.

Die Untersuchungen bestätigen fernerhin, dass zum schnellstmöglichen Erreichen der aufeinander folgenden 3 Lösungszustände jeweils spezifische Anforderungen an die in Fließrichtung aufeinanderfolgenden Schüttungen resultieren. Für die Dimensionierung und Wahl der Zusammensetzung der Schüttbereiche sind folgende Ergebnisse und Erkenntnisse von besonderer Bedeutung:

1. Beim Durchlaufen einer NaCl-Lösung durch ein Carnallithaufwerk wird die Zusammensetzung Q im Verlauf von 1 – 3 Tagen sicher erreicht, wenn Maßnahmen zur Vergleichmäßigung und Verlangsamung des Lösungsflusses getroffen werden. Für stabile Fließbedingungen sind auf Grund des Volumenschwundes geeignete Maßnahmen zur mechanischen Stabilisierung des Haufwerkes vorzusehen.
2. Die Aufkonzentrierung einer Q-Lösung zu einer R-Lösung mit Carnallitit der üblichen Kieseritgehalte zwischen 10–15 % erfordert wesentlich längere Zeiträume, großenordnungsmäßig etwa 2 Jahre [24], wenn nicht Maßnahmen für ein wesentlich erhöhtes Angebot an Kieseritlösefläche getroffen werden.

3. HH in Form von handelsüblichem Stuckgips geht mit den Salzlösungen und befeuchteten Salzgemischen Reaktionen ein, die zur Verfestigung und Verdichtung durch Volumenzuwachs führen. Die Geschwindigkeit der Umsetzung und die Art der Reaktionsprodukte (Gips, Polyhalit) hängen von der Zusammensetzung der Salzlösung ab. Die Reaktionen sind nur von geringer Wärmeentwicklung begleitet.
4. Eine R-Lösung kann mit Calciumchlorid niedrigen Wassergehaltes ( $2.5 - 3.0 \text{ mol/CaCl}_2$ ) thermoneutral in eine Lösung überführt werden, die weder Tachyhydrit noch Carnallit angreift bzw. aus der Tachyhydrit auskristallisiert.

Das Verhalten von Calciumsulfat-Halbhydrat kann ausgenutzt werden, um

- a) die Schüttung in Zone I mechanisch zu stabilisieren,
- b) die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren,
- c) durch Polyhalitbildung in Zone II den Lösungszustrom in Richtung Dammbauwerk weiter zu reduzieren,
- d) den Rückfluß von konzentrierter Salzlösung (Q, R) in die Kavernen zu verhindern oder zu verzögern.

Je nach angestrebter Wirkung kann das Halbhydrat als eigenständiger Schüttbereich vor der Zone I, zwischen Zone I und II sowie innerhalb der Zone II eingebaut werden. Besonders wichtig erscheint der Einsatz von Halbhydrat zur mechanischen Stabilisierung in Zone I. Wie aus den Säulenversuchen abgeleitet werden kann, sollte dies durch Zumischen zum Carnallit mit Gehalten von etwa 50 % Halbhydrat möglich sein.

## 5 Wirkprinzipien und Möglichkeiten für eine langzeitliche Ertüchtigung der ALZ\*

Neben der Sicherung der Sättigung der anstehenden Lösungen mit dem umliegenden Salzgestein ist die Abdichtung des Streckenquerschnittes einschließlich des Kontaktbereiches und der ALZ durch geeignete technische Mittel zu erreichen. Eine Analyse der favorisierten Prinzipien zur langzeitlichen Ertüchtigung der ALZ und des unmittelbaren Kontaktbereiches ist im Abschnitt 1 vorgenommen worden. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist, deren Machbarkeit zu prüfen und Schlussfolgerungen für das Grundkonzept eines langzeitstabilen Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgestein abzuleiten.

### 5.1 In situ Untersuchungen zur Ausbildung der ALZ und ihrer prinzipiellen Abdichtbarkeit<sup>†</sup>

Streckenauffahrungen im Carnallitit sind allgemein durch mehr oder weniger starke Auswitterungsbereiche an der Streckenkontur gekennzeichnet. Diese Erscheinungen werden zum einen durch die generell um Streckenauffahrungen vorhandene konturnahe Auflockerungszone begünstigt. Andererseits werden die Prozesse durch die vorhandenen sensibel auf Feuchtigkeit reagierenden Salzminerale, wie beispielsweise Tachyhydrit und Kieserit überlagert und verstärkt. Die Tiefenerstreckung der geomechanisch und durch Feuchtigkeitseinwirkungen beeinflussten Zone ist damit im Wesentlichen abhängig von folgenden Faktoren:

- mechanische Eigenschaften des anstehenden Materials,
- geomechanische Randbedingungen und Einflüsse aus dem Nahfeld sowie
- geologisch/ mineralogisch Ausbildung des Wirtsgesteins.

Auf der Basis der im folgenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen werden Aussagen zur Tiefenerstreckung und räumlichen Ausbildung der durch Feuchtigkeitseinwirkungen beeinflussten Zone möglich.

#### 5.1.1 Bestimmung der Stoßsensibilität und Einsatz von Schutzmedien

Das Salzgestein Carnallitit ist stark hygroskopisch und reagiert damit sehr sensibel auf die vorhandene Feuchtigkeit in den Grubenwätern. Es bildet sich zeitabhängig zusätzlich zur geomechanisch bedingten ALZ eine durch Feuchtigkeit beeinflusste Zone um Streckenauffahrungen heraus.

Für den Bau von Streckenabdichtungen ist es in jedem Falle notwendig, konturnahe Auflockerungszonen um die abzudichtende Streckenauffahrung zu entfernen, um Umläufigkeiten zu verhindern. Damit wird der freigelegte Gebirgsstoß den Einflüssen der Grubenwetter ausgesetzt. Der ungeschützte Gebirgsstoß nimmt aus den Grubenwätern einen gewissen Feuchtigkeitsanteil auf. Dabei ändern sich die mechanischen Eigenschaften und der Feuchtegehalt des Carnallititstoßes in Abhängigkeit von der freien Standzeit und dem Feuchtegehalt der Grubenwetter.

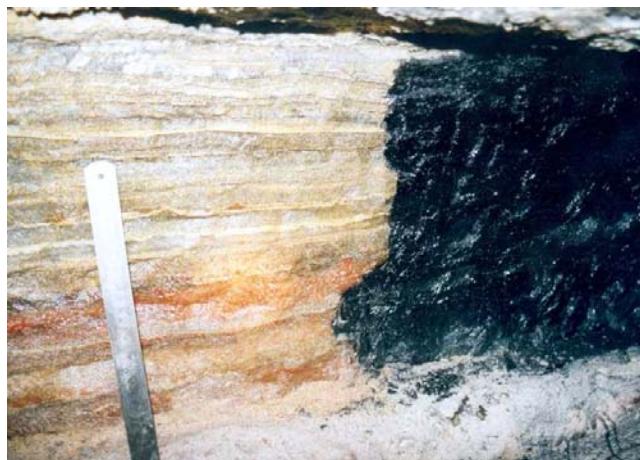
\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 5:

Sitz, P.; Gruner, M.; Kawka, A.; Wasowicz, B.: Wirkprinzipien und Möglichkeiten für eine langzeitliche Ertüchtigung der ALZ. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Oktober 2004.

† Siehe auch ausführlicher Teilbericht zu AP 2:

Seifert, G.; Fliss, Th.; Döhner, Chr.: Analyse der Wirkungsbedingungen und Ableitung der Anforderungen. KUTEC Sondershausen, September 2004.

Für den Einbau der Streckendichtung stellt die Sensibilität des Carnallititstoßes gegenüber den Grubenwettern eine wichtige Randbedingung dar. Die mögliche freie Standzeit zwischen dem Ausräumen der ALZ und dem Einbau der Dichtung wird durch diese Eigenschaft bestimmt.



**Abb. 42:** Detailaufnahme Horizontalschlitz Grenzbereich unbeschichteter - beschichteter Stoß

Die Sensibilität des Carnallititstoßes kann mit folgendem Verfahren ohne größeren Aufwand abgeschätzt werden:

1. Ausspitzen der aufgelockerten Zone und Messung des Feuchtegehaltes
2. Überwachung des Feuchtegehaltes der Grubenwetter (wenn möglich permanent)
3. Beobachtung der Probenahmestelle und Dokumentation der Veränderungen.

Weiterhin kann die Wirksamkeit eines Schutzmediums bspw. einer Stoßbeschichtung mit diesem Verfahren untersucht werden (Abb. 42).

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden Stoßsensibilitätsuntersuchungen in einem horizontalen Schlitz (Schichten mit hohen Tachyhydritgehalten bis ca. 40 %) und einem vertikalen Schlitz etwa ab Spätbank bis 2,0 m über Spätbank durchgeführt.

Die Tachyhydrit-Kieseritschnüre zeigten dabei am unbeschichteten Stoß nach 14 Tagen Verwitterungerscheinungen bis in max. 8 mm Tiefe, während die übrige Fläche nur etwa 2 mm tief angewittert wurde. Nach 55 Tagen wiesen die Tachyhydrit-Kieseritschnüre Zersetzungerscheinungen bis in max. 14 mm Tiefe auf. Der Bitumenanstrich im Bereich der Tachyhydrit-Kieseritschichten zeigte Löcher. Im Bereich der carnallitreichereren Schichten deckte der Bitumenanstrich die Oberfläche gut ab. Es konnten hier keine Löcher beobachtet werden.

Aus den Untersuchungen im vertikalen und im horizontalen Schlitz können zusammengefasst die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Unbeschichtete Stoßbereiche können Feuchtegehalte zwischen 0,3 und 2,36 % aufweisen, wobei bei den untersuchten Proben meist ein Feuchtegehalt >1 % bestimmt wurde. Bereits nach 14 Tagen sind Verwitterungerscheinungen bis in max. 8 mm Tiefe zu beobachten.
- Die ermittelten Feuchtegehalte des beschichteten Stoßes liegen unter 0,5 %.

### 5.1.2 Bestimmung von Feuchtigkeitsprofilen an in situ Proben

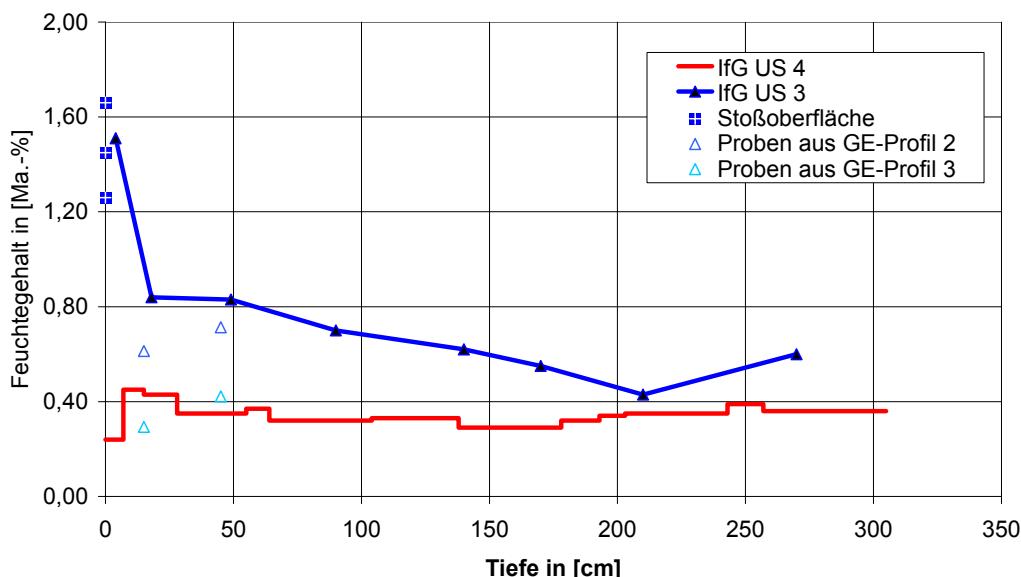
Ziel dieser Untersuchungen ist die Bestimmung der Ausdehnung der stoßnahen durchfeuchteten Zone über direkte Probenentnahmen.

Die Probenentnahme für die Feuchtigkeitsprofile erfolgte an erbohrten Kernmärschen der Bohrungen IfG US 3 und IfG US 4 im Labor. Der Ansatzpunkt der horizontalen Bohrung IfG US 3 liegt im Bereich der Schicht 3 mit Tachyhydritgehalten zwischen 15 und 30 %. Bei der Bohrung IfG US 4 handelt es sich um eine der Hochbohrungen an deren Kernmarsch bereits die Mineralanalysen durchgeführt wurden.

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes kam ein Verfahren zur Anwendung, dass auf der Karl-Fischer Methode basiert. Das Probenmaterial wird über einem Gasstrom bei einer konstanten Temperatur von 35 °C getrocknet. Der durch den Gasstrom aufgenommene Feuchtigkeitsanteil wird mittels Karl-Fischer Methode elektrochemisch bestimmt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt mit denen die erforderliche Trocknungsdauer bis zur Massekonstanz bei der entsprechenden Temperatur bestimmt wurde.

Zur Überprüfung der Messwerte aus den geophysikalischen Untersuchungen führte die K-UTEC Versuche zur Bestimmung von Feuchtegehalten in verschiedenen Tiefenlagen hinter der Stoßkontur mit Hilfe eines speziellen Probenentnahmeverfahrens durch. Die Entnahme der Proben erfolgte aus Bohrlöchern in der entsprechenden Zieltiefe in Bereichen der Geoelektrikprofile 2 und 3.

#### Feuchtigkeitsprofile Kernmärsche Bohrungen IfG US 3 und 4



**Abb. 43:** Feuchtegehalte Schlitzproben, in situ-Proben aus GE-Profil 2 und Feuchtigkeitsprofile der Bohrungen IfG US 3 und 4

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Feuchtigkeitsprofilen am Versuchsstandort Montagekammer werden im Folgenden kurz zusammengefasst (Abb. 43):

- Die Feuchtegehalte liegen im untersuchten Stoßbereich der Bohrung IfG US 4 bis in 2,7 m Tiefe deutlich über den Gehalten im Firstprofil. Weiterhin kann im Stoßprofil tendenziell eine tiefenabhängige Abnahme im Feuchtegehalt beobachtet werden. Der

konturnah gemessene Feuchtegehalt im Stoßprofil liegt im Bereich der im vertikalen Untersuchungsschlitz festgestellten Feuchtegehalte.

- Im Firstprofil kann keine tiefenabhängige Abnahme des Feuchtegehaltes festgestellt werden.

Die unterschiedliche Ausbildung der durchfeuchteten Zone im Bereich der Schicht 3 (GE-Profil 2) und der Schicht 12 (GE-Profil 3) wird durch die Feuchtegehalte der in situ entnommenen Proben bestätigt. Die direkte Korrelation der Indikationen der beiden Verfahren Geoelektrik und Feuchtgehaltsanalyse stellt einen wesentlichen Schritt für die Bereitstellung eines nicht invasiven Verfahrens zur Bestimmung der durch Feuchtigkeit induzierten Umwandlungsprozesse in der ALZ im Zusammenhang mit der Bewertung bzw. Festlegung der Dammstandorte dar.

### **5.1.3 Georadarerkundung der konturnahen Auflockerungszone**

Das Georadar (auch Gesteins- oder Bodenradar) gehört zu den Impuls-Echolot-Verfahren und arbeitet mit elektromagnetischen Wellen im Hochfrequenzbereich zwischen 10 MHz und 2,5 GHz. Das zerstörungsfreie Messprinzip beruht darauf, dass von einer Sendeantenne (Transmitter) kurze elektromagnetische Impulse mit einer Länge von wenigen Nanosekunden in den Untergrund abgestrahlt werden. Trifft die sich im Gesteinsmedium ausbreitende Welle auf eine elektrische Diskontinuitätsfläche, so wird ein Teil der Energie reflektiert und zur Empfängerantenne (Receiver) zurückgestrahlt. Über eine Steuereinheit wird das Signal verstärkt, aufbereitet und registriert. Aus der gemessenen Laufzeit des Signals vom Startzeitpunkt bis zum Eintreffen der reflektierten Welle kann bei Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium auf die Tiefe des nachgewiesenen Reflektors geschlossen werden.

Zur Überprüfung der Eignung des Radarmessverfahrens wurden am Referenzversuchsort Montagekammer orientierende Untersuchungen durchgeführt. Die Messungen wurden mit einer SIR-10A Apparatur der Fa. GSSI durchgeführt. Es kamen dabei eine 400 MHz- und eine 900 MHz- Antenne zum Einsatz.

In den Untersuchungen konnten in den vermessenen Profilen 2 markante Bereiche detektiert werden. Der Reflektor A kennzeichnet den Übergang eines stoßnahen Bereichs mit deutlichen Reflexionen in eine reflexionsarme Zone. Der Übergang dieser reflexionsarmen Zone in einen weiteren Bereich mit wieder deutlich sichtbaren Reflexionen wird als Reflektor B gekennzeichnet. Die Tiefenlage von Reflektor A bewegt sich zwischen 0,12 und 0,16 m und korrespondiert mit der beobachteten Feuchtezone an den Kernmärschen. Der Reflektor B kann in 0,44 und 0,60 m Tiefe beobachtet werden. Hier steigen die gemessenen Ultraschallwellengeschwindigkeiten (IfG) deutlich an. Im Firstbereich sind die Teufenlagen der Reflektoren A (ca. 0,10 m) und B (0,10 bis 0,3 m) gegenüber den Messungen an den Stößen deutlich kleiner.

### **5.1.4 Geoelektrische Tomographie zur Standortcharakterisierung und zum Versuchsmonitoring**

Das methodische Konzept der geoelektrischen Widerstandsverfahren besteht darin, dass allgemein die gemessene horizontale bzw. vertikale Verteilung der spezifischen elektrischen Gesteinswiderstände in lithologisch-strukturelle Informationen transformiert wird. Als Spezialvariante der geoelektrischen Verfahren kombiniert die Geoelektrische Tomographie gewissermaßen Tiefensondierung (VES) und Kartierung herkömmlicher Konfigurationen und liefert mit Hilfe moderner 2D-Inversionssoftware einen 2-dimensionalen Tiefenschnitt des Untergrundes. Die hohe Informationsdichte gewährleistet insbesondere bei kleinräumiger Variation der Verhältnisse eine höhere Aussagesicherheit. Die Feldmessung erfolgt mit Multielektroden-Spezialmesskabel und einer rechnergesteuerten Geoelektrikapparatur.

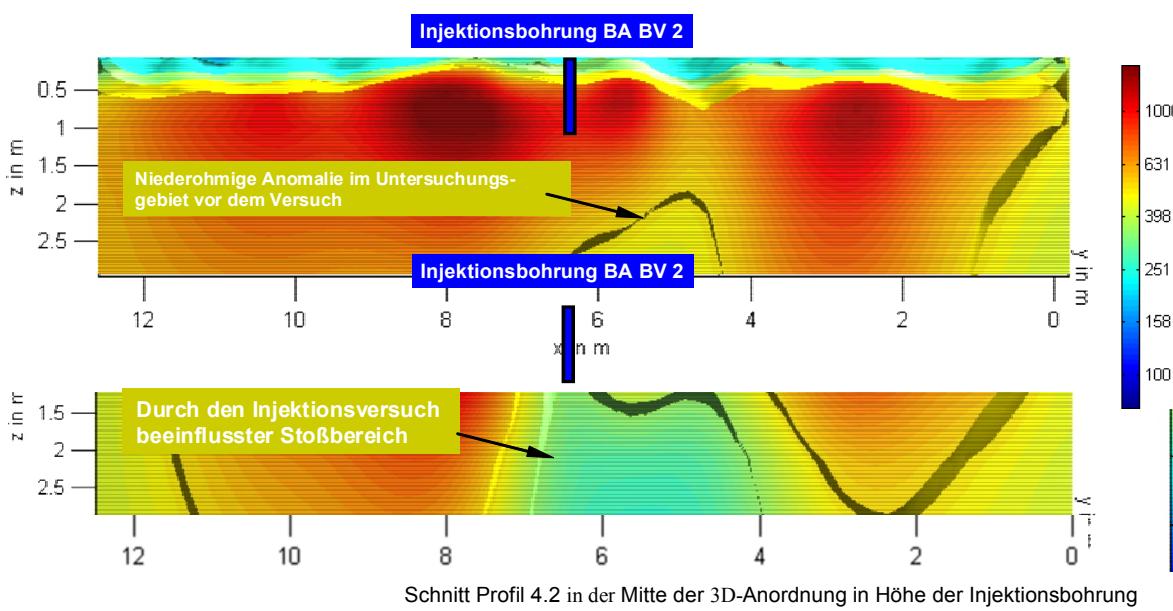
Durch die K-UTEK wurden im Bereich des Referenzversuchsortes zur Bestimmung durchfeuchteter Konturbereiche 4 geoelektrische Messprofile installiert. Die Profile besitzen im Allgemeinen 64 Elektroden und haben bei einem Elektrodenabstand von 20 cm jeweils eine Gesamtlänge von 12,60 m. Die Messungen erfolgten mit einer schwedischen Apparatur Terrameter SAS 4000 mit dem Switchsystem ES10-64. Bei der Messkonfiguration handelte es sich in der Regel um optimierte Dipol-Dipol-Aufstellung.

Bei den Messungen am Profil 2 und 3 zeigte sich, dass die Horizonte oberhalb der Spätbank, insbesondere die markanten Kieserit-Tachyhydrit-Bänder (Schichten 4 und 6) mit Tiefen bis 0,6 m eine größere Tiefenerstreckung des durchfeuchteten Bereichs aufweisen als die unterhalb der Spätbank gelegenen Bereiche der Schicht 12.

Mit der Messung am Geoelektrikprofil 3 (SE-Stoß) konnten die vorhandenen Versuchseinrichtungen (Injektionsbohrlöcher des IfBB TU BAF) in ihrer geometrischen Lage nachgewiesen werden. Die detektierten Anomalien zeigten dabei minimale Widerstände von kleiner 100  $\Omega\text{m}$ .

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Geophysik der Universität Clausthal erfolgten Laboruntersuchungen an einer Carnallititprobe aus einem Schichtbereich mit Tachyhydritgehalten <20 %. Die Probe stammte aus einer Tiefe von etwa 0,80 m und wies im trockenen Zustand einen Widerstand von ca. 2800  $\Omega\text{m}$  auf. Der Anstieg des Widerstandes auf 9000  $\Omega\text{m}$  bei Trocknung der Probe lässt auf einen enthaltenen Fluidanteil schließen. Ein Probekörper unter Laboratmosphäre, vergleichbar mit dem Grubenklima am Versuchsort, zeigt einen raschen Abfall der gemessenen Widerstände auf 50  $\Omega\text{m}$ .

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Bergbau der Universität Bergakademie Freiberg erfolgte eine Standortauswahl sowie ein Versuchsmonitoring über die 3D-Geoelektrikmessung am Nordstoß des Versuchsortes (Messprofil 4 bestehend aus den Einzelprofilen 4.1 bis 4.3). Die orientierenden Messungen vor dem Injektionsversuch wiesen dabei deutlich auf eine bestehende Anomalie mit Widerständen <600  $\Omega\text{m}$  im unbeeinflussten Stoß hin (Abb. 44 oben). Es erfolgte eine Präzisierung des Bohrortes für die Injektionsbohrung. Über die Messungen während des Injektionsversuchs BV 2 (IfBB TU BAF) konnte eine deutliche Beeinflussung bestimmter Konturbereiche durch die eingepresste Lauge ausgewiesen werden.



**Abb. 44:** Widerstandsverteilung (scheinbarer spez. Widerstand in  $\Omega\text{m}$ ) der Nullmessung (oben) und Widerstandsverteilung nach dem Injektionsversuch (unten)

Im Bereich der Bohrung bildet sich als Folge der Injektion eine trichterförmige niederohmige Anomalie bis in das Bohrlochtiefste aus (Abb. 44 unten). Durch die Injektionsmaßnahmen erfolgte weiterhin eine deutliche Beeinflussung der bereits vorhandenen niederohmigen Anomalie zwischen Profilmeter  $x = 4,0$  und  $5,0$  ab einer Tiefe von etwa  $1,5$  m mit gemessenen Widerständen von  $<350 \Omega\text{m}$ . Der gesamte durch die Injektion beeinflusste Bereich liegt im Profil zwischen  $x = 4,0$  und  $7,0$  m mit Widerständen  $<350 \Omega\text{m}$ . Aufgrund der Ausbildung der niederohmigen Zone und den Messwerten aus den benachbarten Bereichen kann angenommen werden, dass die Erstreckung des beeinflussten Bereiches über die realisierbare Erkundungstiefe hinausgeht.

## 5.2 Vergütung der ALZ durch Penetration / Injektion

Für ein Material zur Vergütung der ALZ gelten folgende Hauptanforderungen:

- Langzeitstabilität gegenüber R-Lösung und  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösungen,
- keine Wechselwirkungen zwischen Anmachflüssigkeit und anstehendem Gebirge,
- Injektionsfähigkeit in Rissweiten bis ca.  $30 \mu\text{m}$ .

Im Ergebnis der Vorbetrachtungen (siehe Abschnitt 1.4, Tabelle 2) wurden für die Vergütung der ALZ folgende Materialien favorisiert:

- Suspensionen aus R-Lösung und hochfeinem  $\text{MgO}$ ,
- Spezialbitumina,
- Destillationsbitumen.

Beim Einsatz von Destillationsbitumen sind die Flüssigkeitseigenschaften, die hohe Viskosität bzw. die erforderliche hohe Einbringtemperatur zu beachten. Hierbei resultieren Einschränkungen für den Einsatz als Injektionsmaterial. Aus diesem Grunde wird auf den Einsatz von erhitzten Destillationsbitumen zur Gebirgsinjektion nicht näher eingegangen.

Auf den Einsatz von Kunstharzen wurde aufgrund ungeklärter Fragen der Langzeitstabilität / Alterungsbeständigkeit verzichtet. Für temporäre Aufgaben ist jedoch der Einsatz von Kunstharzen nicht ausgeschlossen und könnte zukünftig betrachtet werden.

Die Ergebnisse der Eignungsuntersuchungen der favorisierten Materialien ( $\text{MgO}$ -Systeme, Spezialbitumen) werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

### 5.2.1 MgO-Systeme

Die Langzeitstabilität von  $\text{MgO}$ -Systemen gegenüber den anstehenden Mg-haltigen Lösungen ist gegeben. Einschränkungen bestehen nur bei reinen Steinsalzlösungen [25]. Dieser Fall ist an Standorten mit anstehenden Carnallitit oder Kieserit jedoch nicht zutreffend.

Da es keine Gleichgewichtslösung zu allen Bestandteilen des anliegenden Gebirges gibt, wurde als Anmachflüssigkeit R-Lösung ausgewählt. Vorversuche mit gegenüber Tachyhydrit gesättigter  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösung zeigten Probleme bei Aushärtvorgang der  $\text{MgO}$ -Binder, so dass diese Variante nicht weiter verfolgt wurde. Im Tachyhydritreichen Gebirge kann es allerdings mit der R-Lösung zu selektiven Löseerscheinungen am Tachyhydrit kommen.

Für Injektionen bei einer Spaltweite von  $30 \mu\text{m}$  darf die maximale Korngröße des  $\text{MgO}$  höchstens  $10 \mu\text{m}$  betragen bzw. sollen  $90\%$  eine Korngröße unter  $6 \mu\text{m}$  haben.

Handelsübliche MgO-Binder besitzen eine Korngröße  $d_{50} < (15 – 25) \mu\text{m}$ . Die max. Korngröße variiert und kann  $100 \mu\text{m}$  erreichen. Deshalb ist für den vorliegenden Anwendungsfall eine Zerkleinerung (Aufmahlung) und Klassierung des MgO erforderlich.

Als Referenzmaterial wurde MgO 921 der Fa. Lutz GmbH eingesetzt. Das Originalmaterial hat einen  $d_{90}$ -Wert von  $54 \mu\text{m}$ . Für die vorliegende Zielstellung ist dieses Material zu grobkörnig und muss aufgemahlen werden.

In früheren Untersuchungen [26] wurde aus handelsüblichem Magnesiabinder (Fa. Grolmann) mit einem  $d_{90}$ -Wert von ca.  $60 \mu\text{m}$  ( $d_{\max} = 88 \mu\text{m}$ ) ein hochfeines MgO mit einem  $d_{90}$ -Wert von ca.  $12 \mu\text{m}$  ( $d_{\max} = 19 \mu\text{m}$ ) hergestellt. Mit diesem Material wurde in einem Spaltmodellversuch eine minimale Spaltbreite von ca.  $80 \mu\text{m}$  ermittelt, bei der ein Verpressen der Risse ohne Entmischung der Suspension und ohne Bildung eines Filterkuchens möglich war.

Aus dem MgO 921 der Fa. Lutz GmbH konnte durch Windsichten eine Fraktion mit 90 % unter  $11,36 \mu\text{m}$  separiert werden. Das übrige Material wurde in einer Kugelschwingmühle auf eine Korngröße unter  $10 \mu\text{m}$  zerkleinert. Das gemahlene Material hatte einen  $d_{90}$ -Wert von  $8,17 \mu\text{m}$ .

Mit dem aufbereitetem Material wurden unterschiedliche Suspensionen mit R-Lösung hergestellt. Da der  $\text{Mg}^{2+}$ -Gehalt der R-Lösung (ca.  $82 \text{ g/l Mg}^{2+}$ ) vorgegeben ist, resultiert aus diesem  $\text{Mg}^{2+}$ -Gehalt der R-Lösung bei den für die Reaktion erforderlichen Verhältnis  $\text{MgO/Mg}^{2+}$  immer ein entsprechendes Verhältnis Bindemittel zu Lösung. Analog zum W/Z-Faktor wird nachfolgend das Verhältnis Lösung : Bindemittel betrachtet. Injektionsmaterialien haben einen höheren Anteil Lösung, d. h. man arbeitet am untersten Limit des MgO-Gehaltes. Im Ergebnis von Viskositätsuntersuchungen wurde ein optimales das Verhältnis R-Lösung : MgO im Bereich zwischen  $2,0 \text{ l/kg}$  und  $2,6 \text{ l/kg}$  ermittelt. Der Erstarrungsbeginn dieser Mischungen lag im Bereich zwischen 8 und 10 h. Das Erstarrungsende lag ca. 2 h nach Erstarrungsbeginn.

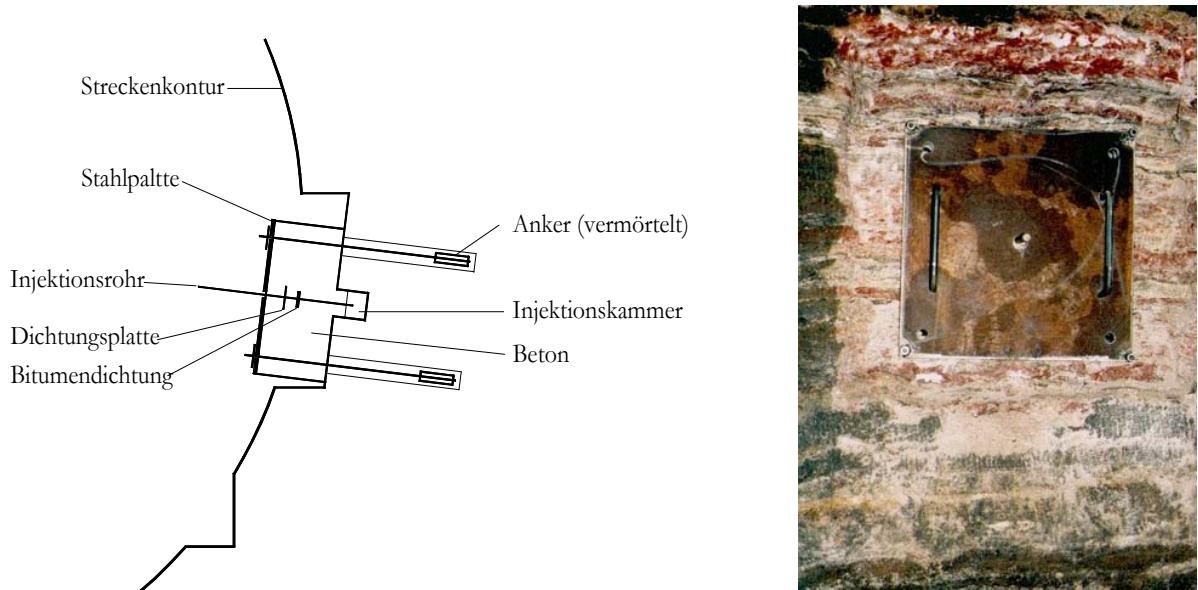
Mit diesen Mischungen wurden Injektionsversuche mit einem Spaltmodell bei einer Spaltweite von  $30 \mu\text{m}$  durchgeführt. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 8.

Durch das Aufmahlen des MgO auf einen Korngrößenbereich mit 90 % unter  $10 \mu\text{m}$  wurde ein Ausgangsprodukt geschaffen, dass sich auch in Spaltweiten von  $30 \mu\text{m}$  verpressen lässt. Bei einer Zusammensetzung von ca. 2 Liter R-Lösung je kg MgO erreicht man eine über 3,5 Stunden gut verarbeitbare Suspension. Die Druckfestigkeit der erstarrten Körper erreicht ca.  $42 \text{ MPa}$ . Nach anfänglichen Schwinden wird eine Längenänderung von ca.  $5 \text{ mm/m}$  (Quellen) erreicht.

**Tabelle 8:** Ergebnisse der Injektionsversuche mit hochfeinen MgO-Suspensionen im Spaltmodell

Versuch	Zeit nach Anröhren [h]	Auslaufzeit [s]	Injektionsdruck [bar]
2,0 Liter R-Lösung / kg MgO	0	76	3,3
	1	83	3,3
	2	88	3,3
	3	93	4,5
	4	112	4,5
2,6 Liter R-Lösung / kg MgO	0	66	2,5
	2	71	2,2
	3	74	2,3
	4	75	2,2
	5	84	2,6

Mit diesem Material wurden *in situ* Versuche zum Vergüten der ALZ und der Kontaktzone zwischen Gebirge und einem technischen Bauwerk aus MgO-Beton durchgeführt [27]. Der MgO-Beton entsprach der Rezeptur MB3 mit 20 % MgO (siehe Abschnitt 6). Die Versuchseinrichtung des Oberflächeninjektionspackers (siehe Abb. 45) bietet die Möglichkeit, Untersuchungen am Verbund Streckendichtung – Gebirge ohne Maßstabseffekte direkt vor Ort durchzuführen. Es wurden verschiedene Injektionsmedien, Dichtelementmaterialien und Injektionsprinzipien (parallele und radiale Injektion) untersucht.



**Abb. 45:** Aufbau des Oberflächenpackers – Schnittdarstellung (links) und Draufsicht (rechts) [27]

Allerdings konnte eine Abdichtung des Oberflächenpackers mit der MgO-Suspension nicht erreicht werden. Der Grund hierfür ist vermutlich das ungeeignete Injektionsmedium, da die Suspension eigentlich auf das Eindringen in sehr dünne Spalten unterhalb eines mm eingestellt ist. Die sichtbaren Wegsamkeiten im Konturbereich des Gebirges und am Packer bewegen sich dagegen im 'mm' bis 'cm' Bereich.

Ein weiteres Problem ist, dass die als Anmachflüssigkeit der MgO-Suspension eingesetzte R-Lauge mit Tachyhydrit nicht im Gleichgewicht steht. Dadurch kann es zu selektiven Löseerscheinungen und zu einer Erweiterung der Wegsamkeiten kommen. Prinzipiell ist dieses Problem nicht lösbar, da es keine Salzlösung gibt, die mit allen Komponenten (Carnallitit, Kieserit, Tachyhydrit) im Gleichgewicht steht. Auch die Verwendung einer gesättigten  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$  – Lösung bringt keine prinzipielle Verbesserung, da hier zwar Tachyhydrit nicht angelöst wird, aber in kieserithaltigen Bereichen eine Erweiterung der Fließwege eintritt. Dieser Effekt wird aber geringer eingeschätzt, als bei Verwendung von R-Lösung als Anmachflüssigkeit. Allerdings ist das Abbindeverhalten von MgO in  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$  – Lösung problematisch (siehe Abschnitt 6.1) und lässt noch eine Reihe von Fragen offen, so dass von diesen Versuchen Abstand genommen wurde.

## 5.2.2 Spezialbitumina

Bei der Anwendung herkömmlicher Injektionsmaterialien (Suspensionen) unter den komplexen chemischen und geomechanischen Randbedingungen im leichtlöslichen Salzgestein kann man Löseerscheinungen am Gebirge (bes. an Tachyhydrithaltigen Bereichen) nicht ausschließen (siehe Abschnitt 5.2.1). Es gibt keine Salzlösung, die sich vollkommen inert gegenüber dem vorliegendem Salzgestein verhält.

Bitumen hingegen verhält sich inert, da es mit wässrigen Lösungen nicht mischbar ist und keinerlei Reaktionen mit dem Salzgestein eingeht. Unter den vorliegenden Bedingungen ist Bitumen ein langzeitstables Material. Nachteilig ist der Flüssigkeitscharakter des Bitumens (in der Regel Destillationsbitumen mit newtonschen Eigenschaften), der generell zur Dichteschichtung führt, die in horizontalen Bauwerken sehr nachteilig ist. Für Injektionen in Klüfte und Risse sind diese newtonschen Flüssigkeitseigenschaften insofern von Bedeutung, da das injizierte Material unter Belastung (Flüssigkeitsdruck, Gebirgsdruck, Schwerkraft) aus den verpressten Rissen oder Spalten verdrängt werden kann.

Die Möglichkeit, Bitumen zu verpumpen oder zu injizieren ist bisher nur gegeben, wenn das Bitumen entweder auf über 100 °C erhitzt wird oder ein Lösungsmittel zugeführt wird. Bei ersterer Variante, die technisch sehr schwer handhabbar ist, kann es infolge der höheren Temperatur zu einer negativen Beeinflussung des Salzgebirges oder des Baukörpers kommen. Verschiedene Salze reagieren auf Temperaturerhöhung, ändern ihren Aggregatzustand (Auflösung im Kristallwasser), setzen Lösungen frei oder werden instabil. Somit ist die Variante Bitumeninjektion bei erhöhten Temperaturen unter den vorliegenden Bedingungen nicht anwendbar. Weiterhin können lange Risse und Klüfte durch vorzeitiges Abkühlen des Injektionsmaterials nur teilweise verschlossen werden. Eine vollständige Abdichtung von Wegsamkeiten durch heiß verpresste Destillationsbitumina kann dadurch nicht erreicht werden.

Bei der zweiten Variante wird Bitumen nur durch Zugabe von Lösungsmitteln bei Umgebungstemperatur verpumpbar. Dieses Lösungsmittel kann bei Verwendung des Bitumens als Injektionsmaterial nicht entweichen / verdunsten und ist somit ungeeignet, da das Injektionsmaterial nicht oder nur über einen sehr langen Zeitraum hinaus erhärtet, d.h. die erforderlichen sehr hohen Viskositäten erreicht.

Diese Nachteile entfallen beim Einsatz des neu entwickelten Zweikomponentenbitumens, bei dem der Feststoffanteil (Hartbitumen) soweit aufgemahlen wird, dass sich nach Vermischung beider Komponenten eine einheitliche Flüssigkeit mit niedriger Anfangsviskosität unter 1000 mPas bildet, die somit leicht pumpbar und injizierbar ist. Dadurch können Mikrorisse, die sich im Gebirge oder Baukörper befinden, injiziert werden. Mikrorisse im Bereich um 30 µm Spaltweite, Schrumpfungsrisse und Kontaktfugen werden injizierbar.

Weiterhin können mit diesem Injektionsbitumen flüssigkeitsgefüllte Spalten und Risse gefüllt werden, wobei eine Verdrängung der wässrigen Phase (z. B. Salzlösung, Grubenwasser) durch das Injektionsbitumen erreicht werden kann. Das heißt zum einen, Wegsamkeiten für Laugenzuflüsse im Gebirge können dauerhaft und langzeitstabil verschlossen werden und zum anderen ist es möglich, bereits bestehende Schwachstellen an technischen Absperrbauwerken im Salinar (insbesondere Kontakt Bauwerk – Gebirge) abzudichten.

Das Zweikomponenten-Bitumen (Injektionsbitumen) bildet bei optimalem Mischungsverhältnis und günstiger Korngröße ein homogenes Material mit einer Dichte von ca. 1,05 g/cm<sup>3</sup>. Das Erhärtungsverhalten wurde mit dem Penetrationstest untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass Mischungen von 48 bis 44% Feststoffgehalt (Masseeverhältnis Hartbitumen zu Spezialöl zwischen 0,79 und 0,92) einen kompakten Festkörper bilden. Geringere Feststoffgehalte führen zur Bildung einer weichen bzw. halbfüssigen Masse, die nicht ausreichend aushärtet.

Durch einaxiale Belastungsversuche konnte gezeigt werden, dass das ausreagierte Injektionsbitumen sich ähnlich wie ein Festkörper verhält und somit seinen für andere Bitumina typischen newtonschen Flüssigkeitscharakter durch die Ausbildung einer Anfangsfließgrenze verloren hat. Die aus ausgehärteten Zweikomponenten-Bitumen hergestellten Proben sind bis ca. 120 kPa belastbar. Für die Beschreibung des Aushärtens und des daraus resultierenden Materialverhaltens (Plastizität, zeitabhängiges Verformungs-Verhalten, Schwindverhalten) sind weitere detaillierte Untersuchungen erforderlich.

Es wurde nachgewiesen, dass mit dem Zweikomponenten-Bitumen (Injektionsbitumen) Spalten mit einer Weite von 30 µm verpresst und somit abgedichtet werden können. Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurden mit diesem Material in situ Versuche zur Vergütung der ALZ durchgeführt, die nachfolgend im Abschnitt 5.3.4 beschrieben werden.

### 5.3 Halbtechnische in situ Versuche

Ausgehend von den Schlussfolgerungen im Abschnitt 1.4 wurden folgende Dichtmaterialien unter den vorliegenden in situ Randbedingungen getestet:

- Zweikomponentenbitumen, Destillationsbitumen,
- Bentonit,
- MgO-Beton.

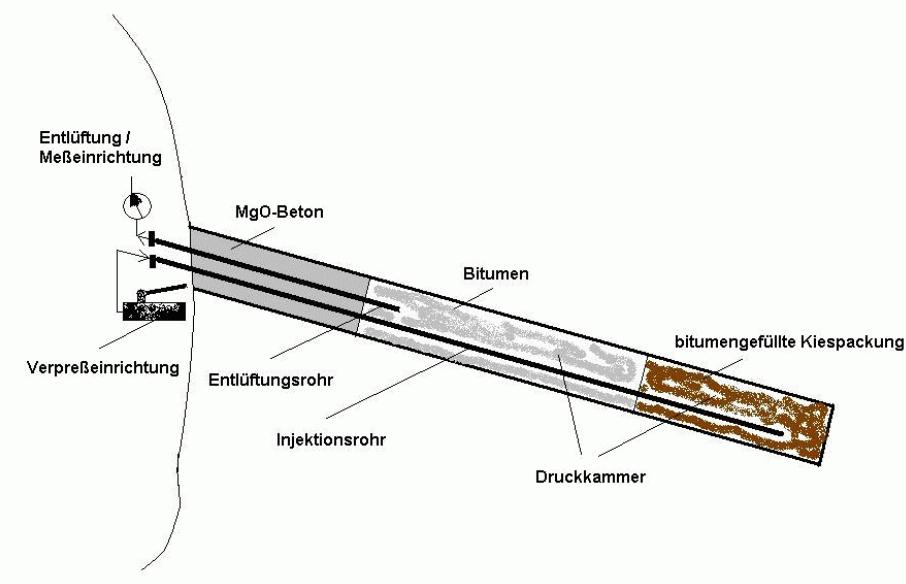
Diese Materialtests wurden in geneigten Bohrlöchern durchgeführt.

#### 5.3.1 Simulation einer Bitumenkammer im Bohrloch

Konzeptionelle Grundlage dieses Versuches sind Bitumenkammern zur Abdichtung des Streckenquerschnittes einschließlich des unmittelbaren Kontaktbereiches und der ALZ (siehe Abschnitt 1.4). Ein mögliches Grundmaterial dieser Bitumenkammern ist ein Destillationsbitumen (z. B. B25 bis B200).

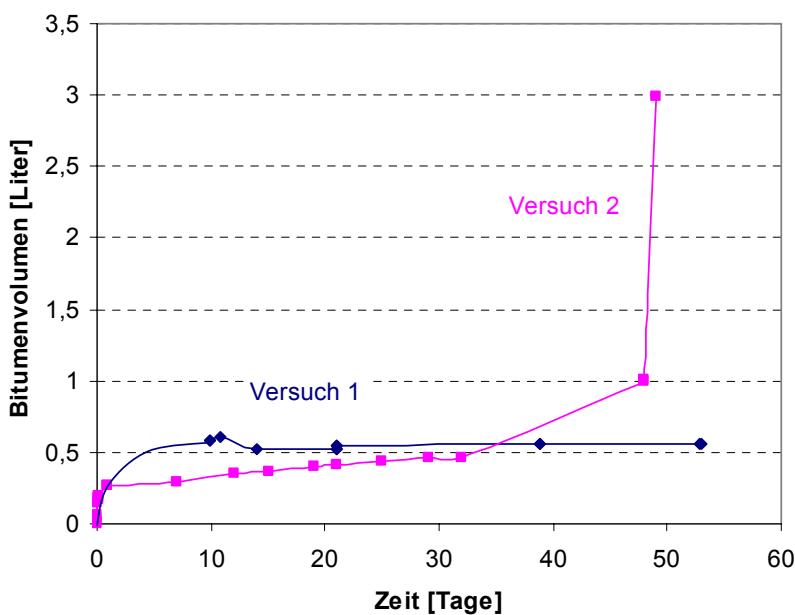
Da mit hochviskosem Bitumen im vorliegenden Zeitraum keine verwertbaren Ergebnisse zu erwarten sind, wurden die Versuche mit dem niedrigviskosen Bitumen B900 durchgeführt. Das Versuchsziel war, festzustellen ob das Bitumen B 900 in Risse und Spalten im Bereich der Auflockerungszone eindringt, und somit die Möglichkeit gegeben ist, vorhandene Fließwege für Flüssigkeiten/Laugen im Gebirge zu verschließen.

Dazu wurden zwei Versuche durchgeführt. Die Anordnung zeigt Abbildung 46.



**Abb. 46:** Schematischer Aufbau der Bohrlochversuche für Bitumenuntersuchungen [28]

Das Bohrloch wurde zuerst mit Kies und dann mit Bitumen B 900 bis 35 cm unter den Bohrlochmund verfüllt, mit einem Injektionsrohr versehen und mit einem 35 cm langen MgO-Betonpacker (im zweiten Versuch 20 cm) verschlossen. Nach dem Ende der Abbindezeit des MgO-Packers wurde der Druckspeicher mit dem B900 angeschlossen und mit den Messungen der injizierten Bitumenmenge begonnen. Die Ergebnisse beider Versuche zeigt Abbildung 47.

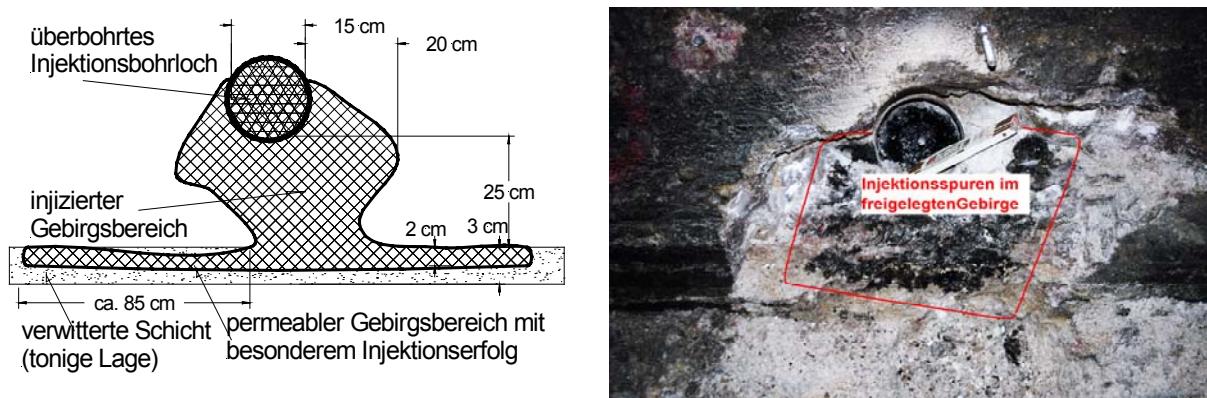


**Abb. 47:** Verpresstes Bitumenvolumen (Destillationsbitumen B 900) in Abhängigkeit von der Zeit (Druck im Versuch 1: max. 20 bar, im Versuch 2: 10 bar)

Beide Versuche zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Im Versuch 1 wurde praktisch kein Bitumen verpresst. Dies wurde durch den Rückbau des Systems und Nachuntersuchungen bestätigt. Ungünstig auf den Versuchsverlauf hat sich die relativ große Länge des MgO-Packers (35 cm) ausgewirkt. Dies führte offensichtlich dazu, dass sich der Arbeitsraum des Versuches praktisch im intakten, dichten Gebirge befand, wo kein Material injiziert werden konnte.

Im zweiten Versuch betrug die Länge des MgO-Packers 20 cm und die Streckenkontur blieb unberissen. Beide Aspekte führten im Vergleich zum ersten Versuch zu größeren Wegsamkeiten von der Druckkammer des Bohrlochs in Richtung der ALZ an der Streckenkontur. Hier zeigte sich auch ein kontinuierlichen Bitumenverbrauch, der am Versuchsende plötzlich anstieg.

Um das Versuchsergebnis bewerten zu können, wurde das Bohrloch überbohrt und der umliegende Gebirgsbereich untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass das Bitumen in den weitaus permeableren Bereich – in den verwitterten Gebirgsbereich um den Streckenhohlräum eingedrungen war (siehe Abbildung 48). Dieser Bereich war in seiner Breite ca. 20 cm mächtig und umschloss die untere Hälfte des Injektionsbohrloches in einer Tiefe von ca. 4 cm. In einem Abstand von > 25 cm unterhalb des Injektionsbohrloches befindet sich eine stärker verwitterte Schicht im Gebirge, bekannt als „tonige Lage“, in welcher der Tachyhydrit- und Kieseritgehalt weitaus höher und damit auch stärker verwittert ist, als in anderen Gebirgsschichten. Der schlagartige Anstieg der Injektionsmenge kann sicherlich damit begründet werden, dass bei Erreichen dieser Schicht durch das Injektionsmedium ein „Durchbruch“ in einen hoch permeablen Bereich stattfand. Das Bitumen B 900 konnte noch 85 cm entfernt vom Injektionsbohrloch in dieser permeablen Schicht, in Nord- sowie in Südrichtung, nachgewiesen werden. Auf Grund der stärkeren Verwitterung dieser permeablen Schicht erstreckt sich der verwitterte Bereich auch etwas tiefer in das Gebirge.



**Abb. 48:** Darstellung der mit Bitumen B900 injizierten Bereiche (13 cm hinter der Kontur, Draufsicht)

### 5.3.2 Test von Bentonitdichtelementen in Bohrlöchern

Für Anwendungen im Salinar gilt Calcigel als Vorzugsvariante bzw. Referenzmaterial [29 - 31]. Die für das Dichtverhalten maßgebenden Parameter hydraulische Leitfähigkeit und Quelldruck sind bei Verwendung von für Q-Lösung als Zutrittflüssigkeit etwas günstiger, als für NaCl-Lösung. Der Quelldruck von Bentoniten mit Mg-reichen Lösungen ist höher, als der

bei gleicher Bentonittrockendichte ermittelte Quelldruck mit NaCl-Lösung [32]. Mit R-Lösung liegen bisher nur nachfolgende Einzelwerte vor:

- Hydraulische Leitfähigkeit bei Trockendichten um  $1,4 \text{ g/cm}^3 : 10^{-12} \text{ m/s}$ ,
- Quelldruck bei  $1,4 \text{ g/cm}^3$ : ca.  $0,45 \text{ MPa}$ .

Es wurden zwei Versuche mit Calcigelgranulat durchgeführt. Das Material hatte folgende Eigenschaften:

- Methylenblauwert:  $273 \text{ mg/g} - 279 \text{ mg/g}$  (entspr. Montmorillonitgehalt 72 %),
- Korngröße  $d_{50} = 6 \text{ mm}$ , max. Korngröße 16 mm,
- Wassergehalt: 8,35 %.

Die Einbautrockendichten betrugen  $1,42 \text{ g/cm}^3$  (Versuch 1) bzw.  $1,39 \text{ g/cm}^3$  (Versuch 2). Die Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung erfolgte mit R-Lösung. Der Flüssigkeitsdruck wurde bis auf 20 bar bestiegt. Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 49.



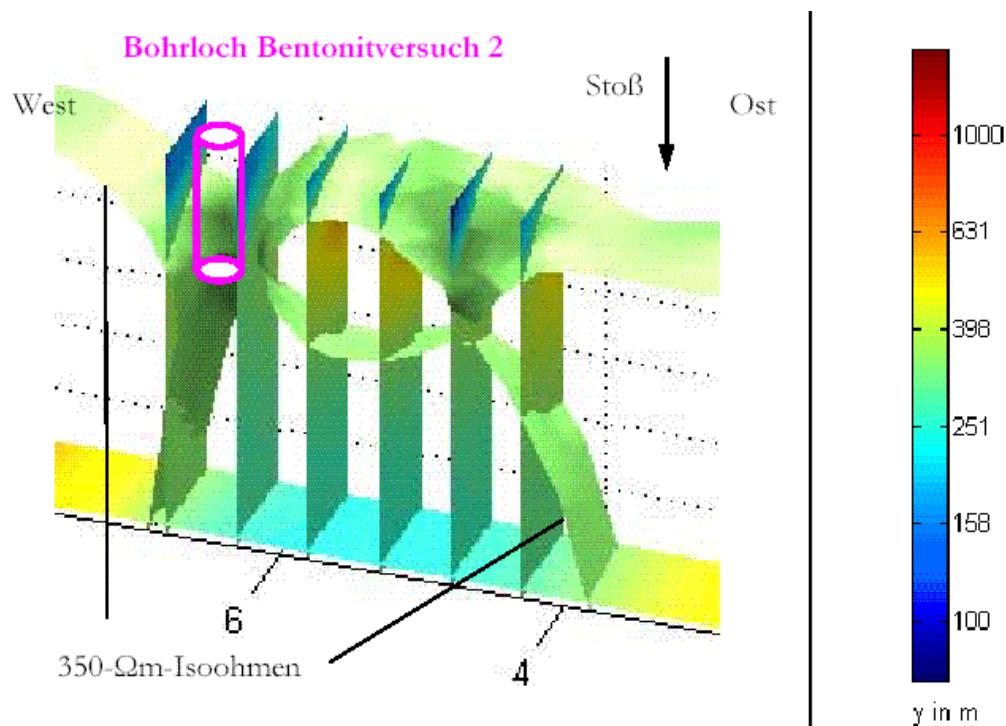
**Abb. 49:** Prinzipieller Aufbau der Bohrlochversuche mit Bentonit

Dabei wurden Volumenströme von  $0,2 - 0,5 \text{ l/h}$  (Versuch 1) bzw.  $0,8 - 1,5 \text{ l/h}$  erreicht. Dies entsprach Durchlässigkeiten des Systems von  $2,4 \cdot 10^{-9}$  bis  $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$  bzw. von  $7 \cdot 10^{-8}$  bis  $1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ . Die Feuchtegehalte des rückgebauten Bentonits lagen bei max. 16,6 %. In beiden Versuchen war der durchfeuchtete Teil des Bentonites nicht gesättigt. Weiterhin bestand eine große Diskrepanz zwischen der verbrauchten Flüssigkeitsmenge (14,7 bzw. 14,3 Liter) und der vom Bentonit aufgenommenen bzw. auch für dessen vollständige Sättigung (die nicht eintrat) erforderlichen Menge (6 – 9 Liter).

Daraus folgt, dass ein Großteil der Salzlösung in das Gebirge eingedrungen ist. Allerdings konnten die Wegsamkeiten nicht lokalisiert werden. Sie liegen vermutlich an einer Schichtgrenze, die allerdings durch die nach dem Versuch 1 durchgeföhrten Kernbohrungen nicht geortet wurde. Deshalb wurden im zweiten Versuch von K-UTEC begleitende geoelektrische Verfahren zur Ortung der Flüssigkeitsausbreitung im Gebirge eingesetzt. Dabei konnte die in das Gebirge eingedrungene Salzlösung nachgewiesen werden. Der konturnahe niederohmige (durchfeuchtete) Bereich hat sich bis zu einer Tiefe von 50 cm (von der Streckenkontur) ausgedehnt (siehe Abb. 50).

Um das Bohrloch herum hat der niederohmige (durchfeuchtete) Bereich eine Ausdehnung von 50 – 60 cm. Im Bereich der Bohrung hatte sich als Folge des Versuches eine trichterförmige niederohmige Anomalie bis in das Bohrlochtiefste ausgebildet. Weiterhin erfolgte eine deutliche Beeinflussung einer bereits vorhandenen niederohmigen Anomalie (Feuchtenester im Gebirge) zwischen Profilmeter  $x = 4,0$  und  $5,0$  ab einer Tiefe von etwa

1,5 m mit gemessenen Widerständen von <350 Ωm. Der gesamte durch den Versuch beeinflusste Bereich liegt im Profil zwischen  $x = 4,0$  und  $7,0$  m. Aufgrund der Ausbildung der niederohmigen Zone und den Messwerten aus den benachbarten Bereichen kann angenommen werden, dass die Erstreckung des durch die eingedrungene Salzlösung beeinflussten Bereiches über die realisierbare Erkundungstiefe hinausgeht [33].



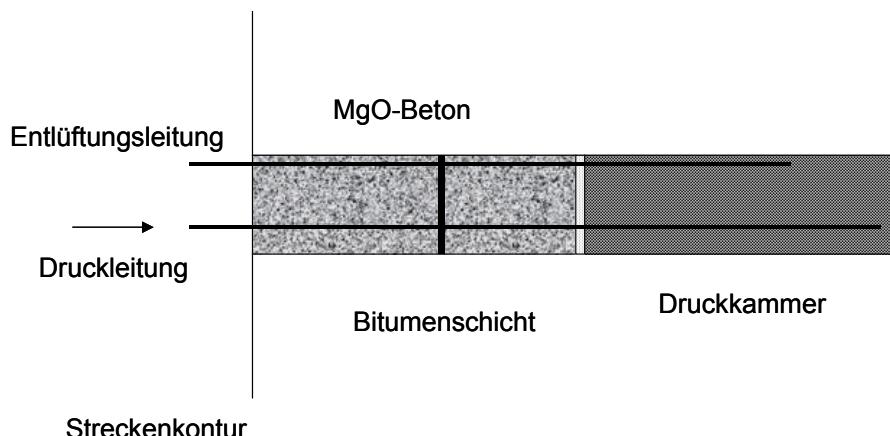
**Abb. 50:** Lage des Bohrloches im Bereich des nach dem Bentonitversuch 2 gemessenen Geoelektrikprofiles [33]

Aus den Ergebnissen beider Bohrlochversuche lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die für das Gesamtsystem gemessenen Permeabilitäten sind  $> 10^{-16} \text{ m}^2$ . Dies ist wesentlich höher, als die mit R-Lösung gemessene Permeabilität des eingesetzten Bentonits (ca.  $5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ). Die Durchlässigkeit des Gesamtsystems wird somit nicht durch den Bentonit bewirkt.
- Die Umströmung und/oder Flüssigkeitsaufnahme des Gebirges erfolgt bereits bei Flüssigkeitsdrücken ab 5 bar. Die Salzlösung dringt dabei in höher permeable Bereiche der ALZ ein.
- Der durchfeuchtete Bereich des Bentonits ist hinsichtlich des Wassergehaltes stark untersättigt. Dies deutet auf eine Umströmung und/oder auf eine gegenüber dem Bentonit bevorzugte Flüssigkeitsaufnahme des hygrokopischen Gebirges hin. Diese Effekte können dazu führen, dass im Kontakt mit dem Carnallitit das Quellverhalten des Bentonits infolge der unvollständigen Wassersättigung eingeschränkt ist. Im System Bentonit – R-Lösung (Laboruntersuchungen ohne Gebirgskontur) wurde dieser Effekt nicht festgestellt. Die Ursache muss in den Wechselwirkungen zwischen der Porenflüssigkeit des Bentonits und dem hygrokopischen Gebirge (Tachyhydrit, Carnallitit) liegen.
- Da in beiden Versuchen eine Impermeabilisierung der ALZ durch den Bentonit nicht erreicht werden konnte, wird der Einsatz von Bentonit als Dichtmaterial im leichtlöslichen Salzgestein nicht empfohlen.

### 5.3.3 Test von MgO-Beton-Elementen in Bohrlochversuchen

MgO-Beton wird als ein mögliches Widerlagermaterial betrachtet, das auch dichtende Eigenschaften besitzt. Im Abschnitt 6 sind die Ergebnisse der Materialuntersuchungen beschrieben, die zur Entwicklung der Rezeptur MB6 führten. Mit diesem Material (siehe Abschnitt 6.1) wurden *in situ* Versuche durchgeführt, die das Lastabtragsverhalten (Versagensdrücke) und das Dichtverhalten von Verschlusselementen (Pfropfen) aus MgO-Beton in Bohrlöchern untersuchen sollten. Den Versuchsaufbau zeigt Abb. 51.



**Abb. 51:** Prinzipieller Aufbau der Bohrlochversuche mit MgO-Beton

Folgende Versuchsparameter wurden variiert:

- Bohrlochdurchmesser (70 mm, ein Versuch bei  $d = 150$  mm),
- Pfropfenlänge (15 bis 60 cm, entspricht  $L/R$  2 bis 17),
- Prüflüssigkeit (R-Lösung, gesättigte  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösung, Silikonöl),
- Orientierung der Bohrlöcher (geneigt, horizontal),
- Beraubungstiefe der Kontur am Ansatzpunkt (2 bis 20 cm).

Zur Verbesserung der Dichteigenschaften wurde in den MgO-Betonpfropfen eine quer verlaufende Dichtungsschicht aus Bitumen (Ultrament – Bitumen – Spachtelmasse) eingebaut. Zum Vergleich wurde im Versuch 4 ein Pfropfen ohne diese Dichtungsschicht getestet.

Bei allen Versuchen wurde zuerst die Dichtheit des Gesamtsystems (Pfropfen + Gebirge) mit Gas geprüft. Danach wurde mit unterschiedlichen Prüflüssigkeiten (Silikonöl, R-Lösung, gesättigte  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösung) der Druckabfall bei unterschiedlichen Anfangsdrücken bestimmt. Aus diesem Druckabfallverlauf wurden die Permeabilitäten des Gesamtsystems bestimmt [34]. Für die nachträgliche Identifikation von Wegsamkeiten im Gebirge wurden die Salzlösungen mit  $\text{J}^-$ -Ionen als Tracer dotiert.

Einige Bohrlöcher wurden bis zum Versagen (Frac) getestet. In diesem Fall wurde nach dem Frac nochmals die Permeabilität gemessen.

Die Ergebnisse der Bohrlochversuche mit Pfropfen aus MgO-Beton sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

**Tabelle 9:** Durchgeführte Bohrlochversuche mit Ppropfen aus MgO-Beton

b	Beraubungstiefe an der Kontur
D	Bohrlochdurchmesser
L	Ppropfenlänge
L/R	Verhältnis Länge:Radius des Ppropfens
$k_G$	Gaspermeabilität
$p_{fr}$	Fracdruck
$k_0$	Ausgangspermeabilität (mit Salzlösung)
$k_{fr}$	Permeabilität nach dem Frac
$K_{rfr}$	Wiederholung der Permeabilitätsmessung nach dem Frac

BL	b [cm]	D [cm]	L [cm]	L/R	$k_G$ [ $m^2$ ]	$p_{fr}$ [bar]	$k_0$ [ $m^2$ ]	$k_{fr}$ [ $m^2$ ]	$K_{rfr}$ [ $m^2$ ]
1	20	7	50	14	1,2E-16	n.b.	3,8E-18		
2	16	7	40	11	1,8E-19	80	5,3E-19	3,0E-17	
3	16	7	35	10	1,1E-19	60	1,5E-18	4,0E-17	1,2E-19
4	12	7	35	10	2,0E-18	n.b.	n.b.		
5	12	7	38	11	8,0E-20	n.b.	1,8E-18		
9	12	15	15	2	8,0E-15	1	9,0E-16		
10	8	7	15	4	1,2E-16	5	1,0E-17		
11	2	7	25	7	8,0E-18	20-30	3,0E-19	1,3E-15	
12	3	7	35	10	1,5E-17	40	3,9E-18		
13	12	7	38	11	2,6E-19	n.b.	2,0E-19		
14	12	7	37	11	8,0E-19	n.b.	2,0E-18		
IfG 2	12	7	60	17	1,5E-19	n.b.	n.b.		
IfG 3	12	7	35	10	2,6E-19	n.b.	9,0E-19		

Eine ausführliche Auswertung der Versuche wurde von HEYMANN [28] durchgeführt. Die Bestimmung der Permeabilitäten aus den Druckabfall erfolgte durch VOIGT [34].

Das Verhalten des Gesamtsystems Ppropfen – Gebirge wird offensichtlich nur indirekt durch die Propfenlänge (bzw. L/R) bestimmt. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den gemessenen Permeabilitäten und dem L/R-Verhältnis gefunden werden. Geht man von einem Grenzwert der Permeabilität von  $10^{-17} \text{ m}^2$  aus, so wird dieser Wert bei folgenden Bedingungen überschritten:

- L/R < 5 (Versuche 9 und 10).
- Das Ende des Ppropfens ist < 50 cm von der ursprünglichen Kontur entfernt (Versuche 9 und 10, Versuch 11 als Grenzfall, Gaspermeabilität im Versuch 12).

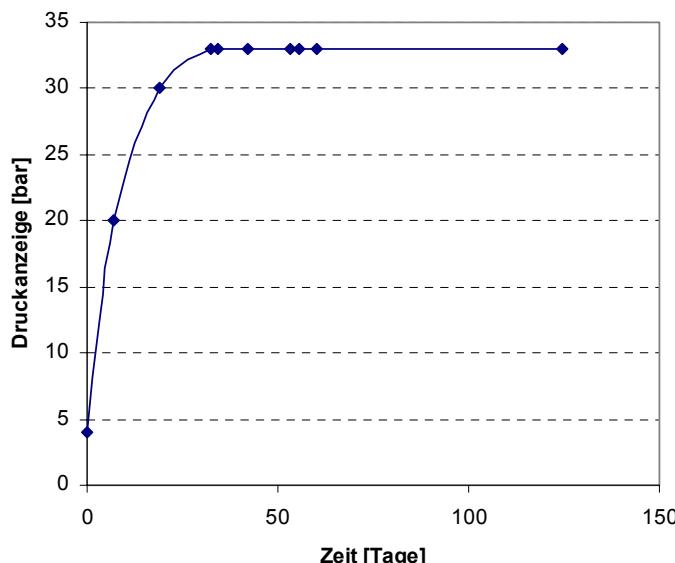
Indirekt kann daraus auf eine 50 cm mächtige aufgelockerte und höherpermeable Zone um den Streckenquerschnitt geschlossen werden.

Eindeutig wurde festgestellt, dass im Gesamtsystem nicht der MgO-Betonppropfen, sondern die umliegende ALZ die Ursache hoher Permeabilitäten ist. Durch Traceruntersuchungen wurden Tachyhydritschichten und deren Schichtgrenzen (besonders zum Kieserit) als kritische Bereiche bestätigt. Das Versagen (Frac) des Gebirges und eine starke Permeabilitätsverhöhung treten außerhalb der 50 cm mächtigen ALZ bei Flüssigkeitsdrücken von 70 – 80 bar auf.

Durch die im MgO-Beton eingebaute Bitumenzwischenschicht wurde das weitere Vordringen der Salzlösung verhindert, so dass es möglich ist, Widerlager aus MgO-Beton durch diese Bitumenzwischenschichten flüssigkeitsdicht ausführen zu können. Dies zeigte der Versuch 4, in dem ein Ppropfen ohne diese Zwischenschicht getestet wurde. Hierbei wurden durch Traceruntersuchungen die Fließwege der Lösung über die gesamte Länge des Ppropfens nachgewiesen. Im Unterschied dazu wurde in Versuchen mit dieser Zwischenschicht im

MgO-Betonpfpfen sowie in der Kontaktzone zum Gebirge nur druckseitig bis zur Bitumenzwischenschicht Tracerspuren nachgewiesen.

Weiterhin wurde in verschlossenen Bohrlöchern (Bohrloch 3 IfG, Versuche 4, 12, 13) nach ca. 2 – 20 Stunden eine nachträgliche Erhöhung des gemessenen Druckes beobachtet (siehe Abb. 52).



**Abb. 52:** Druckverlauf in der Druckkammer des Bohrloches 3 IfG (verschlossen mit MgO-Beton)

Dieser Effekt wurde in einem Laborversuch bestätigt und mit einer Volumenvergrößerung bei der Wechselwirkung zwischen Tachyhydrit und R-Lösung begründet [20, 21]. Mit Silikonöl (Versuch im Bohrloch 5, siehe Tabelle 9) wurde der Effekt der Druckerhöhung daher nicht festgestellt.

Interessant ist der beim Versuch 13 mit gesättigter  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$  – Lösung beobachtete Druckanstieg von 5 bar auf 25 bar (im Versuch 14 war der Beobachtungszeitraum zu kurz) [18, 20]. Offensichtlich ist dieser Druckanstieg nicht nur durch die Wechselwirkung zwischen Tachyhydrit und R-Lösung bedingt, da auch im Ergebnis der Reaktion der gesättigten  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$  – Lösung mit Kieserit Reaktionsprodukte entstehen, die zu einer Volumenvergrößerung bzw. zu einem Druckanstieg führen.

Die Ergebnisse des Druckanstieges im System sind gleichzeitig ein Beweis für die Dichtheit und Funktionstüchtigkeit der aus MgO-Beton errichteten Pfpfen mit der Bitumendichtschicht.

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen des in situ Tests von MgO-Betonpfpfen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Bohrlochverschlüsse aus MgO-Beton MB6 (siehe Abschnitt 6) waren hinsichtlich Lastabtrag auch bei den maximal erreichbaren Flüssigkeitsdrücken von 100 bar stabil. Die Belastung bis zum Fracdruck des Gebirges (70 bis 80 bar) wurde problemlos aufgenommen. Ein Versagen (Frac) fand nur im umliegenden Gebirge statt. Nach dem Frac traten Permeabilitätsveränderungen von über zwei Zehnerpotenzen auf.
- Durch eine zwischengeschaltete Bitumendichtschicht sind Elemente aus MgO-Beton praktisch flüssigkeitsdicht. Fließwege im Kontakt zwischen Gebirge und MgO-Beton und direkt im MgO-Beton kommen an dieser Bitumendichtschicht zum Stillstand.

- Voraussetzung für eine ausreichende Dichtheit des Systems ( $< 10^{-17} \text{ m}^2$ ) ist eine Beraubung der aufgelockerten und verwitterten Bereiche des konturnahen Gebirges. Ansonsten kommt es zur hydraulischen Kurzschlussströmungen über die ALZ. Die Funktionstüchtigkeit der MgO-Betonpropfen hinsichtlich Dichtheit war ab einer Tiefe des Streckenstoßes von 50 – 60 cm erreicht.
- Bevorzugte Fließwege liegen an den Grenzflächen zwischen Tachyhydrit und Kieserit bzw. Tachyhydrit und Carnallit sowie an den als Tonige Schichten bezeichneten, Tachyhydrit enthaltenden Lagen. Die Permeabilität des Gebirges außerhalb der ALZ erreicht Werte zwischen  $10^{-17}$  und  $10^{-18} \text{ m}^2$ .
- Während des Anbetonierens sind für die Umströmung relevante Löseerscheinungen durch die Anmachflüssigkeit (R-Lösung) nicht auszuschließen. Negative Auswirkungen, wie eine generelle Umströmung der MgO-Betonpropfen oder eine verringerte Haftfestigkeit (die zum mechanischen Versagen führt) wurden nicht beobachtet.
- Lokale Löseerscheinungen finden vor allem beim direkten Kontakt zwischen Lösung und Gebirge statt. Inwiefern dabei die Kontaktzone des Gebirges zum Verschlusselement über lange Zeiträume von der Druckseite aus nachträglich ungünstig beeinflusst wird, konnte nicht festgestellt werden. Durch vorgeschaltete Dichtelemente mit Dichtungsschlitzten (z.B. aus Bitumen) kann der direkte Kontakt der Zutrittslösung mit dem konturnahen Gebirgsbereich eingeschränkt werden.

### 5.3.4 Dichtungsverhalten von Elementen aus Injektionsbitumen

Im Abschnitt 5.2.2 wurde ein neuartiges Zweikomponenten - Injektionsbitumen beschrieben, das gegenüber dem üblichen Destillationsbitumen Vorteile hinsichtlich der Materialeigenschaften aufweist. In der Grube Teutschenthal wurden erste in situ Eignungsuntersuchungen durchgeführt.

#### Untersuchungen zur Vergütung der ALZ am Oberflächenpacker:

Der Oberflächenpacker bestand auch aus MgO-Beton der Rezeptur MB3 mit 20 % MgO (vergl. Abschnitt 6). Die Abmessungen betragen 70 cm \* 70 cm. Die Injektions- und Messkammern befinden sich im Bereich des über der Spätbank gelegenen bändrigen Carnallitits, zwischen zwei Kieseritlagen. In diesem Bereich ist der Tachyhydrit deutlich lagig angereichert [16]. Die Anordnung dreier Messkammern erlaubte Permeabilitätsmessungen sowohl in Richtung der geologischen Schichtung als auch senkrecht dazu.

Zuerst wurde die Ausgangspermeabilität der Kontaktfuge zwischen dem MgO-Beton und dem Gebirge mit Luft gemessen. Dabei wurden folgende Werte bestimmt [34]:

in horizontale Richtung (zwischen Kammer 1 und 2):  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ ,  
 in vertikaler Richtung (zwischen Kammer 1 und 4 sowie 3 und 4):  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  und  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ .

Diese Werte beweisen eindeutig, dass am vorliegenden Standort der Grube Teutschenthal horizontal verlaufende Schwächezonen / Grenzflächen die bevorzugten Fließwege darstellen.

Aufgrund des guten Haftvermögens zwischen dem MgO-Beton und dem Gebirge sind diese Werte nicht nur für die direkte Kontaktfuge gültig, sondern stellen einen Wert für den konturnahen, verwitterten und aufgelockerten Gebirgsbereich dar. Die Unterschiede zwischen den Permeabilitäten in schichtparalleler Richtung und senkrecht zur geologischen Schichtung bestätigen dies.

Danach wurde über die Injektionskammer das Zweikomponenten-Injektionsbitumen verpresst. Dabei kam es zum Austritt des Injektionsbitumens aus den Rändern des Oberflächenpackers (siehe Abb. 53).



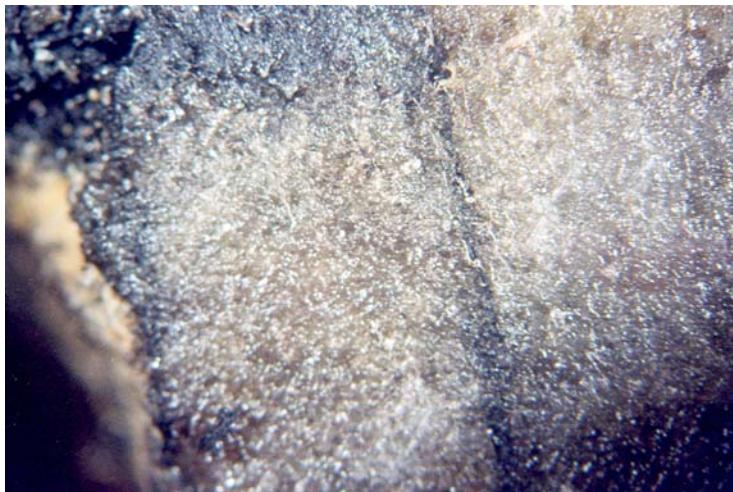
**Abb. 53:** Austrittsstelle des Injektionsbitumens mit ausgepresster Salzlösung

Nach der Bitumeninjektion und dem Ausreagieren des Injektionsbitumens wurden die Messungen mit R-Lösung wiederholt. Dabei wurden folgende Ergebnisse erreicht:

in horizontale Richtung (zwischen Kammer 1 und 2):  $4 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  und  $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ,  
in vertikaler Richtung (zwischen Kammer 1 und 4 sowie 3 und 4):  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  und  $3 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ .

Durch die Vergütung mit dem Injektionsbitumen wurde in jedem Fall eine Verbesserung des Dichtverhaltens erreicht. Dabei wurden Permeabilitäten erreicht, die den Werten des intakten Gebirges entsprechen.

Beim Rückbau des Oberflächenpackers wurde festgestellt, dass das Injektionsbitumen in Risse des konturnahen Salzgesteins eingedrungen war (siehe Abb. 54).



**Abb. 54:** Mit Injektionsbitumen gefüllter Riss im Salzgestein [28]

### Nachverpressen des Gebirges nach Frac (Bohrlochversuch 11)

Beim Bohrlochversuch 11 mit einem MgO-Betonpfropfen von 25 cm Länge ( $L/R = 7$ ) und nur 2 cm Gebirgsnachriss trat bereits bei 20 – 30 bar ein Frac des Gebirges ein (siehe Tabelle 9). Danach war keine weitere Druckerhöhung möglich. Die R-Lösung trat in die ALZ ein (siehe Abschnitt 5.3.3), da die Pfropfenlänge nicht über die gesamte Ausdehnung der ALZ reichte (der Abstand von der Streckenkontur betrug 27 cm, bei 50 cm wäre das System dicht). Durch den vorangegangen Frac waren günstige Bedingungen zum Verpressen des Injektionsbitumen geschaffen worden. Damit ist dieser Versuch zutreffend zur Vergütung der ALZ mit Injektionsbitumen. Die Ergebnisse des Versuches zeigt Tabelle 10.

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen des mit Injektionsbitumen nachbehandelten Bohrloches 11 (nach VOIGT [34])

Zustand des Systems	Anfangsdruck der R-Lösung [bar]	Permeabilität [ $\text{m}^2$ ]
Vor dem Frac	12	$3,0 \cdot 10^{-19}$
Nach dem Frac	7	$1,3 \cdot 10^{-15}$
Nach Bitumeninjektion	15 11	$1,2 \cdot 10^{-17}$ $4,0 \cdot 10^{-18}$
Nach dem 2. Frac	21,5	$1,2 \cdot 10^{-16}$

Nach der Aushärtzeit von 14 Wochen wurde mit R-Lösung die Permeabilität gemessen und dabei eine deutliche Verringerung der Permeabilität um 2 – 3 Zehnerpotenzen gegenüber dem Zustand nach dem Frac nachgewiesen. Weiterhin wurde ein wiederholter Frac des Bohrloches vorgenommen um festzustellen, bei welcher Druckstufe die mit dem Injektionsbitumen vergüteten Wegsamkeiten wieder aufreißen. Dies war bei ca. 25 bar der Fall. Damit lag der Fracdruck in der gleichen Größenordnung, wie vor der Bitumeninjektion. Allerdings war die nach dem zweiten Frac (nach der Bitumeninjektion) gemessene Permeabilität geringer als die nach dem ersten Frac (vor der Bitumeninjektion) (siehe Tabelle 10).

### Dichtheitstest eines Bohrlochverschlusses aus Zweikomponenten – Injektionsbitumen

Der Versuchsaufbau entsprach den Versuchen mit Bohrlochverschlüssen aus MgO-Beton (siehe Abb. 51). Die Länge des Bohrlochverschlusses aus Zweikomponentenbitumen betrug 35 cm (beginnend vom Bohrlochmund). Während der Erhärtungsphase des 2-K-Bitumenpackers wurde jedoch beobachtet, dass sich ein Spalt, hervorgerufen durch Schrumpfung / Setzung des 2-K-Bitumens, an der Firsche des Bohrloches ausbildete. Der Permeabilitätstest des 2-K-Bitumenpackers wurde mit Gas bei einem Druck von 5 bar durchgeführt. Der sank so rasch ab, dass keine Druckabfallskurve dokumentiert werden konnte. Der 2-K-Bitumenpacker konnte somit das Bohrloch nicht dicht verschließen.

## 5.4 Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen polymineralischen Salzproben und ausgewählten Salzlösungen\*

### 5.4.1 Zielstellung

Im Rahmen dieses Arbeitsschwerpunktes sollen die löskeinetischen Wechselwirkungen zwischen Salzlösungen verschiedener chemischer Zusammensetzung und den in einer carnallitischen Lagerstätte ggf. nebeneinander vorliegenden Salzmineralen Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit untersucht und bewertet werden. Anhand der erzielten Untersuchungsergebnisse sind Möglichkeiten eines gezielten und sicheren Schutzes der Auflockerungszone (ALZ) in hochlöslichen Mineralsalzformationen (Carnallit-Lagerstätte) gegen einen Lösungsangriff abzuleiten.

### 5.4.2 Auswahl von Modelllösungen

Die Laboruntersuchungen zur Bewertung löskeinetischer Effekte wurden an Bohrkernen aus der Grube Teutschenthal, die Carnallit, Kieserit und Tachyhydrit nebeneinander enthielten, durchgeführt. Als Lösungskomponenten wurden insgesamt 5 im Labormaßstab hergestellte Modelllösungen verschiedener chemischer Zusammensetzung eingesetzt.

Die Zusammensetzung der eingesetzten Lösungen bei 25 °C wurde analytisch bestimmt. Bild 1 zeigt vereinfacht das System NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O bei 25 °C [35 - 37], in das die Zusammensetzung der eingesetzten Lösungen eingetragen wurde.

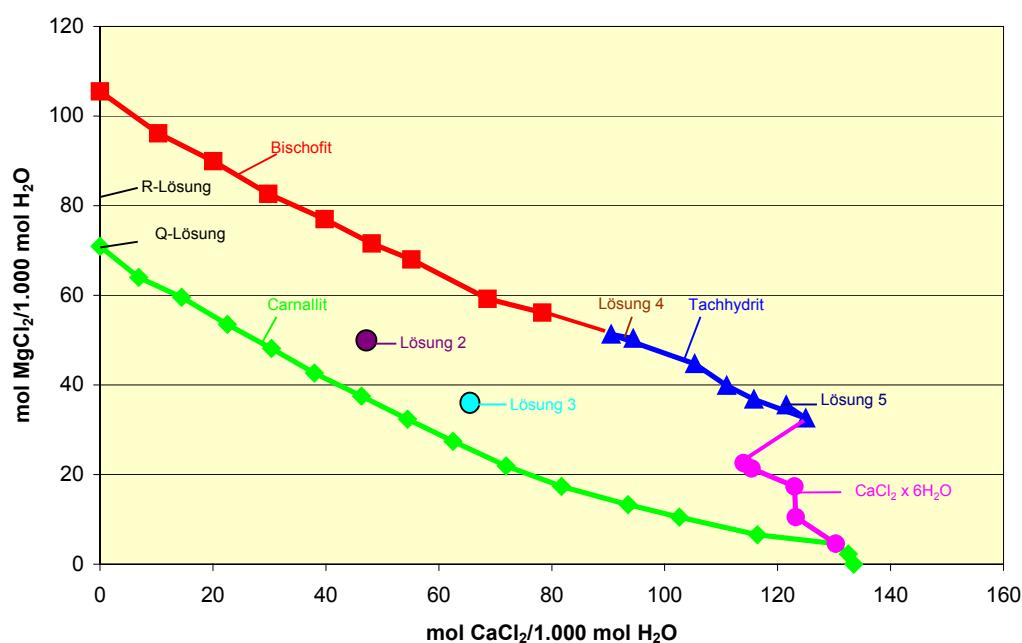


Abb. 55: System NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O bei 25 °C

\* Vergl. Teilbericht:

Krauke, W.; Lack, D.; Klimke, A.: Entwicklung von dauerplastischen und von druckplastischen, ortsstabilen Baustoffen auf der Basis von Magnesia-Bindern zum Schutz der ALZ und zur Aufkonzentrierung der anströmenden Fluide. K-UTEC Sondershausen, 13.10.2004

Alle Lösungen zeichneten sich durch eine Carnallit-Sättigung aus. Neben einer Q-Lösung wurden eine zusätzlich gegenüber Kieserit (R-Lösung) bzw. zwei gegenüber Tachyhydrit gesättigte Lösungen (Lösungen 4 und 5) sowie zwei konzentrierte  $MgCl_2$  und  $CaCl_2$ -haltige Lösungen (Lösungen 3 und 4) im Rahmen des Untersuchungsprogramms getestet.

#### 5.4.3 Versuchsergebnisse

Die Wechselwirkungen zwischen den Lösungen verschiedener Zusammensetzung wurden im Standversuch als Masseänderung der eingesetzten Bohrkerne im Versuchszeitraum von 7d bestimmt. Zur Verkürzung der Versuchsdauer und zur Verdeutlichung der Effekte wurde der Prüfkörper jeweils so in die bei 25 °C thermostatierte Lösung gestellt, dass ein Lösungsangriff über die gesamte Oberfläche des Bohrkerns möglich war. In situ ist ein solch großflächiger Lösungsangriff nicht gegeben.

Die Untersuchungen zeigen bei Einsatz von Tachyhydrit-ungesättigten Lösungen ein sehr schnelles und nahezu vollständiges Herauslösen der Tachyhydrit-Bänder in den Bohrkernen (Abb. 56) verbunden mit einer Masseabnahme (Abb. 58 - rote Kurve).

Die Versuche mit Tachyhydrit-gesättigten Lösungen erbrachten einen gegenläufigen Trend mit einer stetigen Massezunahme (Abb. 58 - blaue Kurve) durch Lösungspenetration in Poren und durch die Kristallisation von Tachyhydrit auf der Oberfläche der Bohrkerne (Abb. 57). Bei Einsatz von  $CaCl_2$ -haltigen Lösungen erfolgte stets eine Kristallisation von Gips auf freiliegenden Kieserit-Oberflächen. Ein signifikantes Herauslösen von Kieserit wurde nicht festgestellt.



Abb. 56: Standversuch in R-Lösung

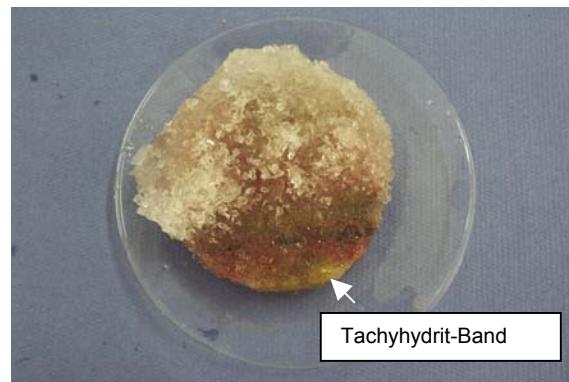


Abb. 57: Standversuch in Tachyhydrit-Lösung

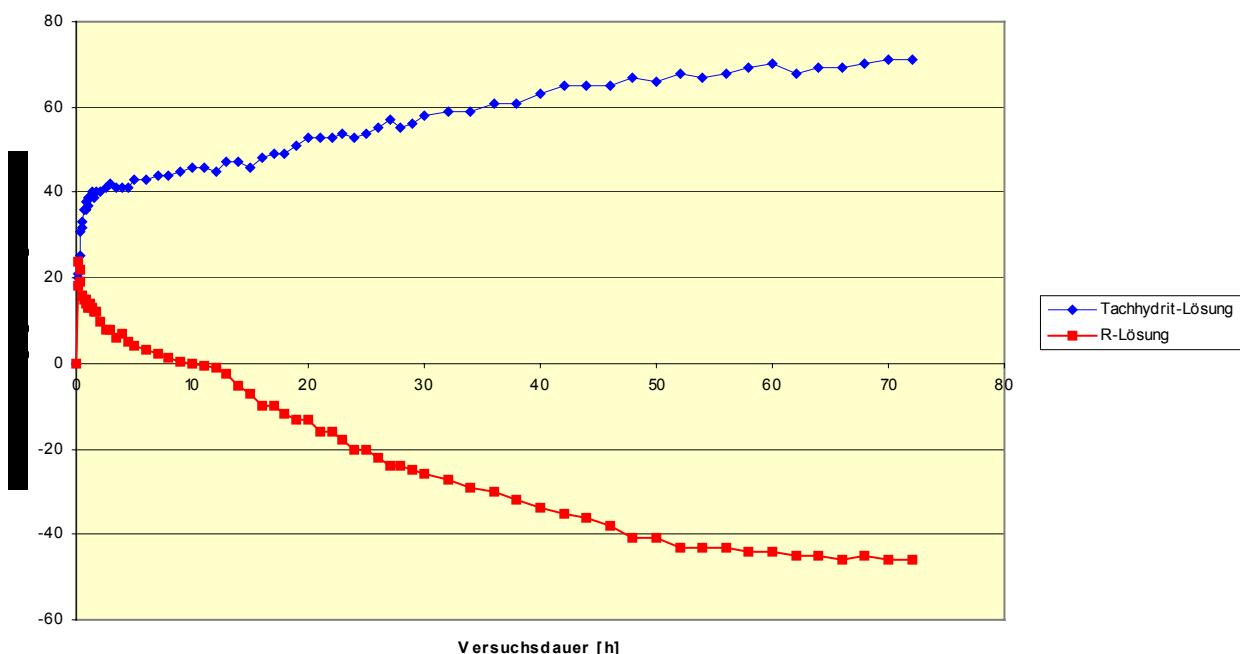
#### 5.4.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Anhand der erzielten Untersuchungsergebnisse kann abgeleitet werden, dass in Carnallit-Lagerstätten, in denen der Carnallit in Vergesellschaftung mit Tachyhydrit und Kieserit vorliegt, unter lösekinetischen Gesichtspunkten die Komponente Tachyhydrit als sensibelstes Mineral zu betrachten ist. Aufgrund des hohen Kristallwassergehaltes ist die Auflösung von Tachyhydrit mit dem Entstehen großer Lösungsvolumina und der Schaffung neuer, großvolumiger Wegsamkeiten für strömende Fluide verbunden.

Die Lösung von Kieserit erfolgt dagegen deutlich verlangsamt und wird möglicherweise durch die Bildung von Gips auf der Mineraloberfläche deutlich gemindert oder ggf. unterbunden (Maskierung, siehe Abschnitte 1.2.1 und 4). Die Wirksamkeit einer Kieserit-Maskierung und dessen Einfluss auf die Lösegeschwindigkeit des Kieserits in Tachyhydrit-gesättigten Lösungen sind noch detailliert zu untersuchen.

Zur Gewährleistung eines sichereren Schutzes insbesondere des gebändert auftretenden Tachyhydrits ist ohne zusätzliche Maßnahmen nach den derzeit vorliegenden Erkenntnissen nur der Einsatz von Baustoffsystmen möglich, die in der Einbau- und der Erhärtungsphase (auch unter Berücksichtigung des stark temperaturabhängigen Sättigungsverhaltes der Lösungsphase) sowie im ausreagierten Zustand eine Tachyhydrit-Sättigung aufweisen.

Als weiteres zu lösendes Problem zeichnet sich die unzureichende Sättigung der anströmenden Lösung ab. Die vorliegenden Erfahrungen zeigen, dass im günstigsten Fall von einer Carnallit-gesättigten Lösung der ungefähren Zusammensetzung am Punkt Q auszugehen ist. Es ist davon auszugehen, dass diese Lösung aufgrund ihres hohen Lösepotenzials insbesondere gegenüber Tachyhydrit über dessen Aufschlüsse im Bereich des zu errichtenden Verschlussbauwerkes in das Wirtsgestein eindringen und sich durch ein fortschreitendes Lösen von Tachyhydrit im Gebirge ausbreiten kann. Die vorhandenen Tachyhydrit-Bänder stellen dann Wegsamkeiten für Umläufigkeiten des Verschlussbauwerkes dar. Zur Verhinderung von Umläufigkeiten ist daher abzusichern, dass bereits vor dem Dichtelement eine Tachyhydrit-gesättigte Lösung ansteht.



**Abb. 58:** Masseänderung von Bohrkernen in R- und in Tachyhydrit-Lösung

Für den Schutz der ALZ kann aus den erzielten Untersuchungsergebnissen ein weiteres wesentliches Ergebnis abgeleitet werden. Tachyhydrit-gesättigte Lösungen sind in der Lage, in die Porenräume der polyminalischen Bohrkerne einzudringen und können diese infolge der Kristallisation von Tachyhydrit reduzieren. Zusätzlich kann im Wirtsgestein eine Lösung deponiert werden, die im Vergleich zu den anströmenden und bezüglich Tachyhydrit ungesättigten Lösungen eine spezifisch schwerere Lösung darstellt.

### 5.4.5 Zusammenfassung

In Salzformationen, in denen die Minerale Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit unmittelbar nebeneinander vorliegen existiert keine Lösung, die mit diesen 3 Salzen im Gleichgewicht steht. Die Untersuchungen an Carnallit-, Tachyhydrit- und Kieserit-haltigen Bohrkernen mit konzentrierten  $MgCl_2$ -Lösungen (Q- und R-Lösung), konzentrierten  $MgCl_2 + CaCl_2$ -Lösungen und Tachyhydrit-gesättigten Lösungen zeigen, dass für den Einsatz in Grubenbauen mit dieser komplizierten Mineralogie ohne sichere Versiegelung des aufgeschlossenen Wirtsgesteins nur mineralische Baustoffe auf der Basis Tachyhydrit-gesättigter bzw. übersättigter Lösungen zur Anwendung kommen können.

Die untersuchten Tachyhydrit-gesättigten (-übersättigten) Lösungen können als Schwerlösung mit Tachyhydrit-Depot zum Schutz der ALZ angewendet werden. Das Tachyhydrit-Depot entsteht durch einen langsamen Abbau der Übersättigung der Lösung nach dem Abkühlen des Bauwerkes. Dieser Effekt könnte durch einen druckbeaufschlagten Einbau der Systeme im Bereich von 0,5-1,0 MPa und der damit möglichen Lösungsauspressung und -infiltration in die ALZ genutzt werden, um Wegsamkeiten in der ALZ durch die Schwerelösung und durch die Rekristallisation von Tachyhydrit aktiv zu bekämpfen.

## 6 Mögliche Baumaterialien\*

Im Abschnitt 1 wurden für horizontale langzeitbeständige Verschlüsse im leicht löslichen Salzgebirge als Material für lastabtragende Elemente (statische Widerlager) MgO-Beton und/oder lastabtragende Gelsysteme favorisiert und als prinzipiell technisch realisierbar eingeschätzt.

Durch *in situ* Versuche wurde bestätigt, dass bei Einsatz von MgO-Beton als Widerlagermaterial insbesondere durch Zwischenschichten aus Bitumen zusätzlich eine Dichtwirkung des statischen Widerlagers erreicht werden kann.

Aufgrund unterschiedlicher Zusammensetzung und Eigenschaften ist beim MgO-Beton der klassische MgO-Beton (mit inertem, silikatischem, genormten Zuschlag) von lastabtragenden Gelsystemen (K-UTEC-Baustoffe und MgO-Beton mit Steinsalzzuschlag) abzugrenzen. Prinzipielle Unterschiede zwischen dem klassischen MgO-Beton und den K-UTEC-Baustoffen bzw. speziell entwickelter Sorelbetonrezepturen sind:

- Inerer mineralischer, genormter Zuschlag mit vorgegebener Sieblinie (Salzuschlag nur mit Vorgabe einer maximalen Korngröße bei K-UTEC-Baustoffen),
- MgO als einziges Bindemittel (Bindemittelkombinationen aus MgO mit Dolomithalbbrannt bei K-UTEC-Baustoffen),
- Verwendung zusätzlicher Füllstoffe (z.B. Schiefermehl, Anhydrit) bei K-UTEC-Baustoffen.

Beide Materialien werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

### 6.1 MgO-Beton

#### 6.1.1 Zielstellung

Der klassische MgO-Beton geht im Prinzip auf Untersuchungen von KAMMÜLLER & SCHEIBE [38] aus den 30-er Jahren zurück. Ein derartiges Material ist auch für den funktionstüchtigen Streckenverschluss in der "Rocanville Potash Mine" in Kanada als Widerlagermaterial erfolgreich eingesetzt worden (siehe Abschnitt 1.1).

Der Chemismus der Anmachflüssigkeit hat aber einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des MgO-Betons. Im klassischen Magnesiabeton [38] liegt für das Bindemittel das optimale Mischungsverhältnis bei 8 Mol MgO zu 1 Mol Mg<sup>2+</sup> (in der Anmachflüssigkeit). Der Zuschlaganteil soll sich in den Grenzen zwischen 3 und 12 kg Zuschlag je kg MgO bewegen.

Ziel der Untersuchung ist, unter der Einhaltung der Prämisse "Normbetonzuschlag", die Rezeptur an die vorliegenden Randbedingungen durch die Verwendung von R-Lösung als Anmachflüssigkeit anzupassen und dabei die erforderlichen Festigkeitseigenschaften zu erreichen. Die Einschränkung des Einsatzes von R-Lösung als Anmachflüssigkeit ist erforderlich, um während des Betonierens Löseerscheinungen am umliegenden Gebirge weitestgehend auszuschließen (siehe Abschnitt 6.1.3). Dies steht in gewissem Maße im Gegensatz zu anderen Untersuchungen des Salzbergbaus, wo vorhandene MgCl<sub>2</sub>/MgSO<sub>4</sub>-Lösungen (z. B. Betriebslaugen) unterschiedlicher Zusammensetzungen eingesetzt werden

\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 6:

Sitz, P.; Gruner, M.; Wasowicz, B.; Kawka, A.: Mögliche Baumaterialien (zum Lastabtrag, statisches Widerlager). TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Juni 2004.

konnten, wodurch letztlich unterschiedliche Mischungen und stark variierende Materialparameter resultieren.

Zusätzlich wurde die Frage der Verwendung von  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösungen als Anmachflüssigkeit geklärt. Der angedachte Vorteil wäre, während des Betonierens selektive Löseerscheinungen am Tachyhydrit auszuschließen. Die Wechselwirkungen dieser Lösung mit dem Kieserit werden als weniger kritisch eingeschätzt.

### 6.1.2 Versuchsergebnisse

In ersten Versuchen wurden Rezepturen mit Molverhältnissen  $\text{MgO}/\text{Mg}^{2+}$  von 8 und 9 durchgeführt. Aufgrund der Zusammensetzung der Lösung (ca. 55 g/l  $\text{Mg}^{2+}$ ) ergab sich ein Verhältnis Lösung/ $\text{MgO}$  von 1,2 bis 1,4 l/kg.

Dabei trennte sich während des Erhärtens eine klare  $\text{CaCl}_2$ -haltigen Lösung ab. Danach neigten die ausgehärteten Probekörper zum "ausschwitzen" von Lösung. Weiterhin folgte dem späten Erstarrungsbeginn bei 11 bis 13 h ein sofort anschließendes Erstarrungsende bei 13 bis 14 h. Offensichtlich handelt es sich um Entmischungsvorgänge des an der Reaktion nicht teilnehmenden  $\text{CaCl}_2$ . Ein derartiges Verhalten der nachträglichen unkontrollierbaren Abgabe wässriger Lösungen ist nicht akzeptabel. Deshalb wurde als Anmachflüssigkeit R-Lösung beibehalten.

Der zu untersuchende  $\text{MgO}$ -Beton besteht aus dem Bindemittel  $\text{MgO}$ , das mit R-Lösung angemacht wird und dem Normzuschlag (Gesteinskörnung). Als Bindemittel wurde unaufbereitetes (d.h. nicht zusätzlich aufgemahlenes)  $\text{MgO}$  921 der Fa. Lutz GmbH eingesetzt.

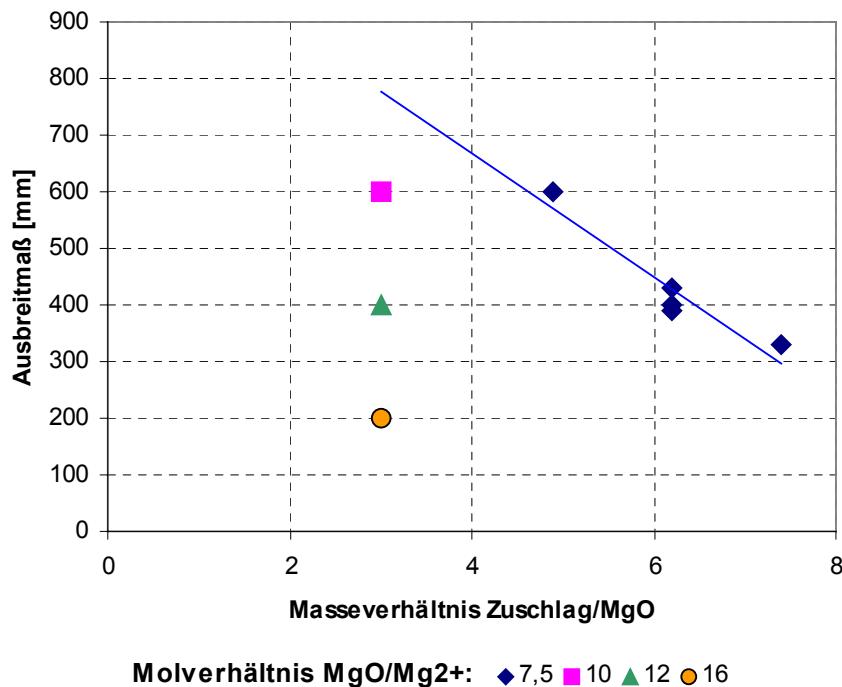
Da der  $\text{Mg}^{2+}$ -Gehalt der R-Lösung (ca. 82 g/l  $\text{Mg}^{2+}$ ) vorgegeben ist, resultiert aus diesem  $\text{Mg}^{2+}$ -Gehalt der R-Lösung und bei dem für die Reaktion erforderlichen Verhältnis  $\text{Mg}^{2+}/\text{MgO}$  immer ein entsprechendes Verhältnis Lösung zu Bindemittel. Unter diesen Bedingungen einer vorgegebenen Lösungszusammensetzung sind die Möglichkeiten der Variation des Verhältnisses Lösung zu Bindemittel somit begrenzt. Das Ziel der Untersuchungen war deshalb, das optimale Verhältnis Zuschlag/ $\text{MgO}$  so zu variieren, dass man einen Beton mit guter Verarbeitbarkeit (Konsistenz, Abbindeverhalten) und mit günstigen Eigenschaften (Festigkeit, Quellverhalten) erhält.

Die eingesetzte Gesteinskörnung (Sand 0-2 mm, Kies 2–8 mm, Kies 8–16 mm) wurden so variiert, dass man ein nahezu fullerverteiltes Kornband eines feinkörnigen Zuschlags erhält. Das Kornband der Gesteinskörnung wurde bis 16 mm begrenzt und somit der maximalen Größe der in den Laborapparaturen untersuchten Probekörper angepasst. Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnis auf Betone mit einem Kornband der Gesteinskörnung bis 32 mm oder 63 mm ist gegeben.

Insgesamt wurden 6 Rezepturvarianten (MB1 bis MB6) untersucht, die Molverhältnisse  $\text{MgO}/\text{Mg}^{2+}$  im Bereich zwischen 7,5 und 16 mit Zuschlaganteilen zwischen 3 und 7,4 kg je kg  $\text{MgO}$  kombinieren. Die Rezepturen mit hohen  $\text{MgO}$ -Gehalten brachten keine Vorteile hinsichtlich der untersuchten Eigenschaften. Deshalb wurde ein Molverhältnis  $\text{MgO}/\text{Mg}^{2+} = 7,5$  beibehalten, was im Prinzip der Zusammensetzung des klassischen  $\text{MgO}$ -Betons entspricht.

Bei dieser Zusammensetzung des Bindemittels (Molverhältnis  $\text{MgO}/\text{Mg}^{2+}$ ) kann die Konsistenz des Mörtels nur über den Zuschlaganteil bzw. die Gesteinskornverteilung verändert werden. Deshalb wurde für das vorliegende Molverhältnis  $\text{MgO}/\text{Mg}^{2+} = 7,5$  der Zuschlaganteil variiert. Ein Ausbreitmaß von 400 mm (Konsistenzbereiche F2 – F3 nach DIN 1048, Übergangsbereich zwischen plastischer und weicher Konsistenz mit Rüttelverdichtung) wurde bei einem Masseverhältnis Zuschlag/ $\text{MgO}$  von ca. 6 erhalten

(siehe Abb. 59). Diese Rezeptur MB6 entspricht der Zusammensetzung des klassischen MgO-Betons.



**Abb. 59:** Ausbreitmaß der untersuchten MgO-Beton – Rezepturen

Für höhere Molverhältnisse MgO/Mg<sup>2+</sup> kann der Mörtel wesentlich weniger Zuschlag aufnehmen. Ein Ausbreitmaß von 400 mm erhält man beispielsweise auch für die Rezeptur MB3 (Molverhältnis MgO/Mg<sup>2+</sup> = 12, Masseverhältnis Zuschlag/MgO = 3).

Die Zusammensetzung der als Vorzugsvariante für MgO-Beton ausgewählten Rezeptur MB6 ist wie folgt:

unaufbereitetes MgO 921 der Fa. Lutz GmbH,  $d_{50} = 23,42 \mu\text{m}$ : 11,8 Masse %

R-Lösung: 15,4 Masse %

Sand 0-2 mm: 43,7 Masse %

Kies 2-8 mm: 21,8 Masse %

Kies 8-16 mm: 7,3 Masse %

Molverhältnis MgO/Mg<sup>2+</sup> 7,5

Massenverhältnis Zuschlag/MgO 6,2

Bindemittelgehalt je m<sup>3</sup> Beton 267 kg

Das Material hat folgende Eigenschaften:

Ausbreitmaß 407 mm

Rohdichte nach 1 Tag 2,26 t/m<sup>3</sup>

Erstarrungsbeginn (DIN EN 196, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	8 h
Erstarringsende (DIN EN 196, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	10 h
Längenänderung nach 3 Monaten (Lagerung bei 25°C, 40 % rel. Luftf.)	+ 6,8 mm/m (Quellen)
Einaxiale Druckfestigkeit (28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	$65 \pm 17$ MPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	$71 \pm 7$ MPa
Statischer E-Modul (Zylinder, 28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	$39 \pm 2$ GPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	$47 \pm 8$ GPa
Spaltzugfestigkeit (Zylinder, 28 Tage, 25°C, 40 % rel. Luftf.)	$5,7 \pm 1,4$ MPa
- nach 6 Monate Lagerung in R-Lösung	$7,4 \pm 0,7$ MPa
Adiabatische Hydratationswärme (Maximum der Wärmefreisetzung nach 5 bis 40 h)	68,4 J/g
Linearer Ausdehnungskoeffizient bei Temperaturerhöhung bis 80 °C	$10 \cdot 10^{-6}$ K <sup>-1</sup>
Permeabilität (Messung mit CaCl <sub>2</sub> –MgCl <sub>2</sub> –Lösung)	$3 \cdot 10^{-19}$ m <sup>2</sup>

Das Abbindeverhalten der MgO-Binder, die der Rezeptur MB6 entsprechen, liegt im üblichen Bereich der Normwerte für Zement (Erstarrungsbeginn > 1 h, üblich 3 h, Erstarringsende < 12 h). Ein langer Erstarrungsbeginn ist vor allem für die Verarbeitung vorteilhaft.

Das ausgeprägte Quellverhalten unter den gegebenen Bedingungen (25 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit) bedeutet, dass im trockenen Einbauzustand ein guter Kontakt zum Gebirge und möglicherweise eine flüssigkeitsdichte Kontaktfuge erreicht werden kann.

Nach Erkenntnissen der durchgeföhrten *in situ* Versuche mit MgO-Beton-Elementen in Bohrlochverschlüssen und den Erfahrungen beim Rückbau der Oberflächenpacker aus MgO-Beton kann man davon ausgehen, dass die Festigkeit des Verbundes zwischen MgO-Beton und dem vorliegenden Gebirge höher ist, als die Festigkeit des Gebirges in der ausbruchsnahen Randzone. Unabhängig von möglichen selektiven Löseerscheinungen wurde in der Kontaktzone ein fester Gefügeverband zwischen dem MgO-Beton und dem anstehenden Gebirge beobachtet (siehe Abb. 60). Allerdings schließt der gute mechanische Verbund zwischen MgO-Beton und Gebirge eine hydraulische Durchlässigkeit in lokal eng begrenzten Bereichen z.B. durch selektiv angelösten Tachyhydrit in dieser Kontaktzone nicht aus.

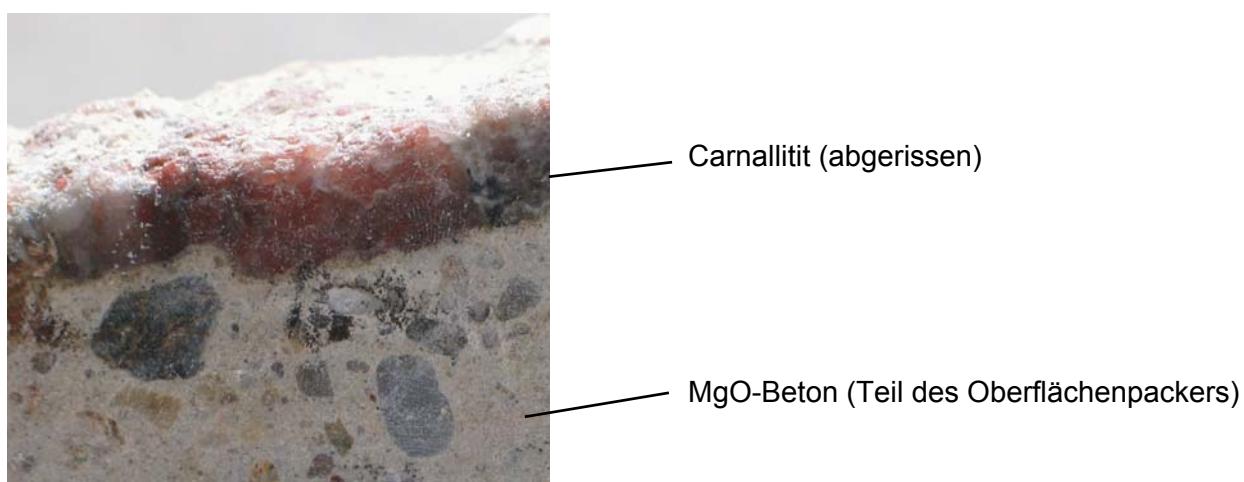
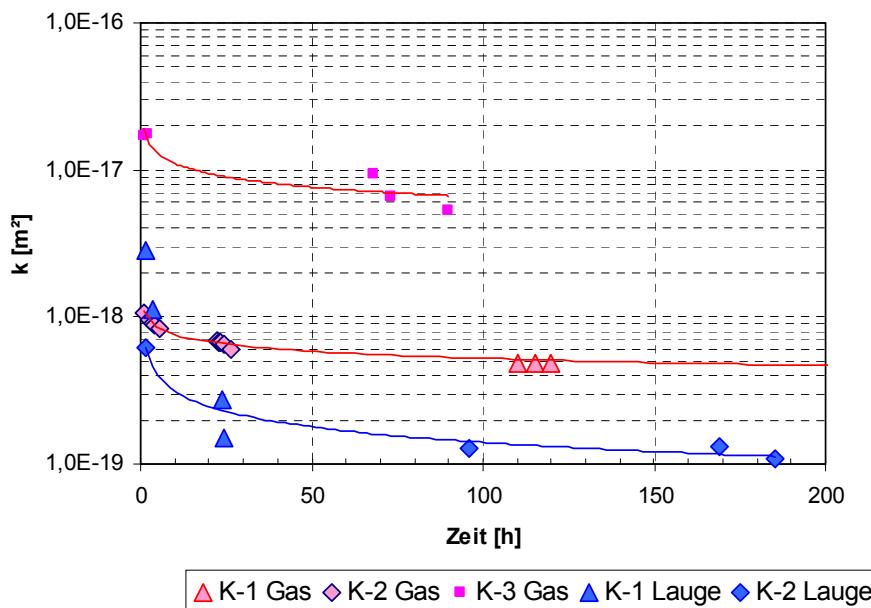


Abb. 60: Verbund zwischen MgO-Beton und Carnallititgestein

Unter konservativer Annahme beträgt die aus der adiabatischen Hydratationswärme abgeleitete maximale adiabatische Temperaturdifferenz ca. 70 K (bei  $c_{\text{MgO-Beton}} = 1 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ). Bei weniger aktivem MgO wird sie bei ca. 40 K liegen. Die in der Realität auftretende Temperaturdifferenz ist infolge der Wärmeleitung in das Gebirge und Wärmeangabe in die Wetter (Wärmeabgabe an den Außenflächen) geringer. Sie hängt u. a. von der Geometrie und den thermischen Eigenschaften (Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit) des MgO-Betons und des umliegenden Gebirges sowie der Einbringtechnologie ab. Um Modellrechnungen durchführen zu können, sind diese Parameter in Abhängigkeit von der Temperatur und dem Abbindezustand zu bestimmen.

Die durchgeführten Permeabilitätsmessungen sind für Widerlagermaterialien insofern von Bedeutung, da sie für Redundanzbetrachtungen (Dichteigenschaften des Widerlagermaterials) notwendig sind. Die Ergebnisse der Messungen [39] zeigt Abb. 61. Insgesamt werden die Werte als ausreichend niedrig angesehen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass für die vorliegenden Randbedingungen die Permeabilitätswerte mit niedrigen Manteldruck zutreffend sind.



**Abb. 61:** Permeabilität von Magnesia beton MB6 in Abhängigkeit von der Zeit (K-1 und K-2 bei Manteldruck 150 bar, K-3 bei Manteldruck 15 bar)

Aus der mit  $\text{CaCl}_2\text{-MgCl}_2$ -Lösung gemessenen Permeabilität lässt sich folgende hydraulische Leitfähigkeit ableiten (bei  $\rho_L = 1,417 \text{ g/cm}^3$ ,  $\eta_L = 17,4 \text{ mPas}$ ):

$$k_f = (0,8 \text{ bis } 2,4) \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$$

Dieser Wert beschreibt ein sehr gutes Dichtverhalten gegenüber der zutretenden Salzlösung. Diese Ergebnisse wurden durch in situ Versuche mit Bohrlochverschlüssen aus diesem Material (Test mit R-Lösung) bestätigt (siehe Abschnitt 5.3.3).

### 6.1.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der untersuchte MgO-Beton MB6 gegenüber den beiden möglichen Salzlösungseinwirkungen technisch dicht ist. Als Fließwege kommen somit nur die Kontaktbereiche Gebirge – MgO-Beton und Risse im MgO-

Beton in Betracht. Für das Entstehen dieser Risse ist vor allem eine unzureichende Einbauqualität verantwortlich (Betonierungsfugen, Temperatureigenspannungen).

Für die weitere Anpassung des MgO-Betons MB6 für den praktischen Einsatz als Widerlagermaterial sind folgende Arbeiten erforderlich:

- Anpassung des Materials an die Einbautechnologie,
- Erprobung unter realen Bedingungen,
- Untersuchung der Qualität des in situ eingebrochenen Materials.

## **6.2 Dauerplastische und ortsstabile Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern\***

### **6.2.1 Zielstellung**

Zielstellung dieses Untersuchungsschwerpunktes ist die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von dauerplastischen Baustoffen auf der Basis von Magnesia-Bindern zu einem Schutzelement in carnallitischen Salzformationen, die neben Carnallit auch Tachyhydrit und Kieserit enthalten. Diese Baustoffe, die triaxial eingespannt und druckbeaufschlagt (ca. 5-10 bar) werden, sind so zu konzipieren, dass sie in diesem Einspannungszustand bei Vorhandensein von Imperfektionen der Kontaktzone bzw. der ALZ eine Tachyhydrit-gesättigte Schwerelösung abgeben und damit mögliche Migrationswege ausfüllen und abschirmen können. Bei einem größer werdenden Spannungsauflauf durch Konvergenz sollen diese druckplastischen Baustoffe zusätzlich in Spalten und Risse migrieren. Die Funktionalität des Baustoffs muss über ausreichend lange Zeiträume erhalten bleiben.

Ausgehend von den Ergebnissen der lösekinetischen Untersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) ergibt sich eine weitere Anwendungsmöglichkeit für druckplastische, ortsstabile Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern. Aus der Notwendigkeit einer Sättigung der anströmenden Lösung hinsichtlich des Minerals Tachyhydrit ist die Entwicklung eines zuverlässigen Aufsättigungspfades notwendig. Durch die aus der Praxis bekannte Vorgehensweise mit Vorschüttungen kann bereits eine hohe Vorsättigung der anströmenden Lösung hinsichtlich der entsprechenden Mineralsalze erreicht werden. Die vorliegenden Erfahrungen zeigen jedoch, dass bei realen Streckenquerschnitten eine vollständige Aufsättigung in der Regel nicht erreicht wird. Eine deutlich erhöhte Sicherheit kann nur durch ein der Vorschüttung nachgeschaltetes Schutzelement mit eingebautem Depotmaterial und einer definiert eingestellten Durchlässigkeit gewährleistet werden.

### **6.2.2 Einordnung und Charakterisierung des Baustoffsystems**

Als Magnesia-Binder sind Baustoffe zu verstehen, die im erhärteten Zustand basische Magnesiumchlorhydrate als Festigkeitsträger bilden. Prinzipiell sind hierbei Grundtypen dieses Baustoffsystems zu unterscheiden, die zum einen im ausreagierten Zustand eine druckplastische Konsistenz (K-UTEC-Gelbaustoffe) aufweisen und solche, die betonartig erhärten [40, 41]. Plastische Baustoffsysteme finden insbesondere als Strömungsbarrieren, bei der Sicherung von  $MgCl_2$ -lösungs- oder lufterfüllten Hohlräumen aber auch bei der ortsstabilen Stapelung von Depotlösungen sowie bei der Sicherung von lösungserfüllten Schachtröhren im  $MgCl_2$ -Horizont Anwendung [42 - 44]. Die hoch festen Mörtel eignen sich z. B. zur Errichtung von statischen Dammbauelementen, Widerlagern oder zur Stabilisierung von untertägigen Hohlräumen im Salinar [45, 46].

\* Vergl. Teilbericht:

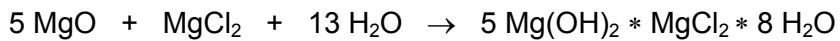
Krauke, W.; Lack, D.; Klimke, A.: Entwicklung von dauerplastischen und von druckplastischen, ortsstabilen Baustoffen auf der Basis von Magnesia-Bindern zum Schutz der ALZ und zur Aufkonzentrierung der anströmenden Fluide. K-UTEC Sonderhausen, 13.10.2004

Als Bindemittel zur Darstellung von druckplastischen Baustoffen dieses Grundtyps kommen in der Regel gebrannter bzw. hydratisierter Magnesit, Dolomit und Kalkstein bzw. Mischungen dieser Bindemittel zum Einsatz. Bisherige Anwendungen, die im Steinsalz oder in Tachyhydrit-freiem Carnallitit erfolgten, gingen von R- bzw. Q-Lösung bzw. entsprechenden Verdünnungen bis zu einem  $MgCl_2$ -Gehalt von > 200 g/l aus. Im Labor- und Technikumsmaßstab konnten stabile plastischen Baustoffe mit Lösungen bis zu einem  $MgCl_2$ -Gehalt von  $\geq 150$  g/l hergestellt werden [40, 44].

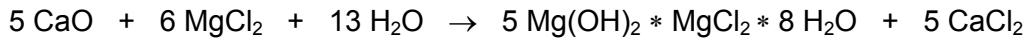
Zur Aussteuerung der rheologischen und der physikalischen Eigenschaften erfolgt bei beiden Grundsystemen der Einbau von chemisch inerten Füllstoffen unterschiedlicher Körnung. Neben Steinsalz werden verschiedene Gesteinsmehle bevorzugt auf der Basis von Anhydrit und Schiefermehl oder Quarzsand verwendet.

Die chemischen Reaktionen, die zur Bildung der festigkeitsbestimmenden basischen Magnesiumchloridhydrate führen, lassen sich bei Einsatz von Bindemitteln auf der Magnesia- bzw. Kalk-Basis vereinfacht wie folgt darstellen:

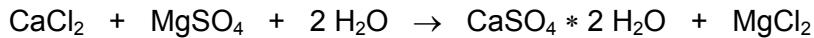
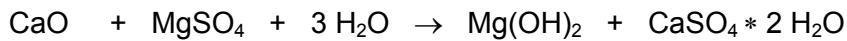
MgO/Mg(OH)<sub>2</sub>



CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>



Bei gleichzeitigem Einsatz von sulfathaltigen Lösungen und CaO/Ca(OH)<sub>2</sub>-haltigen Bindemittel erfolgt zusätzlich die Bildung von Calciumsulfat (meist als Gips) entsprechend folgender Reaktionen:



Die Bildung der basischen Magnesiumchloridhydrate wird im Wesentlichen durch den  $MgCl_2$ -Gehalt der Lösungsphase, die Art des Bindemittels sowie den Bindemittelanteil an der Suspension bestimmt. Beim Einsatz konzentrierter  $MgCl_2$ -Lösungen erfolgt bevorzugt die Bildung der 3:1:8-Phase ( $3 \text{ Mg(OH)}_2 * \text{MgCl}_2 * 8 \text{ H}_2\text{O}$ ). Die Tendenz zur Bildung der 5:1:8-Phase ( $5 \text{ Mg(OH)}_2 * \text{MgCl}_2 * 8 \text{ H}_2\text{O}$ ) nimmt mit niedrigeren  $MgCl_2$ -Gehalten der Ausgangslösung bzw. mit dem, durch chemische Reaktion bedingten, Absinken der  $MgCl_2$ -Konzentration in der Suspension zu [40].

K-UTEC-Gelbaustoffe auf Basis von Magnesia-Bindern zeichnen sich durch dauerplastische Eigenschaften bei statischer Druckbeanspruchung im Bereich von < 1-3 MPa aus, die neben der Abgabe von physikalisch gebundener Lösung ein Eindringen des extrem feinkörnigen Materials in feinste Klüfte und Spalten ermöglicht. Bei entsprechenden Drücken wird zunächst die physikalisch gebundene Haftlösung aus der kristallinen Netzwerkstruktur der basischen Magnesiumchloridhydrate herausgepresst. Diese Lösung kann durch Variation der chemischen Zusammensetzung der Ausgangs-MgCl<sub>2</sub>-Lösung, den Bindemittelleinsatz und durch den gezielten Einsatz von Füllstoffen (z. B. leicht lösliche Salze) in ihrer Zusammensetzung variabel an die jeweiligen geologischen Verhältnisse angepasst werden. Sie wirkt als Schutzmedium (Schwerelösung) in sensiblen Gebirgsbereichen gegenüber zutretenden Lösungen.

Im Unterschied zu den durch sehr hohe Abbindetemperaturen ( $> 80\text{--}120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) gekennzeichneten hochfesten Magnesia-Binder ist der Verfestigungsprozess der plastischen Baustoffe nur mit einem moderaten Temperaturanstieg ( $< 30 \text{ K}$ ) verbunden.

Wissensdefizite sind derzeit noch bei der Anwendung von plastischen Baustoffsystmen in sensiblen Salzformationen in denen Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit nebeneinander vorliegen vorhanden. Insbesondere die Mechanismen der Verfestigung und die Stabilität der Baustoffe bei Einsatz von hoch  $\text{CaCl}_2$ -haltigen Lösungen sind noch nicht ausreichend geklärt.

### 6.2.3 Versuchsdurchführung

Die nachfolgenden Untersuchungen konzentrierten sich zum Einen auf die Darstellung eines dauerplastischen Systems für den Einsatz zum Schutz der ALZ und zum Anderen auf die Entwicklung eines druckplastischen, ortsstabilen Baustoffs mit eingebautem Tachyhydrit-Depot und definierter, im Vergleich zum anstehenden Gebirge etwas höheren Fluideurchlässigkeit ausgerichtet. Der ortsstabile Baustoff soll eine gezielte und vollständige Sättigung der anströmenden Lösung hinsichtlich des Mineralsalzes Tachyhydrit absichern. Er soll des Weiteren in der Lage sein, bei Druckbeanspruchung die im Baustoff fixierte Tachyhydrit-gesättigte Lösung zur Sicherung der ALZ in dort vorhandene Risse und Poren abzugeben.

Folgende Bindemittel und Füllstoffe wurden zur Baustoffentwicklung eingesetzt:

- $\text{MgO}$
- Dolomitkalkhydrat (DKH)
- Anhydrit

Als Mischaggregat zur Dispergierung der Bindemittelkomponente wurde ein Intensivmischer vom Typ Dispermat CA40-C der Fa. Getzmann eingesetzt. Die angemischten Suspensionen wurden auf ein Fließmaß von 55 cm eingestellt.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Messwerte wurden Referenzmischungen mit R-Lösung hergestellt.

Für die Mischungen wurden folgende Materialkennwerte bestimmt:

- Fließmaß in der Fließrinne als Funktion der Zeit
- Abbindeverhalten nach DIN EN 196 (Prüfverfahren für Zement)
- Einaxiale Druckfestigkeit mittels Taschenpenetrometer
- Einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 1048 nach 7d, 14d, 28d, 60d und 120d
- Rohdichte nach DIN 18125

Zur Vermeidung von Austrocknungseffekten wurden die hergestellten Prüfkörper unter Luftabschluss gelagert.

### 6.2.4 Versuchsergebnisse

Aus Tachyhydrit-gesättigten Lösungen können dauerplastische sowie ortsstabile Baustoffe hergestellt werden, die vergleichbare Eigenschaften wie „Gelbaustoffe“ auf der Basis von konzentrierten  $\text{MgCl}_2$ -Lösungen aufweisen.

Zur Darstellung eines dauerplastischen Baustoffs sowie eines ortsstabilen Tachyhydrit-Depots folgende Vorzugsmischungen angeben:

- dauerplastischer Baustoff

DKH: 75 g/1.000 ml Lösung  
MgO: 50 g/1.000 ml Lösung  
Anhydrit: 2.350 g/1.000 ml Lösung

- ortsstabiler Baustoff

DKH: 50 g/1.000 ml Lösung  
MgO: 100 g/1.000 ml Lösung  
Anhydrit: 2.460 g/1.000 ml Lösung

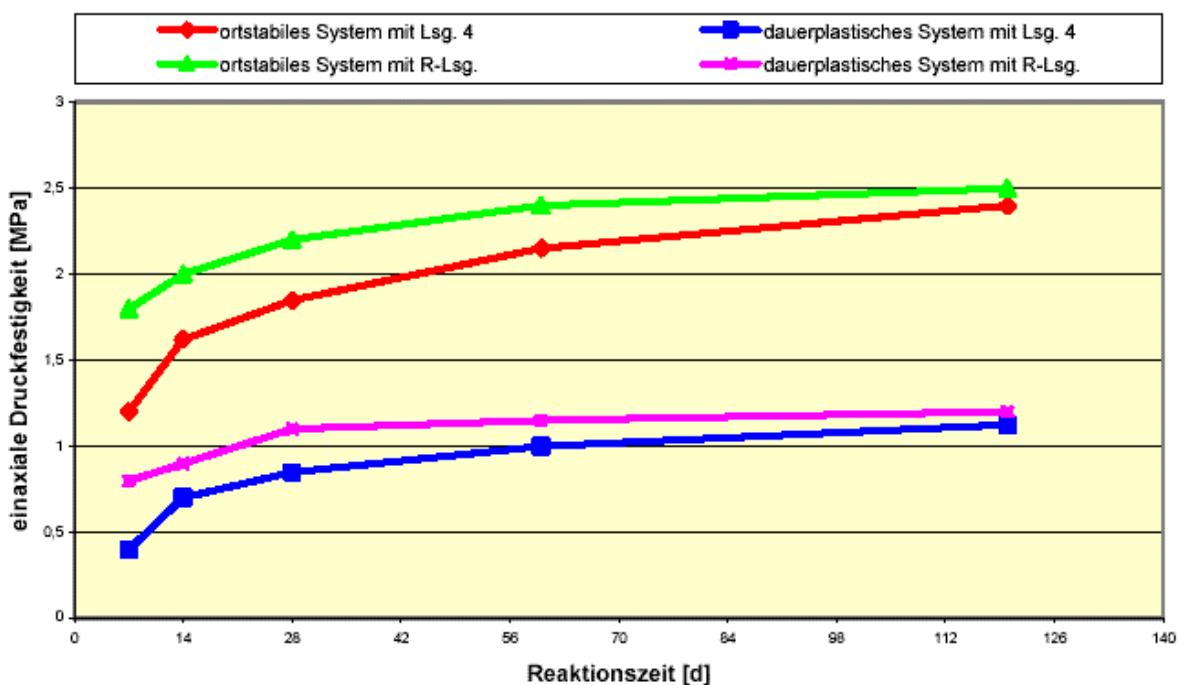
Die ermittelten Materialkennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 11 zusammengefasst:

**Tabelle 11:** Materialkennwerte der Gelbaustoffe

Parameter	dauerplastischer Baustoff		ortsstabiler Baustoff	
	Tachyhydrit-Lsg	R-Lösung	Tachyhydrit-Lsg	R-Lösung
Verarbeitungszeit [min]	120	60	45	30
Abbindebeginn [h]	22	18	22	16
Abbindeende [h]	n. b.	-	95	-
Penetrometertest 28d-Wert [MPa]	1,0	1,2	> 1,8	> 1,8
Temp.-Anstieg beim Abbinden [K]	8,1	14,4	12,9	19,8
Rohdichte [g/cm³]	2,06	1,81	2,14	1,86

n. b. Aufgrund der Plastizität des Baustoffs konnte kein Abbindeende bestimmt werden.

Die Entwicklung der einaxialen Druckfestigkeit über einen Zeitraum von 120d zeigt Abb. 62.



**Abb. 62:** Gelbaustoffe: einaxiale Druckfestigkeit gemäß DIN 1048

Die erzielten Messergebnisse zeigen, dass bei Einsatz von Tachyhydrit-gesättigter Lösung im Vergleich zu R-Lösung die chemischen Reaktionen verzögert verlaufen. Belege hierfür sind eine geringere Maximaltemperatur beim Abbindeprozess und einem verlangsamten Festigkeitszuwachs bei nahezu gleicher Endfestigkeit.

Die Untersuchungen zum Durchströmungsverhalten mit den extrem hochkonzentrierten Lösungen erwiesen sich unter apparativen Gesichtspunkten aufgrund von ausgeprägten Rekristallisationserscheinungen in den Zuleitungen und Übergängen als ausgesprochen problematisch. Die bisher durchgeführten Messungen besitzen lediglich orientierenden Charakter und ergaben Permeabilitäten im Bereich von  $10^{-16}$ - $10^{-17}$  m<sup>2</sup>.

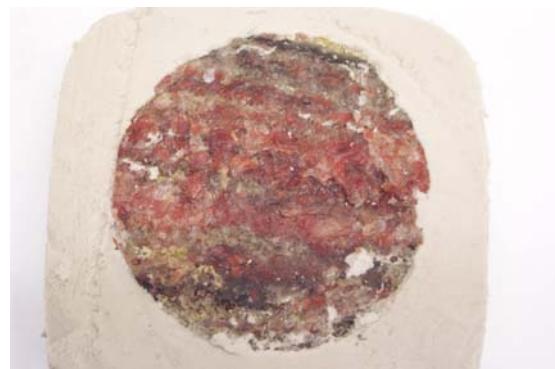
Die an aufgebrochenen Prüfkörpern durchgeführten mikroskopischen Untersuchungen belegen durch den Nachweis von neu gebildetem Tachyhydrit die Tachyhydrit-Sättigung der in den Baustoffen gebundenen Lösungen. Partiell wurde auch  $\text{CaCl}_2 \times 6 \text{ H}_2\text{O}$  in den Bohrkernen nachgewiesen. Aus den abgepressten Lösungen erfolgte ebenfalls eine Kristallisation von Tachyhydrit und von  $\text{CaCl}_2 \times 6 \text{ H}_2\text{O}$  sowie eine Nachvergelung der Lösungsphase.

### 6.2.5 Nachweis der Schutzwirkung

In Vorversuchen mit plastischen Baustoffen auf der Basis von Magnesia-Bindern, die mit Tachyhydrit-ungesättigten Lösungen (Q- und R-Lösung sowie  $\text{CaCl}_2$ -und  $\text{MgCl}_2$ -haltige Lösungen) hergestellt wurden konnte gezeigt werden, dass diese Systeme nicht in Salzformationen mit gebändertem Tachyhydrit eingesetzt werden können. Abb. 63 belegt eindrucksvoll ein nahezu vollständiges Herauslösen der Tachyhydrit-Bänder aus dem Carnallit-, Tachyhydrit- und Kieserit-haltigen Bohrkern.



**Abb. 63:** Bohrkern eingebettet in einen dauerplastischen Baustoff aus R-Lösung



**Abb. 64:** Bohrkern eingebettet in dauerplastischen Baustoff mit Tachyhydrit-gesättigter Lösung

Aus dauerplastischen und aus ortsstabilen Baustoffen auf der Basis von Tachyhydrit-Lösungen konnten oberflächlich trockene und intakte Bohrkerne herauspräpariert werden (Abb. 64). Ein Durchfeuchten der Bohrkerne oder ein Herauslösen der Tachyhydrit-Bänder und des Kieserits wurde nicht festgestellt. Im Kontaktbereich Bohrkern-Baustoff wurden im mineralogischen Befund sehr feine Gips-Nadeln nachgewiesen. Zusätzlich wurden einzelne Kristalle von Sekundär-Carnallit und Halit identifiziert.

### 6.2.6 Zusammenfassung

Für die Errichtung von Absperrbauwerken im Steinsalz existieren anwendungserprobte hoch feste sowie druckplastische Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern (K-UTEC-Systeme), deren Einsatz prinzipiell auch in carnallitischen Salzformationen möglich ist. In Formationen, in denen neben dem Carnallit auch Tachyhydrit und Kieserit enthalten sind, ergeben sich deutlich höhere Anforderungen hinsichtlich der Zusammensetzung der als Anmischflüssigkeit eingesetzten Lösungsphase sowie des anströmenden Fluids. In beiden Fällen ist eine Tachyhydrit-Sättigung zur Verhinderung von schädigenden Auflösungseffekten in der Kontaktzone zum Wirtsgestein sowie zur Unterbindung von Umläufigkeiten des Absperrbauwerkes über die Tachyhydrit-Bänder zu gewährleisten.

Tachyhydrit-gesättigte Lösungen mit hohem  $MgCl_2$ -Gehalt können sowohl zur Herstellung von dauerplastischen als auch zur Herstellung von ortsstabilen Baustoffen eingesetzt werden. Bei einem verzögerten Verfestigungsverlauf werden im quasi ausreagierten Zustand vergleichbare Festigkeitskennwerte wie mit den K-UTEC-Systemen bei Einsatz von konzentrierten  $MgCl_2$ -Lösungen (z. B. Q- und R-Lösung bzw. Edelsole) erreicht. Deutliche Unterschiede ergeben sich jedoch hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung der physikalisch gebundenen Lösung, die auf die Anwendungen in verschiedenen Wirtsgesteinen eingestellt ist.

Dauerplastische Baustoffe können zum längerfristig aktiven Schutz der ALZ eingesetzt werden. Der ortstabile Baustoff ermöglicht die Vorhaltung eines Tachyhydrit-Lösungssstapels mit eingebautem Tachyhydrit-Depot zur vollständigen Tachyhydrit-Sättigung der anströmenden Lösung aus der Vorschüttung und zur Beschickung und Abschirmung der ALZ.

Insgesamt ist festzustellen, dass mit den untersuchten mineralischen Baustoffkomponenten ein zu den steifen Querschnittsabdichtungselementen und den auf bitumösen Medien basierten Umströmungshindernissen komplementäres längerfristig funktionsaktives Schutzelement insbesondere zur Abschirmung des ALZ-Bereiches realisiert werden kann. Hierbei ist besonders auf die im Versuch nachgewiesene ausgeprägte Reaktionsträgheit Tachyhydritisch-kieseritischer Mineralparagenesen beim Kontakt mit speziellen Tachyhydrit-gesättigten Lösungen und die im Wirtsgestein generierbaren Tachyhydrit-Depots hinzuweisen.

### 6.3 Baustoffe auf Anhydritbasis

Die Arbeiten zu diesem Abschnitt wurden vom IfG Leipzig durchgeführt. Über die Ergebnisse liegt ein Bericht [47] vor. Die wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesem Bericht sind:

- Die Datenbasis für die Bewertung der Eigenschaften  $CaSO_4$ -basierter Baustoffe ist für die vorliegende Fragestellung weder aus geomechanischer Sicht noch aus geochemischer Sicht ausreichend.
- Der bisher in Betracht gezogene Einsatz von Wasser oder  $NaCl$ -Lösung als Anmachflüssigkeit ist kritisch zu betrachten.
- Bei einer  $MgCl_2$ -gesättigten Lösungen als Anmachflüssigkeit ist die Hydratisierung von Anhydrit als Zuschlagstoff nicht mehr möglich und die von Halbhydrat deutlich verzögert.
- Weiterführende Arbeiten sollen sich auf die Weiterentwicklung optimaler Baustoffe auf Halbhydratbasis unter Verwendung von Steinsalz- oder alternativen Zuschlägen und auf die Entwicklung optimaler Einbringtechnologien (z.B. Spritzbetontchnologie) konzentrieren.
- Im Ergebnis der Untersuchungen werden über die ursprüngliche Planung hinaus neue Verfahren entwickelt, um sowohl die Scherfestigkeit als auch die direkte Zugfestigkeit der Trennfläche zwischen Gebirge und verschiedenen Baustoffen zu bestimmen.

## 7 Entwicklung des Grundkonzeptes\*

Im Ergebnis der im Vorhaben "Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit)" durchgeführten Untersuchungen wird ein Grundkonzept für einen Streckenverschluss im leichtlöslichen Salzgestein entwickelt. In diesem Grundkonzept sind die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete (Abschnitte 1 – 6) berücksichtigt. Das vorliegende Grundkonzept ist die Basis für das zukünftige Versuchskonzept zur *in situ* Erprobung einzelner Verschlusselemente.

### 7.1 Schlussfolgerungen für das Verschlusskonzept Teutschenthal

Aufgrund einer in Teilbereichen relativ hohen Durchlässigkeit des Gebirges im Grundspannungszustand ( $2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ ) ist es vorteilhaft, zur Reduzierung der Volumenströme über das Gebirge möglichst lange Verschlüsse zu konzipieren (kleine Flüssigkeitsdruckgradienten zur Verringerung des Volumenstromes).

Die Dichtung des Hohlraumquerschnittes auf hohem Niveau (mindestens eine Zehnerpotenz geringer als das ungünstigste Gebirge, d.h.  $< 2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ) ist beispielsweise mit dem *in situ* getesteten MgO-Beton in Kombination mit Bitumenzwischenschichten problemlos möglich. Die Hauptschwierigkeiten liegen in der Dichtung des aufgelockerten, ausbruchsnahen Bereiches und des Kontaktbereiches Gebirge - Bau- bzw. Dichtmaterial. Aufgrund der Wichtigkeit und der Unsicherheiten bei der Dichtung dieser zwei Bereiche werden hier verschiedene, auf unterschiedlichen Wirkungsweisen beruhende Dichtsysteme (diversitäre Vorgehensweise) hintereinander geschaltet, so dass der Verschluss ein Mehrkomponentensystem (redundanter Aufbau des Gesamtsystems) darstellt.

Zur Verminderung der Volumenströme über den aufgelockerten Gebirgsbereich (I) und/oder den Kontaktbereich (II) bieten sich folgende mögliche Wirkprinzipien an:

1. Verlängerung der Strömungswege (I; II; Reduzierung Druckgradient)
2. Radialer zeitabhängiger Gebirgsdruckaufbau (I; II; Überdrückung des Kontaktbereiches und Reduzierung des Spannungsdeviators bei steifem Einschluss)
3. Unterbrechung der Strömungswege im aufgelockerten Gebirge und im Kontaktbereich (I; II; Dichtungsschlitz)
4. Schließen des Kontaktbereiches durch Einsatz quellender/schwellender Materialien unter Flüssigkeitseinwirkung (II)
5. Impermeabilisierung des Gebirges und des Kontaktbereiches durch aktiven Kontaktdruck der einwirkenden Salzlösungen auf einen impermeablen Gebirgsrand vor Flüssigkeitsdruckaufbau im Gebirge (I; II)
6. Injektion von Dichtmaterialien in das Gebirge/Kontaktbereich (I; II)
7. Selbsttätige Penetration von inerten Flüssigkeiten in das Gebirge (I; II)
8. Zuwachsen von Rissen, Klüften infolge chemischer Prozesse / Kristallisation (I; II)

\* Vergl. ausführlichen Teilbericht zu AP 7:

Sitz, P.; Gruner, M.; Kawka, A., Freyer, D.: Entwicklung des Grundkonzeptes. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. September 2004.

Die technische Realisierung dieser theoretisch möglichen Wirkprinzipien für die Abdichtung der gefährdeten Bereiche (Kontaktbereich und aufgelockerter, ausbruchsnaher Gebirgsbereich) ist, unter den Bedingungen des Carnallititdammes Teutschenthal, durch folgende Maßnahmen möglich:

### *1. Verlängerung der Strömungswege*

Die Verlängerung der Strömungswege ist problemlos durch Verlängerung der statischen (z.B. MgO-Beton) und/oder dichtenden Elemente (z. B. MgO-Beton, Asphalt, Bitumen) möglich. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der für die Abdichtung zum Grubenfeld Angersdorf wirksame Barrierengebirgspfeiler, d.h. der Abbaufreibereich (wirksam hinsichtlich geringer Permeabilität und ausreichender gebirgsmechanischer und geochemischer Eigenschaften) nur 150 m beträgt [48, 49]. Um ein wirksames Gesamtsystem zu erhalten, muss der Streckenverschluss in diesem Pfeilerbereich positioniert werden. Somit ist die hydraulisch wirksame Gesamtverschlusslänge sinnvoll auf 150 m begrenzt.

#### Fazit:

- Problemlos umsetzbar.
- Für horizontal verlaufende Imperfektionen (Firstspalt, geomechanisch/geochemisch bevorzugte Fließwege wie Toneinlagen, Anhydritbänder, Kieseritlagen, Mikrobruchpermeabilitäten) u.U. wenig geeignet.
- Ist daher mit anderen Maßnahmen (siehe 2 bis 8) zu kombinieren.
- Maximal wirksame Länge 150 m.

### *2. Radialer Gebirgsdruckaufbau*

Der radiale Gebirgsdruckaufbau, der vor allem für die Kontaktfugendichtung wesentlich ist, der aber auch die Permeabilität des aufgelockerten ausbruchsnahen Bereiches günstig beeinflusst (Reduzierung des Spannungsdeviators) ist durch den Einbau steifer Elemente möglich, die schnell nach dem Nachriss der verwitterten Zone eingebaut und somit wirksam werden.

In dieser Hinsicht weist der untersuchte MgO-Beton mit hohem Elastizitätsmodul ( $E_{\text{MgO-Beton}} = 39 \text{ GPa}$ ) und sehr schneller Ausbildung seiner Festigkeits- und Verformungseigenschaften (schon hohe Werte nach 72 h) gute Eigenschaften auf. Zusätzlich wirkt sich noch das nicht berücksichtigte Quellverhalten des MgO-Betons vorteilhaft aus (siehe Abschnitt 6.1.2). Es sind noch die Beanspruchungszustände im steifen Einschluss zu ermitteln und die Standsicherheit, unter Umständen unter Einsatz von Zusatzmaßnahmen, (wie z.B. Schotter- und/oder Versatzschüttungen) nachzuweisen [50, 51]. Die durchgeföhrten geomechanischen Berechnungen zeigen, dass dieser statische Nachweis erbracht werden kann (siehe Abschnitt 3).

#### Fazit:

- Problemlos umsetzbar.
- Für horizontal verlaufende Imperfektionen (z. B. Tonlagen, Anhydritbänder, Kieseritlagen) u.U. wenig geeignet. Daher mit anderen Maßnahmen (siehe 1, 3 bis 7) zu kombinieren.

### 3. Unterbrechung der Strömungswege im Gebirge und Kontaktbereich

Das Ziel ist, die Strömung durch Dichtungsschlitte im Kontaktbereich zu unterbrechen und die Strömung durch den aufgelockerten Gebirgsbereich zu reduzieren. Im Carnallit ist dies auch auf Grund der geochemischen Bedingungen besonders wichtig, da lokal sehr stark bevorzugte Fließwege (Tachyhydrit, Kontakt Tachyhydrit – Kieserit, Tonlagen) nachgewiesen wurden [28]. Es ist zu klären, ob für diese speziellen Fälle unter Umständen nur lokale, eng begrenzte Fließwegunterbrechungen vorteilhaft bzw. ausreichend sind.

Folgende Probleme sind noch zu lösen:

- Ermittlung der günstigsten Geometrie der Dichtungsschlitte (Tiefe, Breite).
- Vor- und Nachteile verschiedener Dichtungsschlitzmaterialien, wobei nur MgO-Mörtel bzw. MgO-Binder, Zweikomponentenbitumen, heiß verpresste oder sehr niedrigviskose Bitumina (z.B. B 900), Asphaltbeton bzw. Asphaltmastix, Gussasphalt in Betracht kommen.
- Gebirgsschonendes Herstellen von Dichtungsschlitten entsprechend den ermittelten Abmessungen und Ausfülltechnik bzw. Einbringtechnik der Dichtmaterialien in die Dichtungsschlitte (z.B. Einpressdruck, Verpressanordnung, Entlüftung, Passgenauigkeit, manuelle Einbautechniken).

#### Fazit:

- Umsetzbar.
- Unterbricht auch horizontal verlaufende Imperfektionen.
- Forschungsarbeiten sind noch erforderlich (vor allem für die optimale Schlitzgeometrie und die Einbau- bzw. Verpresstechnologie).

### 4. Schließen des Kontaktbereiches durch Einsatz unter Flüssigkeitsdruck quellender / schwelender Materialien

Von den unter Salzlösungsdruck quellenden / schwelenden Materialien kommt nach derzeitigem Kenntnisstand nur Bentonit in Betracht. Der Einsatz von Bentonit im Tachyhydrithaltigen Carnallitit bringt im Gegensatz zum Steinsalz ein Problem infolge der hohen Affinität des Tachyhydrithaltigen Carnallitits zum Wasser mit sich (Aufnahme des Wassers und Gebirgsauflösung vor allem im Kontaktbereich, siehe Abschnitt 5.3.2). Deshalb wird der Einsatz von Bentonit als Dichtmaterial im leichtlöslichen Salzgestein nicht empfohlen.

#### Fazit:

- Aufgrund der ungelösten Probleme (unter Umständen Auflöseerscheinungen am Wirtsgestein) wird auf den Einsatz von Bentonit im Carnallitit verzichtet.
- Darüber hinaus ist nicht geklärt, ob horizontal verlaufende Schichtgrenzen durch den radialen Quelldruck überhaupt verschlossen (impermeabilisiert) werden können.

## *5. Impermeabilisierung des Gebirges und des Kontaktbereiches durch aktiven Kontaktdruck der einwirkenden Salzlösungen auf einen impermeablen Gebirgsrand vor Flüssigkeitsdruckaufbau im Gebirge*

Dieser aktive Kontaktdruck kann am zweckmäßigsten durch den Flüssigkeitsdruck initiiert aufgebracht werden. Voraussetzung dafür sind folgende Maßnahmen:

- eine dauerhafte flüssigkeits-/laugendichte Beschichtung des Gebirges (Bitumen, Latexbitumen, 2K-Bitumen, Kunsthärze),
- eine sofort einsetzende Wirkung des Flüssigkeitsdruckes und eine geringe Gebirgsauflockerung erfordern einen hochpermeablen Gebirgsstützkörper mit möglichst hoher Steifigkeit oder/und geringer Länge,
- zur Erzielung einer hohen Steifigkeit und zur Stützung der flüssigkeitsdichten Beschichtung kommen als „Hohlraumausfüllungen“ MgO-Hohlblöcke, MgO-Filtersteine bzw. Keramik-Filtersteine, Kiese, Schotter in Betracht, wobei ringförmige Kontaktausfüllungen zu bevorzugen sind.

### Fazit:

Die dauerhafte Wirksamkeit dieser Gebirgsimpermeabilisierung hängt von konstruktiven Elementen ab, deren Langzeitfunktionstüchtigkeit nicht vorausgesagt werden kann (dauerhaft impermeable Beschichtung der Carnallititoberfläche). Aus diesem Grunde kann diese Maßnahme bei der weiteren Konzeptplanung nicht berücksichtigt werden.

## *6. Injektion*

Die Injektion betrifft den Kontaktspalt und den unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereich von maximal wenigen 'cm' Dicke. Aufgrund der geringen Spaltweiten bzw. geringen Durchlässigkeiten und der geochemischen Besonderheiten (bei Injektionen mit MgO-Systemen sind Löseerscheinungen am Gebirge nicht auszuschließen) sind als Injektionsmittel nur inerte Flüssigkeiten (keine Suspensionen) mit geringen Anfangsviskositäten wie z. B. das Zweikomponentenbitumen einsetzbar.

Dieses Injektionsbitumen soll zielgerichtet in die gefährdeten Bereiche (Kontaktspalt- und unmittelbar danach angrenzender Gebirgsbereich) verpresst werden.

Als zielgerichtete Einpressmöglichkeiten bieten sich an:

- ringförmig verlegte perforierte Injektionsleitungen im Kontaktbereich,
- horizontal axial verlegte perforierte Injektionsleitungen im Kontaktbereich,
- im Gebirge und/oder Verschlusselement ausgesparte Injektionskammern (unter Umständen in Kombination mit Dichtungsschlitzten).

Die ersten *in situ* Tests mit Zweikomponenten-Injektionsbitumen sind positiv verlaufen. Für den Einsatz dieser Verfahren sind noch vertiefende Untersuchungen zum Injektionsmaterial (Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften von der Zeit, Rezepturanpassungen, Eigenschaften im Endzustand) und zur Injektionstechnik erforderlich.

### Fazit:

Die gezielte Injektion von Dichtungsmitteln in die Kontaktfuge und in den unmittelbar angrenzenden Gebirgsbereich ist eine sehr gute Möglichkeit über große Längen die Kontaktfuge und den unmittelbar angrenzenden, hinsichtlich Umströmung besonders gefährdeten, Gebirgsbereich zu dichten. Das Verfahren muss unter den gegebenen Bedingungen großtechnisch erprobt werden; u.U. ist es möglich, vor der Injektion zielgerichtet Permeabilitätsbestimmungen des Kontaktspaltes vorzunehmen, um Injektionsmaterial und Injektionsdruck den Gegebenheiten anpassen zu können. Hinsichtlich Injektionsmaterial und Verpresstechnik sind noch Untersuchungen erforderlich.

### *7. Selbsttätige Penetration von inerten Flüssigkeiten in das Gebirge*

Das Verfahren betrifft inerte Flüssigkeiten mit hoher Viskosität als Dichtmaterialien, die durch Schwerkraft und/oder Überdruck z.B. durch die zusitzenden Laugen unter Druck gesetzt werden und damit den Kontaktbereich sicher verschließen und infolge ihres newtonischen Flüssigkeitscharakters in Wegsamkeiten des Gebirges eindringen können. Aufgrund der in der Regel hohen Viskosität dieser Dichtflüssigkeiten (z. B. Destillationsbitumina) sind die Eindringraten in das Gebirge sehr gering, sie nehmen über die Zeit mit der 3. Wurzel ab.

Bei der technischen Umsetzung ist jedoch mit folgenden Schwierigkeiten zu rechnen:

- Um Konvergenzen und somit Auflockerungen des Gebirges vor der Laugendruckeinwirkung gering zu halten, muss die "Dichtflüssigkeit" in eine möglichst steife Streckenverfüllung (z. B. Schotter) eingebunden werden.
- Der heiße Einbau von Bitumen ist aufgrund der Temperaturempfindlichkeit der anstehenden Salze (Carnallitit, Tachhydit) problematisch.
- Von der selbsttätigen Gebirgsdichtung durch hochviskose Bitumina kann kein Kredit genommen werden, da in der Regel die zusitzenden Salzlösungen bei gleichen Druckverhältnissen größere Fließgeschwindigkeiten (Eindringraten) als die Bitumina aufweisen. Sind die Wegsamkeiten im Gebirge bereits mit Salzlösung gefüllt, ist eine nachfolgende Dichtung mit Bitumina nur in sehr begrenztem Umfang möglich.

### Fazit:

Bitumenelemente sind in verschiedenen konstruktiven Ausführungen nur zur Querschnitts- und Kontaktspaltdichtung geeignet, von einer eventuellen Gebirgsdichtung kann kein Kredit genommen werden. Die technischen Umsetzbarkeit einer langzeitüchtigen Konstruktion der Bitumenelemente ist zu prüfen.

### *8. Zuwachsen von Rissen, Klüften infolge chemischer Prozesse*

Für die Gewährleistung einer ausreichenden Tachhyditsättigung der zum Verschlussbauwerk anströmenden Lösung wurden zwei unterschiedliche Elemente konzipiert – vom Institut für Anorganische Chemie (Prof. Voigt) der TU Bergakademie Freiberg eine definierte Salzvorschüttung aus drei Zonen (siehe Abschnitt 4) und von K-UTEC ein ortsstabiles Tachhydritdepot in einem Gelbaustoff [52].

Durch die Möglichkeit der Bildung unlöslicher langzeitstabiler Phasen bzw. übersättigter Lösungen besteht zusätzlich die prinzipielle Möglichkeit des Zuwachsens von Wegsamkeiten im Gebirge durch chemische Prozesse.

Allerdings wird aufgrund des derzeit noch unvollständigen Kenntnisstandes hinsichtlich der praktischen Realisierbarkeit von diesem Prinzip für die Ausführung der Hauptdichtelemente kein Kredit genommen.

#### Fazit:

Die Salzvorschüttung und das ortsstabile Tachyhydritdepot werden Bestandteile eines Vorbauelementes. Ihre Hauptaufgabe ist die dauerhafte Gewährleistung einer ausreichenden Tachhyditsättigung der zum Verschlusstbauwerk anströmenden Lösung.

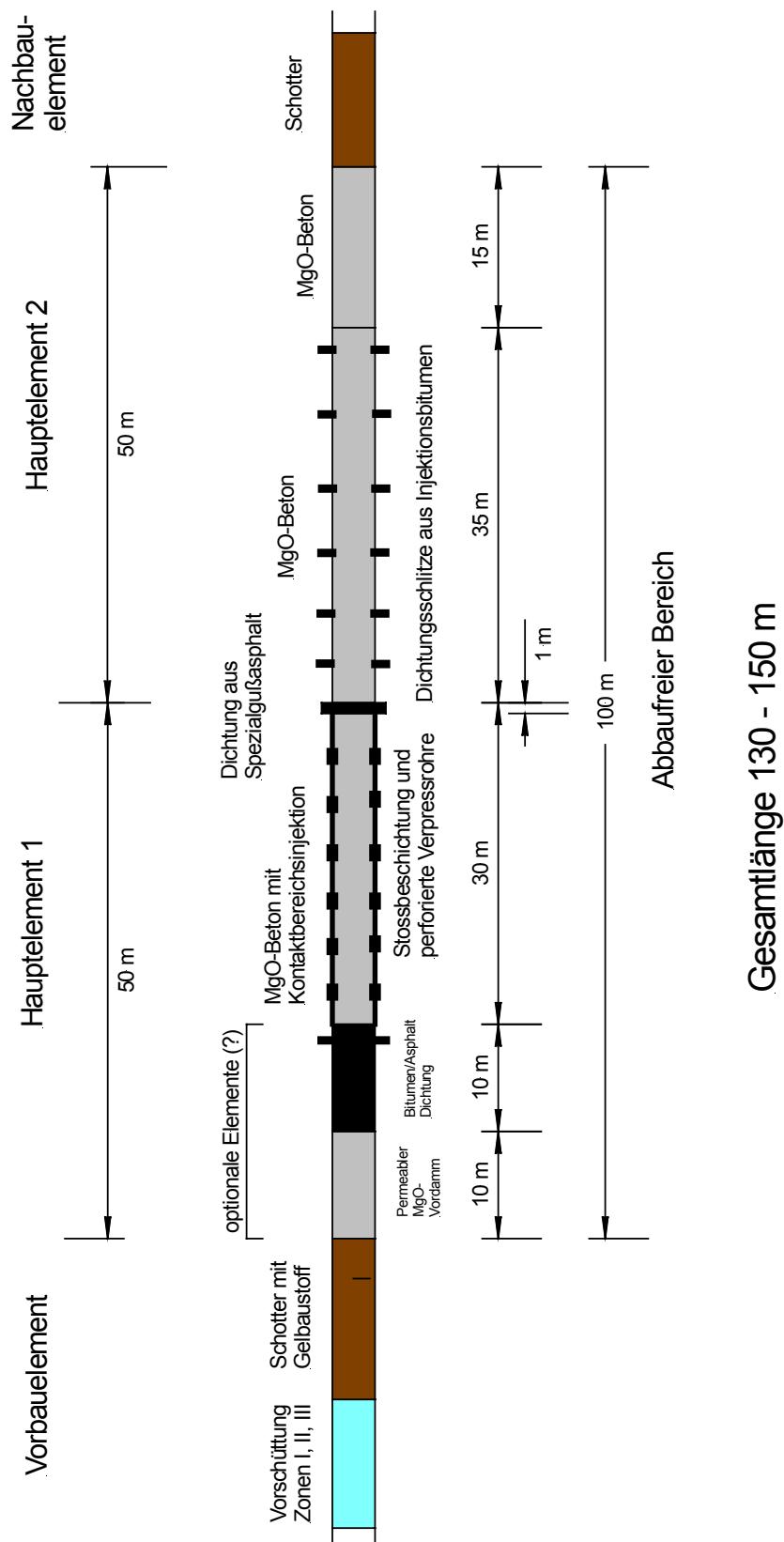
Somit können für das horizontale Verschlussystem im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) nachfolgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Der Verschluss sollte möglichst lang (1) (maximal ungefähr 150 m) sein und möglichst überwiegend steife Elemente (2) beinhalten. Abrupte Wechsel zwischen steifen und nachgiebigen Elementen sind durch zwischengeschaltete Übergangsschichten auszugleichen. Als Hauptelement für Lastabtrag und Querschnittsdichtung wird als Material MgO-Beton vorgeschlagen.
2. Als favorisierte Maßnahmen zur Zusatzdichtung der zwei gefährdeten Bereiche Kontaktfugenbereich und ausbruchsnaher Gebirgsbereich bieten sich Dichtungsschlitz (3) und zielgerichtete Kontaktspaltinjektionen (6) an.
3. Aus Gründen der Diversität für Querschnitts- und Kontaktfugendichtung wird zusätzlich der Einsatz von Bitumen-/Asphaltelementen (7) vorgeschlagen.
4. Vom Einsatz schwelender/quellender Materialien (4) und von einer Impermeabilisierung des Gebirges durch den radialen Laugendruck bei flüssigkeitsdichter Gebirgsbeschichtung (Versiegelung) (5) wird Abstand genommen.
5. Für die Gewährleistung einer ausreichenden Tachyhyditsättigung der zum Verschlusstbauwerk anströmenden Lösung (8) werden als Vorbauelement eine definierte Dreizonen-Salzvorschüttung und ein ortsstabiles Tachyhydritdepot aus Gelbaustoff vorgeschlagen.

## **7.2 Vorschlag einer prinzipiellen konstruktiven Gestaltung**

Der auf Basis der vorangegangenen Ausführungen unterbreitete Vorschlag für die prinzipielle Gestaltung des Verschlusssystems Teutschenthal ist in Abb. 65 schematisch dargestellt. Der Verschluss besteht aus einem Vorbauelement, zwei unterschiedlich aufgebauten Hauptelementen und einem Nachbauelement. Aufgrund des hohen erforderlichen Sicherheitsniveaus wurden zwei unterschiedlich wirkende Hauptelemente hintereinander geschaltet, wobei jedes einzelne Hauptelement so ausgelegt ist, dass es allein die gestellten Forderungen erfüllt. Die Verschlusslänge, die in den "Abbaufreibereich" einzubringen ist, beträgt ca. 100 m, die Gesamtverschlusslänge, d. h. einschließlich der aus statischen Gründen druck- und luftseitig einzubringenden Schotterverfüllungen (jedoch ohne Vorschüttungen), liegt bei ca. 130 m.

Für die nachfolgend beschriebenen Verschlusselemente und die eingesetzten Materialien gilt, dass bis zur Umsetzung in die Praxis noch eine ganze Reihe von materialtechnischen und verfahrenstechnischen Problemen zu lösen sind, die bereits im Vorfeld mit den ausführenden Firmen abzustimmen und anschließend zu begleiten sind.



**Abb. 65:** Prinzipieller Aufbau eines langzeitstabilen Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgebirge

### 7.2.1 Vorbauelement

Das Vorbauelement dient der Einstellung der Zusammensetzung bzw. der Gewährleistung der Tachyhydritsättigung der Anströmlösung und setzt sich aus einer Salzvorschüttung und einer Schotterverfüllung mit Gelbaustoff zusammen.

#### Vorschüttung

Die Vorschüttung besteht aus drei Schüttungsbereichen, die dafür sorgen, dass die einwirkenden Salzlösungen eine solche Zusammensetzung annehmen, dass Löseerscheinungen am anstehenden Carnallititgebirge ausgeschlossen sind und gleichzeitig eine Selbstabdichtung durch "Um- bzw. Zusammenkristallisieren" der Salze aus der Vorschüttung und der Auflockerungszone stattfindet.

Ausgehend von einer ankommenden gesättigten NaCl-Lösung (konservative Annahme) besteht der erste (druckseitige) Vorschüttungsbereich, Zone I, aus Carnallitit und Calciumsulfat-Halbhydrat. Die ankommende NaCl-Lösung löst Carnallitit unter Ausfällung von NaCl und KCl. Ist der vorgeschüttete Carnallit kieserithaltig kommt es weiterhin zur Ausfällung von Kainit. Die sich dabei einstellende Lösungszusammensetzung entspricht dann einer so genannten Q-Lauge, welche aufgrund ihrer Zusammensetzung die Salze Halit, Sylvin, Carnallit und Kainit nicht mehr angreift. Ein solcher Umlöseprozess findet auch schon mit dem anstehenden Carnallititgebirge entlang der Fließwege statt. Die Vorschüttung in Zone I soll nachträglich das Erreichen einer Q-Laughen-Zusammensetzung sichern. Gleichzeitig wandelt sich mitaufgeschüttetes Calciumsulfat-Halbhydrat in Abhängigkeit der erreichten Lösungszusammensetzung unter Volumenzunahme in Calciumsulfat-Dihydrat um, was zu einer ersten "Selbstabdichtung" führt. Ein schneller Laugenzutritt zu weiteren Dichtelementen wird dadurch eingedämmt.

Die Schüttung in Zone II ist im Wesentlichen eine Widerholung der Zone I, wobei der Carnallitit aber hier ausreichend Kieserit (mind. 16%) enthalten muss. Die vorerst gebildete Q-Lauge wandelt sich unter Auflösung des Kieserit in eine so genannte R-Lauge um, welche Halit-, Carnallit-, Kainit- und Kieserit-beständig ist. Das am Ende der Zone II befindliche Calciumsulfat-Halbhydrat ist noch etwas "Kalium"-angereichert und kristallisiert bei Laugenzutritt unter Volumenzunahme in Polyhalit um, was einen weiteren verdichtenden Effekt zur Folge hat.

Zone III besteht aus einer Aufschüttung von wasserarmen CaCl<sub>2</sub> (ca. CaCl<sub>2</sub> + 2.75 H<sub>2</sub>O). Trifft R-Lauge auf diese Salzschüttung, entsteht eine MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub>-Lösung, welche den in größeren Lagen im Salzgestein auftretenden Tachyhydrit nicht mehr auflöst. Der Wassergehalt der CaCl<sub>2</sub>-Schüttung ist so optimiert, dass bei Zutritt von R-Lauge keine Wärmeentwicklung zu verzeichnen ist (typischer Effekt von CaCl<sub>2</sub>-Hydratphasen beim Auflösen) und somit keine Dehydratisationsprozesse am umliegenden Gebirge stattfinden. Gleichzeitig kristallisieren höhere Hydrate unter Expansion und die Wasseraktivität der anstehenden Lauge wird weiter herabgesetzt.

Insgesamt wird mit der 3 Zonen-Vorschüttung eine mehrfache Selbstabdichtung des Laugen-Fließweges durch Kristallisationseffekte initiiert, wobei der geringste Effekt zu einer Verringerung der Laugendurchtrittsrate führen sollte. Falls am Ende der 3 Zonen-Vorschüttung Lauge austreten sollte, dann hat diese eine Zusammensetzung erreicht, welche das anliegende Gebirge nur bezüglich des Kieserits kurzeitig anlösen kann. Die Reaktion [Ca<sup>2+</sup> + 2 Cl<sup>-</sup> + H<sub>2</sub>O + MgSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O → CaSO<sub>4</sub>·xH<sub>2</sub>O + Mg<sup>2+</sup> + 2 Cl<sup>-</sup> + (1-x)H<sub>2</sub>O] führt quasi zu einer Umbildung des Kieserits in eine Calciumsulfatphase, welche, wie alle anderen Salzkomponenten des Carnallititgebirges bei weiterem Laugenzutritt nicht mehr aufgelöst wird.

### Schotter mit Gelbaustoff

Der dient zur radialen Abstützung des Gebirges (Einschränkung der mit der Gebirgskonvergenz verbundenen Gebirgsauflockerung), zur Erzielung günstiger Beanspruchungszustände im permeablen MgO-Vordamm bei Gebirgsdruckeinwirkungen (axiale Stützung des permeablen Vordamms) und zur Reduzierung von Kantenpressungen im Gebirge infolge unterschiedlich steifer Gebirgsstützungen (MgO-Vordamm, Schotter, Vorschüttung).

In den Porenraum des Schotters wird ein Gelbaustoff mit ortsstabilem Tachyhydritdepot eingebaut, wodurch die Tachyhydritsättigung der zum Verschlussbauwerk anströmenden Lösung erreicht wird. Dies bewirkt gemeinsam mit der Vorschüttung eine redundante Ausführung des Vorbauelementes und trägt so zur Erhöhung des Sicherheitsniveaus bei der Gewährleistung einer Tachyhydritgesättigten Anströmlösung bei. Die Durchlässigkeit des Gelbaustoffes wird auf die Durchlässigkeit des Gebirges so eingestellt, dass der bevorzugte Strömungsweg im Bereich des Depots liegt ( $k_{Depot} > k_{Gebirge}$ ) [52].

### **7.2.2 Hauptelement 1**

Dieses ca. 50 m lange Hauptelement 1 besteht aus einer optionalen hydraulischen Dichtung, einem MgO-Betonkörper als Widerlager und Dichtelement und einer nachgeschalteten, in das Gebirge eingelassenen Spezialgussasphaltdichtung.

#### Hydraulische Dichtung (optional)

Die hydraulische Dichtung besteht aus einem permeablen MgO-Vordamm und einer nachfolgenden Bitumen-/Asphaltdichtung. Sie ist optional, da die vorgeschlagene Anordnung der Dichtepackungen konstruktive Sondermaßnahmen erfordert, deren dauerhafte Funktionstüchtigkeit noch nicht nachgewiesen wurde. Somit ist die Realisierung dieses Dichtelementes vom Ergebnis der weiteren Untersuchungen abhängig.

Der permeable MgO-Vordamm hat keine statischen Aufgaben hinsichtlich Abtrag der einwirkenden Flüssigkeitsdruckbelastungen zu erfüllen. Er dient lediglich der Positionierung der Bitumen-/Asphaltdichtung. Aufgrund der positiven Ergebnisse der Versuche zur Simulation einer Bitumenkammer (siehe Abschnitt 5.3.1) kann von einem zusätzlichem Dichteffect im unmittelbaren Kontaktbereich des anstehenden Gebirge (wenige 'cm' tief) gerechnet werden. Für die Funktionstüchtigkeit der Bitumen-/Asphaltdichtung ist zwingend, dass nur Asphalt bzw. Bitumen im Kontakt zum Gebirge ansteht, so dass eine vollständige Kontaktbereichsdichtung erreicht wird.

Die Bitumen-/Asphaltdichtung hätte den Vorteil, dass für die Querschnitts- und Kontaktfugendichtung eine Diversität erreicht werden könnte. Allerdings bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der Funktionstüchtigkeit der bisher vorgeschlagenen Konstruktion. Deshalb sind in den zukünftigen Arbeiten Alternativvorschläge zu entwickeln, die *in situ* zu testen sind.

#### MgO-Beton-Körper

Durch einen Gebirgsstossanstrich (z.B. Bitumenkaltanstrich) wird der direkte Verbund des MgO-Betons am Gebirge verhindert, wodurch der MgO-Betonkörper nicht gebirgsverbunden, sondern quasi-gleitfähig wird. Vorteilhaft ist, dass in diesem Falle auch der direkte Feuchteeinfluss der Anmachflüssigkeit auf das Gebirge unterbunden werden kann.

Weiterhin wird die Gleitfähigkeit durch die nachträgliche Verpressung des Kontaktspaltes MgO-Beton – Gebirge durch Zweikomponenten-Injektionsbitumen begünstigt. Das

Verpressen der Kontaktfuge erfolgt am zweckmäßigsten über perforierte Manschettenrohre, die in Umfangsrichtung, in entsprechenden Abständen voneinander (z.B. 2 – 5 m) verlegt werden.

Durch diese Injektionsmethode mit niedrigviskosen, inerten Materialien ist eine Kontaktdichtung und eine Dichtung des unmittelbaren Gebirgsbereiches auf hoher Qualität möglich. Durch eine vorausgehende Messung der Gaspermeabilität direkt im Kontaktspalt (über die gleichen Rohrleitungen) ist eine gute Anpassung von Injektionsmaterial und Injektionsdruck an die spezifischen Verhältnisse der Kontaktspaltabdichtung möglich.

Der MgO-Beton ist abschnittsweise einzubringen und zu verpressen, um eine Rückkopplung über die erreichte Qualität zu erhalten. Eine Dichtwirkung des MgO-Beton-Körpers (Redundanz des Systems) kann erreicht werden, wenn je nach Betonierfortschritt abschnittsweise zwischengelagerte Bitumenschichten auf der Querschnittsfläche eingebaut werden. Dieser Effekt ist durch in situ Untersuchungen bestätigt worden (siehe Abschnitt 5.3.3).

#### Zusatzdichtung (Spezialgussasphaltdichtung)

Dieses Element ist in radialer Richtung ca. 50 – 70 cm in das Gebirge ausgestellt. Dadurch kann dieses Element Dichtungsaufgaben für alle drei Bereiche Querschnitt, Kontaktfuge und aufgelockerter Gebirgsbereich erfüllen. Als Material kommen im Hinblick auf die möglichen Einbringtechnologien Gussasphalte in Betracht. Dazu sind Untersuchungen zur Materialauslegung und zum Einbauverfahren erforderlich. Bei Bedarf kann im Firstbereich nachträglich mit Zweikomponenten-Injektionsbitumen nachgedichtet werden.

### **7.2.3 Hauptelement 2**

Dieses ebenfalls ca. 50 m lange Hauptelement 2 besteht aus einem kraftschlüssig mit dem Gebirge verbundenen MgO-Beton, der den Lastabtrag des einwirkenden Flüssigkeitsdruckes übernimmt und zugleich als zusätzliches Dichtelement wirkt. Als zusätzliche Dichtungsmaßnahmen für den Kontaktbereich und den aufgelockerten ausbruchsnahen Gebirgsbereich sind Dichtungsschlitzte vorgesehen. Der luftseitige Bereich besteht aus einem ebenfalls kraftschlüssig mit dem Gebirge verbundenen MgO-Betonkörper zum Abtrag der axial einwirkenden Flüssigkeitsdruckbelastungen in das Gebirge.

#### MgO-Beton-Körper (Widerlager und Dichtelement)

Dem kraftschlüssig mit dem Carnallitit verbundenen MgO-Beton-Körper (hinsichtlich besonderer geometrischer Gestaltung, z. B. Verzahnung mit dem Gebirge sind noch Untersuchungen erforderlich) fällt als Hauptaufgabe der Lastabtrag zu, d. h. die durch das Bitumen bzw. den Asphalt in diesen Körper eingetragenen Kräfte aufzunehmen und in das Gebirge einzuleiten. Zusätzlich hat dieser MgO-Beton gegenüber dem Bitumen/Asphalt die Dichtung des Querschnitts und des Kontaktbereiches zwischen MgO-Beton-Körper und Gebirge zu übernehmen. Aufgrund der niedrigen Permeabilität des MgO-Betons, der ausgezeichneten Haftfestigkeit zwischen Carnallitit und MgO-Beton, der radialen Gebirgsdruckausbildung auf den steifen MgO-Beton, des hohen kapillaren Eindringwiderstandes in diesen Beton sowie des inerten Verhaltens und der hohen Viskositäten von Bitumen-Asphalt bestehen auch zur Erfüllung dieser zusätzlichen Dichtaufgabe sehr gute Voraussetzungen.

Eine Dichtwirkung des MgO-Beton-Körpers (Redundanz des Systems) kann erreicht werden, wenn je nach Betonierfortschritt abschnittsweise zwischengelagerte Bitumenschichten auf der Querschnittsfläche eingebaut werden. Dieser Effekt ist durch in situ Untersuchungen bestätigt worden (siehe Abschnitt 5.3.3).

### Dichtungsschlitzte

Die noch fehlende Abdichtung des aufgelockerten Gebirgsbereiches wird im Hauptelement 2 durch Dichtungsschlitzte (40 - 80 cm tief), die mit diversen Dichtmaterialien verfüllt werden, vorgenommen. Für das qualitätsgerechte Verfüllen dieser Dichtungsschlitzte kommen zumindest für den Firstbereich nur folgende zwei Verfahren in Betracht, die unter Umständen miteinander kombiniert werden können:

- Manuelle Verfüllung unter Umständen mit provisorischer Schalung und anschließender Betonierung; als Dichtbaustoffe eignen sich vorwiegend Gussasphaltblöcke, gefrorene Bitumen- und Asphaltmastix-Blöcke.
- Verfüllen und Entlüften über Bohrungen im Gebirge oder durch im MgO-Körper verlegte Entlüftungs- und Verpressleitungen; als Verpressmaterialien kommen heiße bzw. nur gering erwärmte (B900) Bitumina, kalte Zweikomponenten-Bitumen, MgO-Mörtel bzw. MgO-Suspensionen und unter Umständen Kunstharze in Betracht.

### MgO-Betonkörper (Widerlager)

Der als luftseitig letztes Element angeordnete, kraftschlüssig mit dem Gebirge verbundene MgO-Betonkörper hat in erster Linie die Aufgabe, die axial angreifende Flüssigkeitsdruckbelastung abzutragen. Dieses Element ist ausschließlich als Widerlager zu verstehen. Es enthält keine Bitumenzwischenschichten und ist nicht mit Dichtungsschlitzten kombiniert.

#### **7.2.4 Nachbauelement**

Das Nachbauelement besteht aus Schotter, der zur radialen Abstützung des Gebirges und zur Reduzierung von Kantenpressungen im Gebirge dient. Der Einbau erfolgt firstbündig mit einer dimensionierten lagestabilen Böschung.

## 8 Literatur

- [1] Aland, H.-J.; Handke, N.; Leuschner, J.; Bodenstein, J.; Maelzer, K.; Sitz, P.; Gruner, M.; Springer, H.: Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluß aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. *Kali und Steinsalz* 12 (1999) Nr. 9, S. 24 – 29 & *Geotechnik* 22 (1999) Nr. 1, S. 56 – 62.
- [2] Gruner, M.; Sitz, P.: Bau und Test des Verschlussbauwerkes Sondershausen – Versuchsablauf und Ergebnisse des Rückbaus. *Fachgespräch Verschlussbauwerke*, 17./18. März 2003, Freiberg.
- [3] Handke, N.: Dammbau- und Abdichtungsarbeiten im Kali- und Steinsalzbergbau. Thyssen Schachtbau Gruppe. Report 2002. S. 30 – 35.
- [4] Sitz, P.; Reimann, S.: Verfahren zum Abdichten von Strecken in löslichen Gebirgsschichten. Patentschrift DD 135103, veröff. 11.4.1979.
- [5] Schrimpf, Chr.: Verfahren und Vorrichtung zum Abdichten von Dammbauwerken in untertägigen Strecken, insbesondere im Salzgebirge. Patentschrift DE 3427978 C1. DBE Peine, veröff. 15.5.1985.
- [6] Sitz, P.; Köckritz, V.; Krakau, U.; Marggraf, P.; Kaiser, H.: Hydraulisches Dichtsystem. Patentschrift DD 289316, veröff. 25.4.1991.
- [7] Seifert, G.; Landsmann, O.: Entwicklung eines Konzeptes zur Durchführung der Sicherungsmaßnahmen für die Endverwahrung der Grube Teutschenthal – GTS. Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen 24.02.2000.
- [8] GFE GmbH: Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal – Geologisches Gutachten. Halle, 22.7.1999.
- [9] D'Ans, J.: Über die Bildungsmöglichkeiten des Tachyhydrits in Kalisalzlagerstätten. - *Kali u. Steinsalz* (1961) 3, 119 – 125.
- [10] Braitsch, O.: Entstehung und Stoffbestand der Salzlagerstätten. - Springer-Vlg., Berlin – Göttingen – Heidelberg, 1962.
- [11] Rösler, H. J.; Koch, K.: Salzmikroskopie - Bergakademie Freiberg 1968.
- [12] Meier, R.: Beitrag zur Geologie des Kaliflözes Staßfurt (Zechstein) - in *Geologie*, Beiheft 65, Berlin 1969.
- [13] Döhner, Ch.; Seifert, G.; Landsmann, O.: Zuarbeit zur Neubearbeitung Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal. - Bericht K-UTEC GmbH, unv., Sondershausen 1999.
- [14] Sitz, P.; Fliss, Th.; Gruner, M.: Geomechanisch-lösungskinetische Voraussetzungen und technisch - konstruktive Maßnahmen zur Verhinderung von Löseerscheinungen im Verschlussbereich. TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Januar 2004.
- [15] Minkley, W.: Untersuchungen (Stoffgesetzentwicklung, Modellierung) zum Sprödbruchverhalten von Carnallitit und seiner Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von UTD, Förderkennzeichen 02 C 0264, Abschlußbericht, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig 05.02.2001.
- [16] Döhner, C.; Fliß, T.: Durchführung geologischer Arbeiten am Untersuchungsort 3a-Sohle Grube Teutschenthal Montagekammer/Maschinenstrecke. Zwisch.-Ber. 12.03.2004, K-UTEC.
- [17] ITASCA: FLAC 4.0 – Fast Lagrangian Analysis of Continua. Version 4.0.- User's Manual. ITASCA Consulting Group Inc. Minneapolis, Minnesota, USA.

- [18] Minkley, W.; D. Brückner, D.: Untersuchung gebirgsmechanischer Auswirkungen einer Laugenstapelung in den tiefen Kaliabbauen der Grube Angersdorf. IfG-Bericht 02/2002.
- [19] Baumann, K.-H.; Voigt, H.: Technische Massenkristallisation. Akademie-Verlag, Berlin, 1984.
- [20] Siebler, P.: Untersuchungen über die Auflösung natürlicher Salze als Beitrag zur Erfassung der Zerstörung an Pfeilern beim Ersauen von Kali- und Steinsalzgruben, Dissertation, Bergakademie Freiberg, 1969.
- [21] Liebmann, G.: Untersuchungen zum Löseverhalten von Carnallitit unter Langzeitbedingungen. Freiberger Forschungshefte, Reihe a, A 690 (1984)105-115.
- [22] Voigt,W.; Voigt,H.: unveröffentlichte Berichte der ARGE Bischofferode, 2003.
- [23] Freyer, D.; Voigt, W.: Crystallization and Phase Stability of CaSO<sub>4</sub> and CaSO<sub>4</sub>-based Salts. Monatsh. Chem. 134 (2003),693-719.
- [24] Voigt, W.; Herbert , H.-J.; Hagemann S.; Voigt, H.; Reichelt, Ch.: Theoretische und Experimentelle Untersuchung der Langzeitigen Kinetik der Carnallitit-Auflösung, Abschlußbericht GSF Neuherberg, 2004.
- [25] Herbert, H.-J. u.a.: Endlager Morsleben. Zementkorrosion. Vorläufiger Abschlußbericht von GRS und iBMB. Braunschweig, Juli 2001.
- [26] Abuhress, O.: Laborative Untersuchungen an Magnesiabindersuspensionen für die Anwendung als Injektionsmittel zur Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen im Kali- und Steinsalzbergbau. Diplomarbeit, Institut für Bergbau, August 2001.
- [27] Fliß, Th.: Tth02 Oberflächeninjektion 01. Zwischenbericht. Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, 05.11.2003.
- [28] Heymann, H.: Konstruktive Gestaltung und in situ Eignungstests von Bohrlochverschlüssen aus MgO-Beton im Carnallitit unter Berücksichtigung unterschiedlicher L/R-Verhältnisse, der Hydratationswärme sowie zusätzlicher Dichtelemente aus Bentonit und Bitumen. Diplomarbeit, Studienrichtung Bergbau, TU Bergakademie Freiberg, Juni 2004.
- [29] Forschungsvorhaben Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen. FKZ 02C05472. Projektleiter Prof. P. Sitz., Institut für Bergbau der TU Bergakademie Freiberg, März 2003.
- [30] Sitz, P.; Gruner, M.; Rumphorst, K.: Bentoniddichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. Kali und Steinsalz (2003) Nr. 3, S. 6 – 13.
- [31] Sitz, P.; Gruner, M.; Rumphorst, K.: Verschlussbauwerke für Endlager und Untertagedeponien. 6. Projektstatusgespräch des Projekträgers des BMBF und BMWA für Wassertechnologie und Entsorgung, 27./28. Mai 2003, Wissenschaftliche Berichte FZKA-PTE Nr. 8. - Karlsruhe, August 2003.
- [32] Herbert, H.-J.; Moog, H.: Untersuchungen zur Quellung von Bentoniten in hochsalinaren Lösungen. Abschlussbericht. GRS-179, Braunschweig, Mai 2002.
- [33] Fliss, Th.: Geoelektrikprofil 4 am NE-Stoß Referenzversuchsort. K-UTEC, August 2004
- [34] Voigt, H.-D.: Untersuchungsergebnisse im Versuchsort Tunnelstrecke – Sohle 3A – der Grube Teutschenthal. Versuchsauswertung, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau, Juli 2004.
- [35] Solowjewa, E. F.; Ljachobskaja, E. ; Romanowa, W. A.: System: NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub> bei 25 °, VNIIG, Leningrad (St. Petersburg), 1964.
- [36] Solowjowa, E. F.: System: NaCl-KCl-MgCl<sub>2</sub>-CaCl<sub>2</sub> bei 25 °C, VNIIG, Leningrad (St. Petersburg), 1967.

- [37] Marx, H. et al.: Grundlagenuntersuchungen zur Nutzung von Solarenergie zur Kristallisation und Trennung von Salzen, Abschlussbericht zum Projekt Nr. 1998-WF-6347, Sondershausen August 2001, S. 19-31
- [38] Kammüller, K.; Scheibe, R.: Verfahren zur Herstellung von Magnesiabeton. Patentschrift Schweiz 201224. Veröff. 1.2.1939.
- [39] Voigt, H.-D.: Permeabilitäts- und Porositätsmessungen an drei Kernproben aus MgO-Beton. Protokoll, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau. Juni 2004.
- [40] Scherzberg, H. et al.: Grundlagenuntersuchungen zur Gelbildung und Verfestigung von Salzlösungen. Sachbericht zum Projekt Nr. 1998-WF-6346, Sondershausen, S. 15-25, 2001.
- [41] Mattcovic, B. et al.: Reaction products in magnesium oxychloride cement pastes. Journal of the American Ceramic Society 60 (1977) 14/12, S. 504-507
- [42] Wagner, H.: Herstellung großflächiger, plastischer Dichtelemente im Salinar, Sonderhausen, 2000.
- [43] Krauke, W.; Wagner, H.; Lack, D.: Gelförmige Bindesysteme für die Bergschadenssanierung im Salzbergbau. Brachflächenrecycling, 1998, Heft 2, S. 76-80
- [44] Krauke, W. et al.: Füllstoff zum Ausfüllen von salinaren Hohlräumen im Salinar, Deutsches Patent 197 37 583.9-24, 1999.
- [45] Krauke, W.: Bau eines Erprobungsbauwerkes für eine Strömungsbarriere im Forschungsbergwerk Asse. Bericht unveröffentlicht, Sondershausen Februar 2004.
- [46] Krauke, W.: Dokumentation über die Verwahrung schachtnaher Grubenhohlräume im Schacht Hattorf im Auftrag der K+S AG. Bericht unveröffentlicht, Sondershausen März 2002.
- [47] Popp, T.; Salzer, K.: Baumaterialien auf CaSO<sub>4</sub>-Basis. Zuarbeit zum AP6. Bericht IfG Leipzig, 7.5.2004.
- [48] Szenarien- und Konsequenzenanalyse für die Langzeitsicherheit des Bergwerkes Teutschenthal mit den Grubenfeldern Teutschenthal, Angersdorf und Salzmünde, GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. KG, Teutschenthal, 28.06.2000.
- [49] Böttge, V.; Hartmann, O.; Strobel, G.; Wirth, J.: Stellungnahme zur Langzeitsicherheit – Grube Teutschenthal – der GTS GmbH & Co. KG. Geologisches Landesamt Sachsen-Anhalt, Halle, 15.09.2000.
- [50] Schleinig, J.-P.: Sicherheitsbetrachtung und Bemessung geotechnischer Bauwerke am Beispiel von Verschlüssen untertägiger Deponien. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau, 2000.
- [51] Lippmann G.: Gebirgsmechanische Untersuchungen von Dammbauwerken aus MgO-Beton in Strecken im Salinargebirge. Zwischenbericht. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Freiberg, 2004.
- [52] Krauke, W.; Fliß, Th.: Verschlusskomponente zur Gewährleistung einer Tachyhydritgesättigten Anströmlösung (Vorbauelement) sowie Vorlage eines Schutzfluids im Bereich der ALZ. Zuarbeit zu AP 7. K-UTEC Sondershausen, 21.10.2004