Grube Teutschenthal

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

Teil 2: Erprobung von Funktionselementen

Zusammenfassender Abschlussbericht

Projektleiter: Prof. Dr. P. Knoll (vom 01.11.2004 bis 31.12.2007)
DI M.Finder und Prof. Dr. W. Kudla (01.01.2008 bis 30.06.2010)

FuE-Auftragnehmer:

TU Bergakademie Freiberg;
Institut für Bergbau und Spezialtiefbau
Institut für Anorganische Chemie

Institut für Gebirgsmechanik GmbH,
Leipzig

K-UTEC Salt Technologies,
Sondershausen

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

Auftragnehmer für forschungsbezogene bergbauliche Arbeiten:

TS Bau GmbH, Jena

Förderkennzeichen: 02C1204

Laufzeit: 01.11.2004 bis 30.06.2010

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C1204 gefördert

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Teutschenthal – 31. Dezember 2010

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **6**

Struktur des Gesamtberichtes **10**

1. Vorbemerkungen **12**

2 Zielstellung und Lösungsweg **13**
2.1 Ausgangssituation 13
2.1.1 Ergebnisse des Teil 1 des Vorhabens 15
2.1.2 Entwicklung eines vorläufigen Grundkonzeptes 22
2.2 Aufgabenstellung für den Teil 2 des Vorhabens CARLA 23
2.3 Lösungsweg für den Teil 2 des Vorhabens 24

3. Charakterisierung des carnallitischen Gebirgsverbandes, insbesondere der ALZ **27**
3.1 Geologische und mineralogische Charakterisierung des Wirtsgesteins Carnallitit 28
3.2 Geomechanische Eigenschaften des Carnallitits 32
3.3 Geohydraulische Eigenschaften des Carnallitits 34
3.3.1 Permeabilität des konturnahen Gebirges 35
3.3.2 Integral wirksame Permeabilität des unverritzten Gebirges 37
3.4 Bewertung der hydraulisch wirksamen Bereiches der Gebirgskontur 38

4. Materialien der Dammbauwerke **41**
4.1 MgO-Beton 41
4.1.1 Weiterentwicklung des klassischen MgO-Betons 42
4.1.2 Entwicklung eines Spritzbetons mit 5-1-8-Rezepturansatz 44
4.1.3 Verhalten der 5-1-8-Bindemittelphase bei Kontakt mit Lösung 48
4.1.4 MgO-Beton auf der Basis der 3-1-8-Bindemittelphase 49
4.1.5 Verhalten der 3-1-8-Bindemittelphase bei Kontakt mit Lösung 51
4.1.6 Vergleich beider Materialien 52
4.1.7 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von MgO-Beton 55
4.2 Asphalt als Dichtelement 55
4.2.1 Baustoffeigenschaften 55
4.2.2 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz 58

5. Kontaktfuge (Kontaktzone) zwischen Dammbauwerk und Gebirge **58**
5.1 Grundlagen und Konventionen 58
5.2 Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktfuge und des unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereiches 59
5.2.1 Materialien und Technologien 59
5.2.2 Untersuchungsergebnisse 61
5.3 In situ-Tests zur Eignungsprüfung der entwickelten Behandlungskonzepte 64

5.3.1 Allgemeine Zielstellungen 64
5.3.2 Untersuchungsergebnisse mit dem Dichtmaterial Denepox 40 65
5.3.3 Untersuchungsergebnisse mit dem Baustoff MgO-Beton 66
5.3.4 Pneumatische Vortests am Dichtbauwerks-Element 68

6. Großmaßstäbliche Untersuchungen von Funktionselementen 70
6.1 Zielstellung 70
6.2 Großversuch 1 (GV1) 74
6.2.1 Zielstellung 74
6.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des GV1 76
6.3 Großversuch 2 (GV2) 78
6.3.1 Zielstellung 78
6.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des GV2 79
6.4 Großversuch 3 (GV3) 80
6.4.1 Zielstellung 80
6.4.2 Ergebnisse des GV3 82
6.5 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der Funktionalität der Funktionselemente 84
6.5.1 Hauptelemente aus MgO-Beton 84
6.5.2 Injektionsverfahren 87
6.5.3 Asphalt-Element 88
6.6 Ausblick - Funktionstest der Großversuche 89
6.7 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von MgO-Beton 89

7. Maßnahmen zur Beeinflussung des Lösungsangriffs 92
7.1 3-Zonen-Vorbauelement 92
7.1.1 Zielstellung 92
7.1.2 Grundsätzlicher Aufbau der 3-Zonen-Vorschüttung und Ergebnisse der Laborversuche 92
7.1.3 In situ Versuche zur 3-Zonen-Vorschüttung 93
7.1.4 Schlussfolgerungen für die Dimensionierung des Vorbauelementes 94
7.2 Vorbauelement auf der Basis von Gel-Baustoffen 96
7.2.1 Zielstellung 96
7.2.2 Grundkonzept für ein modular aufgebautes Vorbauelement auf Gel-Basis 98

8. Rechnerische Modellierung von Funktionselementen und Funktionsprinzipien 102
8.1 Grundlagen 102
8.2 Geomechanische Charakterisierung der Modellmaterialien und Modellbereiche 102
8.3 Modellstudien zu den Großversuchen GV1 bis GV3 103
8.4. Modellstudien an komplexen Modellen eines Verschlussbauwerkes 110

9 Schlussfolgerungen für das Grundkonzept eines horizontalen Abdichtbauwerkes im Carnallitit 115
9.1 Ausgangspunkte 115

9.2 Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches 116
9.3 Konditionierung der angreifenden Lösungen (VE) 120
9.4 Eigenschaften der Baustoffe für das Abdichtbauwerk 120
9.4.1 Baustoffe auf MgO-Basis 120
9.4.2 Baustoffe auf Asphalt Basis 123
9.4.3 Baustoffe auf Gel-Basis 125
9.4.4 Materialien für die Konturversiegelung und für Injektionsmaßnahmen 125
9.4.5 Materialien und Bauprinzipen für Widerlagerelemente 126

10 Weiterentwicklung des Grundkonzepts 127
10.1 Elemente des Grundkonzepts 127
10.2 Schlussfolgerungen zum Grundkonzept 130

11. Schlussfolgerungen aus dem Vorhaben und Ausblick 131
Diese Fragestellungen werden nachfolgend erläutert. 131
11.1 Weitere Entwicklung des Kontaktdruckes in den Bauwerken der Großversuche GV1 und GV2 131
11.2 Korrelation zwischen Kontaktdruck und der Dichtheit des Gesamtsystems 132
11.3 Mechanisch-hydraulische Modellierung 133
11.4 Nachuntersuchungen 133
11.5 Langzeitstabilität von MgO-Baustoffen 133

12. Literatur- und Quellenverzeichnis 134

13. Verzeichnis der Abbildungen 137

14. Verzeichnis der Tabellen 140

15. Glossar und Abkürzungsverzeichnis 141

Zusammenfassung

Horizontale Abdichtbauwerke sind für die Gewährleistung bzw. Herstellung der Langzeitsicherheit von UTD, UTV oder Endlagern im Salzgebirge in vielen Fällen unverzichtbar. Für die Abdichtung vertikaler Grubenbaue (Schächte) und für die Abdichtung horizontaler Grubenbaue im Steinsalz wurden in den vergangenen Jahren Grundsatzlösungen erarbeitet. Für horizontale Grubenbaue im leichtlöslichen und geringfesten Carnallititgebirge standen bisher Grundsatzlösungen noch aus. Sie sind Gegenstand des Forschungsvorhabens CARLA.

Bei den Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass das Carnallititgebirge (CaT) im Grubenfeld Teutschenthal der GTS GmbH & Co. KG die größten Anforderungen an derartige Abdichtbauwerke stellt, da in dem dort anstehenden Salzgestein sehr komplizierte Randbedingungen existieren. Der CaT weist einen komplexen mineralogischen Bau auf, der vor allem vom gleichzeitigen Vorkommen der Minerale Carnallit, Kieserit und Tachyhydrit gekennzeichnet ist. Diese Zusammensetzung macht das anstehende Gebirge sehr empfindlich gegen Angriffe von Salzlösungen jeder Art. Die quasi-geschichtete Struktur des Gebirges führt bzgl. der Festigkeits- und Deformationseigenschaften zu Anisotropie und Inhomogenität. Auch die hydraulischen Eigenschaften sind sehr komplex, da bei der Bestimmung der Lösungspermeabilität eine stoffliche Wechselwirkung zwischen dem anstehendem Gestein und der Untersuchungslösung nicht auszuschließen ist.

Carnallitit weist eine geringe Festigkeit und sprödes Deformationsverhalten auf, so dass auch bereits bei relativ niedrigen Beanspruchungen Materialschädigungen durch Dilatanz eintreten können. Zugleich führt – vor allem bewirkt durch die Anwesenheit tachyhydritischer Bestandteile – bereits eine geringe Feuchteeinwirkung (z.B. durch die Feuchtigkeit der Grubenwetter) zu einer schnellen oberflächennahen „Verwitterung“ durch Herauslösen tachyhydritischer Bestandteile aus dem Mineralverband. In der Folge beider Prozesse entsteht bei Freilegung von Gebirgsoberflächen an den Grubenbaukonturen eine komplexe und hydraulisch wirksame Auflockerungszone (ALZ), die aus einem „mechanischen“ dilatanzbedingten Anteil (der ALZ im engeren Sinne) und einer feuchtigkeitsbedingten Verwitterungszone (VWZ) besteht. Beide Anteile sind für die Errichtung dauerhaft dichter Abdichtbauwerke relevant.

Der komplexe mineralogische Aufbau des Gebirges und die dadurch entstehenden salinaren Lösungen unterschiedlicher Sättigungsgrade, die als die das Bauwerk angreifenden Lösungen zu betrachten sind, führen weiterhin zu besonderen Anforderungen an das Material des Dammkörpers hinsichtlich der Dauerhaftigkeit seiner dichtenden und Standsicherheits- Eigenschaften, so dass nur wenige Baumaterialien in Frage kommen und deren chemische Stabilität sowie deren mechanische Eigenschaften im Milieu der angreifenden Lösungen einen Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten.

Des Weiteren ist bei dem anstehenden Carnallititgebirge zu beachten, dass bei einer Erwärmung des Stoßes über etwa 70° C (z.B. durch die Hydratationswärme eines abbindenden Baustoffes für eine Dichtung oder ein Widerlager) das Gebirge nachhaltig geschädigt werden kann.

Geschuldet der Tatsache, dass es keine Salzlösung gibt, die gegenüber allen mineralogischen Bestandteilen des carnallitischen Gebirges vom Typ CaT inert ist, war es erforderlich, bei bestimmten Gebirgseigenschaften (z.B. hoher Tachyhydritanteil, insbesondere wenn er quasi schichtartig verteilt ist mit gegenüber dem Bauwerk vergleichbaren geometrischen Ausdehnungen der Quasischichten) dafür Sorge zu tragen, dass die angreifenden Lösungen eine definierte Zusammensetzung haben bzw. ihre

Zusammensetzung durch spezielle Maßnahmen im Hinblick auf die nachhaltige Integrität des Bauwerkes „positiv“ beeinflusst wird.

Aus diesen Sachverhalten ergeben sich die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten:

- Aufklärung des geologischen Baus und der mineralogischen Zusammensetzung und Struktur des Gebirges am potentiellen Einbauort eines Streckenverschlussbauwerkes,
- Aufklärung der Entstehung, der Eigenschaften und der Verhaltensweise der komplexen ALZ sowie Identifizierung von Möglichkeiten ihrer Behandlung,
- Untersuchung der Eigenschaften, der Verhaltensweisen und der Wechselwirkungen der zu verwendenden Baumaterialien mit dem Gebirge und mit den angreifenden Lösungen,
- Entwicklung geeigneter Maßnahmen und Techniken der Beeinflussung eines möglichen Lösungsangriffs auf das Bauwerk,
- Entwicklung von Verfahren der rechnerischen Modellierung der komplexen Zusammenhänge zur Prognose des Verhaltens des komplexen Bauwerkes „Abdichtbauwerk“ und zur Nachweisführung bzgl. seiner Langzeitsicherheit,
- Entwicklung und Erprobung von Technologien für die Errichtung und Erprobung der Funktionselemente des komplexen Bauwerks, die jene Eigenschaften sicherstellen, die das großmaßstäbliche Bauwerk entsprechend der Untersuchungsergebnisse besitzen muss; Entwicklung von Maßnahmen und Verfahrensweisen zur Qualitätssicherung der Baustoffe und Technologien,
- Test der entwickelten Baustoffe und Technologien in einer Vielzahl von Laborversuchen, Bohrlochversuchen und mittels großmaßstäblicher in situ Untersuchungen an einem exemplarischen Standort in der Grube Teutschenthal,
- Erstellen eines exemplarischen Grundkonzeptes für ein Abdichtbauwerk, das unter den Bedingungen des CaT die Anforderungen an ein langzeitsicheres Abdichtbauwerk erfüllt und das für andere (in der Regel günstigere) Eigenschaften des Carnallititgebirges (z.B. beim Fehlen der Minerale Tachyhydrit und/oder Kieserit im Gebirgsverband) entsprechend vereinfacht werden kann und dabei die Anforderungen ebenfalls erfüllt.

Im Ergebnis der Untersuchungen im Vorhaben konnten für alle diese Schwerpunkte Lösungen gefunden werden, die eine großtechnische Anwendung ermöglichen. Das gilt auch unter der Einschränkung, dass in einigen Fällen Restfragen offen geblieben sind, die eine weitere Bearbeitung erfordern, um die Lösung noch effektiver und robuster gestalten zu können.

Im Einzelnen konnten folgende Ergebnisse erzielt werden:

- Es ist erstmalig gelungen, Entstehung, Eigenschaften und Verhaltensweise der komplexen ALZ, bestehend aus der dilantanzbedintgten ALZ und einer Verwitterungszone VWZ unter den Bedingungen des CaT aufzuklären und Konsequenzen für das Abdichtbauwerk zur Beherrschung der ALZ abzuleiten.
- Die wesentliche Eigenschaft „integral wirksame Permeabilität des unverritzten Gebirges“ vom Typ CaT konnte mit $k_{eff} < 10^{-22}$ m² bestimmt werden und somit konnte das anstehende Gebirge CaT als geeignetes einschlusswirksames Gebirge charakterisiert werden. Damit ist die grundsätzliche Möglichkeit nachgewiesen worden, auch in einem Gebirge vom Typ CaT wirksame langzeitsichere Abdichtbauwerke errichten zu können.
- Mit den Vorbauelementen „3-Zonen-Element“ und „Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – weiche Ausführung“ konnten anwendbare Lösungen entwickelt werden, um die ggf. sehr unterschiedlichen angreifenden Lösungen in ihrer chemischen Zusammensetzung so zu beeinflussen, dass bis zum Wirksamwerden der dauerhaft standsicheren Elemente eines komplexen Widerlagers (ED) die angreifenden Lösungen so umwandeln, dass sie das Bauwerk nicht angreifen und damit ihre Bauwerksverträglichkeit gewährleistet wird.

- Der Hauptbaustoff MgO-Beton reagiert mit den angreifenden Lösungen unter Veränderung seiner chemischen und mechanischen Eigenschaften. Im Vorhaben konnten die Bedingungen identifiziert werden, unter denen der Baustoff dennoch einsetzbar ist und die gestellten Anforderungen an Standsicherheit (Rissfreiheit und Lagestabilität) und Abdichteigenschaften (gemittelte integrale Permeabilität) zuverlässig erfüllen kann. Im Vorhaben konnten die Randbedingungen identifiziert werden, unter denen sich der Baustoff MgO-Beton (bei thermodynamisch instabiler 5-1-8-Phase) kontrolliert in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase umwandeln kann. Für die einsetzbaren Varietäten des MgO-Baustoffs wurden technologische Verfahrensweisen für die Errichtung des Baukörpers entwickelt.
- Erstmalig ist es gelungen, eine Spritzbeton-Technologie für MgO-Beton zu entwickeln und zur Anwendungsreife zu führen. Die Spritzbetontechnologie gewährleistet den schonenden Einbau des großvolumigen MgO-Elementes in das Gebirge, indem die Abbindetemperaturen zuverlässig unterhalb der Schädigungsschwelle des CaT gehalten werden können.
- Die im Vorhaben weiterentwickelten Verfahren der numerischen Modellierung des Verhaltens der entscheidenden Elemente des komplexen Abdichtbauwerkes konnten als mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnungsmodelle vervollständigt und an Hand der Ergebnisse zahlreicher experimenteller Untersuchungen, darunter großmaßstäbliche Versuche in situ (Großversuche Gv1, GV2 und GV3) verifiziert werden.
- Mit dem im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens entwickelten Asphalt-Dichtelement stand im Grundsatz ein weiteres Dichtelement zur Verfügung, das als redundantes und diversitäres Dichtelement im Gesamtbauwerk eingesetzt werden kann. Im Rahmen des Vorhabens wurde dieses Element weiterentwickelt und steht nach noch notwendiger Vervollständigung der Technologie des Einbaus in das komplexe Bauwerk für die Anwendung sowohl in den zeitlich begrenzt wirksamen Bauwerkselementen EZ als auch in den dauerhaft wirksamen Elementen ED zur Verfügung.
- Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten führten auf ein Grundkonzept für ein komplexes Abdichtbauwerk, das aus den Abschnitten (von der Lösungsangriffsseite beginnend)
  - Vorbauelemente zur Konditionierung der angreifenden Lösungen,
  - zeitnah nach Errichtung des Dammbauwerkes wirksame, aber nicht zwingend langzeitsichere Elemente EZ,
  - verzögert (im Rahmen der Funktionsdauer der Elemente EZ) voll wirksam werdende und langzeitsichere Elemente ED

  besteht. Das Abdichtbauwerk kann bei beidseitigem Lösungsangriff symmetrisch gestaltet werden. Die Realisierbarkeit und Funktionalität des komplexen Abdichtbauwerkes wurde für die Bedingungen der Grube Teutschenthal an den wesentlichen Funktionselementen exemplarisch nachgewiesen; es ist für weniger komplizierte Umgebungsbedingungen entsprechend modifizierbar.
- Im Vorhaben wurden Fragestellungen herausgearbeitet, die im Rahmen des Vorhabens nicht abschließend geklärt werden konnten und vertiefter Lösungen bedürfen. Weiterhin war es im Rahmen der Vorhabenslaufzeit nicht möglich, die unter Tage realisierten Funktionselemente auch nach erfolgter Auflastung des Gebirges auf die Baukörper infolge Gebirgskriechens zu untersuchen. Die messtechnische Bestimmung des Gebirgskriechens ermöglichte aber in Verbindung mit den an in situ Bedingungen verifizierten Berechnungsmodellen die Verhaltensweise der Hauptelemente im Zeitverlauf zu ermitteln und ihre Eignung nachzuweisen. Die Einbaustellen der Großversuche bleiben zugänglich und die technischen Einrichtungen für die Aufgabe einer Lösungsbelastung bleiben an den Versuchsorten funktionsfähig, so dass bei gegebenen Voraussetzungen die Lösungs-Druckbelastungen der Funktionselemente unter höherer Gebirgsbelastung erfolgen können.

Angesichts der Komplexität der Aufgabenstellung und der in situ herrschenden speziellen Bedingungen konnte die Aufgabenstellung erfolgreich bearbeitet werden. Erstmalig stehen anwendbare wissenschaftliche Grundlagen für die Planung und Errichtung langzeitsicherer Abdichtbauwerke im leichtlöslichen carnallitischen Gebirgsverband zur Verfügung, die je nach den konkreten Bedingungen an den Einbauorten anpassungsfähig gestaltet werden können.

Die hohe wissenschaftliche Komplexität der Aufgabenstellung und die daraus folgende lange Bearbeitungsdauer haben zu einer Vielzahl von Einzelergebnissen geführt, die im nachfolgenden Zusammenfassenden Abschlussbericht (ZAB) und in 9 wissenschaftlichen Teilberichten (TB) im Detail niedergelegt sind. Eine Übersicht über die erarbeiteten Berichte wird im Abschnitt „Struktur des Gesamtbereichtes“ angegeben.

Im ZAB sind in der Reihenfolge der einzelnen Abschnitte jene Themen abgehandelt worden, die bei der Konzipierung und beim Bau eines Verschlussbauwerkes im Carnallitit von entscheidender Bedeutung sind. Zu diesen Themen werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in Kurzform beschrieben. Für vertiefte wissenschaftliche Informationen wird im ZAB jeweils auf die wissenschaftlichen Teilberichte im Anhang (CD) verwiesen. Die Teilberichte im Anhang entsprechen etwa den Arbeitspaketen des Vorhabens.

Struktur des Gesamtberichtes

ZAB: Zusammenfassender Abschlussbericht (Schlussbericht) zum Vorhaben 02C1204 (CARLA) „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV“ vom 31.12.2010; 145 Seiten, 64 Abbildungen; 9 Tabellen.

TB 1 (Teilbericht 1): Teilbericht „Planung des Versuchsbauwerkes und seiner einzelnen Funktionskomponenten“, IfBuS vom 30.06.2010; 107 Seiten, 33 Abbildungen; 17 Tabellen; 14 Anlagen.
Im TB1 werden Ergebnisse des Arbeitpakets AP1 des Vorhabens 02C1204 abgerechnet.

TB 2 (Teilbericht 2): Teilbericht „Auswahl der Einbaustandorte für die einzelnen zu untersuchenden Funktionselemente des komplexen Absperrbauwerkes“ K-UTEC, IBeWa, IfG vom 30.06.2010; 436 Seiten, 77 Abbildungen; 27 Tabellen; 37 Anlagen (mit 155 Seiten)
Im TB2 werden Ergebnisse der Arbeitspakete AP2, AP10, AP 6.2E und 6.3E des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet

TB 3 (Teilbericht 3): Der Teilbericht 3 besteht aus 2 Teilen:
TB 3.1:
Teilbericht „Entwicklung eines interdisziplinären Messkonzeptes zum Nachweis der geplanten Eigenschaften der Dammbaumaterialien und des Umgebungsgesteins sowie ihres Verhaltens im Zeitverlauf“; IfG,13 Seiten, 7 Abbildungen
TB 3.2:
„Entwicklung und Erprobung eines Messgerätesystems zur qualitativen und quantitativen Bestimmung von Feuchteprofilen in einem Verschlussbauwerk
MFPA vom 13.04. 2010; 23 Seiten, 27 Abbildungen.
Im TB3 werden Ergebnisse des Arbeitpakets AP3, AP9 und AP7.2 des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet

TB 4 (Teilbericht 4): Der Teilbericht 4 besteht aus 2 Teilen:
TB 4.1:
Teilbericht „Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktzone und des unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereiches“, IfBuS, vom 30.06.2010; 44 Seiten, 53 Abbildungen; 8 Tabellen; sowie 1 Anlage
TB 4.2:
Teilbericht: „In situ Tests zur Eignungsprüfung der entwickelten Behandlungskonzepte“ IBeWa, vom 15.12.2010; 78 Seiten, 47 Abbildungen, 20 Tabellen
Im TB4 werden Ergebnisse des Arbeitpakets AP4 des Vorhabens 02C1204 abgerechnet.

TB 5 (Teilbericht 5): Der Teilbericht 5 besteht aus 2 Teilen:
TB 5.1
„Labor- und In-situ-Untersuchungen zu den im Konzept (AP1) aufgeführten Verschlusselementen und Materialien – MgO-Beton“, IfBuS, vom 31.12.2010; 140 Seiten, 90 Abbildungen; 52 Tabellen, 15 Anlagen.

TB 5.2

„MgO-Baustoff – Untersuchungen zur Bildung von Sorelphasen“, IfAC, vom 20.12.2010; 55 Seiten, 52 Abbildungen; 7 Tabellen, 1 Anhang.
Im TB5 werden Ergebnisse der Arbeitpakete AP5, AP9, AP10 sowieAP3.2E, AP 7.2E und AP6.3E des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet.

TB 6 (Teilbericht 6): Teilbericht „Modellberechnungen für das Komplettbauwerk“; IfG vom 31.08. 2010; 174 Seiten, 17 Abbildungen; 1 Tabelle, 116 Anlagen.
Im TB6 werden Ergebnisse des Arbeitpakets AP6, AP9, AP10 sowie AP7.2E des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet.

TB 7 (Teilbericht 7): Der Teilbericht „Errichtung und Test von Funktionselementen; Großversuche GV1, GV2 und GV3“, IfBuS, vom 03.12.2010; 159 Seiten, 193 Abbildungen und Diagramme; 26 Tabellen sowie 18 Anhänge und 5 Anlagen
Im TB7 werden Ergebnisse der Arbeitpakete AP7, AP10 sowieAP5.2E und AP5.3E des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet.

TB 8 (Teilbericht 8): Der Teilbericht besteht aus 2 Teilen:
TB 8.1:
Teilbericht „3-Zonen-Vorschüttung – Entwicklung, Aufbau, Test und Wirkungsweise des Dammvorbauelemetes“ IfAC, vom 14.12.2010; 51 Seiten, 52 Abbildungen, 6 Tabellen sowie 2 Anhängen
TB 8.2:
Teilbericht: „Entwicklung von Gelbaustoffen für den Einsatz als Vorbauelement in tachyhdrit- und kieserithaltigen Salzformationen“, K-UTEC, vom 26.11.2010; 119 Seiten, 116 Abbildungen, 22 Tabellen
Im TB8 werden Ergebnisse der Arbeitpakete AP5, AP8, AP10 sowie AP6.3E des Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet.

:

TB 9 (Teilbericht 9): Der Teilbericht besteht aus 2 Teilen:
TB 9.1
Teilbericht zum Arbeitspaket AP9 des Vorhabens 02C1204 „Messtechnische Kontrolle und Überwachung mit Vergleich der Messwerte mit den Berechnungsergebnissen zum geomechanischen und hydraulischen Verhalten“, IfG vom 20.09. 2010; 7 Seiten.
TB 9.2
Teilbericht „Zur Beständigkeit von geschichtetem, tachyhydrithaltigem Carnallitit gegenüber erhöhten Temperaturen und im eingespannten Zustand“; IfAC vom 30.04.2010; 22 Seiten, 15 Abbildungen, 1 Anhang.
Im TB9 werden Ergebnisse der Arbeitpakete AP2, AP7, AP10 sowie AP7.2E und AP8Edes Vorhabens 02C1204 und der Ergänzung zum Vorhaben abgerechnet.

1. Vorbemerkungen

Das vorliegende Forschungsvorhaben (Teile 1 und 2) wurde unter den Projektnummern 02C0942 und 02C1204 aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF gefördert und vom Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT), betreut. Die Projektleitung erfolgte durch die GTS Grube Teutschenthal GmbH & Co. KG, Projektleiter waren nacheinander die Herren P. Knoll und M. Finder. Das Vorhaben wurde im Verlaufe der Bearbeitung unter der Kurzbezeichnung **CARLA** (**CAR**nallitische **L**angzeitsichere **A**bdichtbauwerke) geführt.

Am Vorhaben waren die folgenden wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen maßgeblich und direkt als Auftragnehmer des Projektleiters GTS GmbH & Co. KG beteiligt:

- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau (IfBuS): Prof. Dr. P. Sitz, Prof. Dr. W. Kudla, Dr. M. Gruner, DI U. Priestel, Ing. A. Kawka (bis Dezember 2008), DI B. Wasowiecz, DI M. Hofmann,
- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie (IfAC): Prof. Dr. W. Voigt, Dr. D. Freyer, DC R. Moßig, DC M. Oestreich, Dr. H. Schmidt,
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH Leipzig (IfG): Dr. K. Salzer, Dr. T. Popp, DI D. Weise, DI M. Wiedemann, DP W. Bodenstein, Dr. W. Minkley,
- Kali-Umwelttechnik AG Sondershausen (K-UTEC): Dr. Th. Fliss, DC D. Lack,
- Ingenieurpartnerschaft für Bergbau, Wasser und Deponietechnik Wilsnack & Partner Freiberg (IBeWa): Dr. Th. Wilsnack, Dr. F. Grafe,
- TSBau GmbH Jena: DI O. Einicke, J. Schrade.

Weiterhin waren für Teilaufgaben folgende Institutionen indirekt beteiligt:

- TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau (IfBuF): Dr. H.-D. Voigt,
- Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA): Dr. K. Kupfer, DI B. Müller, DI E. Trinks,

Im Rahmen des Vorhabens wurden sehr enge Kontakte zu weiteren BMBF-geförderten Forschungsprojekten aufrechterhalten, die von der gegenseitigen Information über die Mitwirkung an Untersuchungen und die Bereitstellung von Messsystemen bis zur gegenseitigen Integration von Teilergebnissen in die jeweiligen Vorhaben und somit auch in die Untersuchungskonzeption und in das Gesamtergebnis des Vorhabens CARLA reichten. Es handelte sich dabei um die FuE-Vorhaben

02C05472 (1997-2003):
Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar; Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen

02C1124 (2004-2008)
Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke

02C1064 (2004-2009)
Weiterentwicklung eines TDR-Messverfahrens zur Quantifizierung von Feuchte- und Dichteverteilungen in Bentonitversuchsbauwerken

02C0820 (2001-2004):
Zeitliche Veränderung der Ausdehnung und der hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen um Hohlräume in Gesteinen mit visko-plastischen Eigenschaften

02C1214 (2005-2007):

Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar – Hauptprojekt

02C1395 (2005-2008):
Verbundprojekt:Optimierung von Magnesiabindersystemen für die Verwendung in Verschlussbauwerken für untertägige Deponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salinar – Teilprojekt 1

02C0861 (2001-2003):
Verbundprojekt: Universelles integriertes geophysikalisches Mess- und Auswerteinstrumentarium zur Charakterisierung von Problemzonen im Salinar: Teilprojekt Uni Leipzig: Geologie, Geoelektrik, Seismik und Szenarienmodellierung

02C1335 (2005-2009):
Qualifizierung von Strömungsbarrieren in Salzformationen, Phase 1 bis Phase 4

Die Vorhabenslaufzeiten im Projekt CARLA betrugen:

Teil 1:	01.10.2002 bis 31.10.2004
Teil 2:	01.11.2004 bis 30.06.2010

Die Ergebnisse des Teils 1 wurden in [17] beschrieben; die Ergebnisse des Teils 2 und seiner Erweiterung sind Gegenstand des vorliegenden Abschlussberichtes.

2 Zielstellung und Lösungsweg

2.1 Ausgangssituation

Für die langzeitsichere Trennung einer Untertagedeponie (UTD) oder eines Bergwerkes mit untertägiger Verwertung bergbaufremder Abfälle (UTV) von der Biosphäre sind Streckendämme bzw. Streckenverschlussbauwerke unverzichtbar. Die meisten UTD/UTV sind in einem weitläufigen Grubengebäude eingerichtet worden, das während der Phase eines Gewinnungsbergbaus entstanden ist und mehrere Schächte besitzt. Unter bestimmten Bedingungen ist es notwendig, die Deponie- bzw. Versatzfelder gegen das übrige Grubenfeld mit Streckenverschlussbauwerken langzeitsicher abzutrennen. Dies ist besonders dann erforderlich, wenn im Grubengebäude Verbindungen zwischen den Einlagerungsbereichen und anderen Grubenfeldern bestehen, für die keine Langzeitsicherheit ohne technische Sicherungsmaßnahmen nachgewiesen werden kann.

Die für die Sicherheit des Grubengebäudes erforderlichen Streckenverschlüsse können nicht immer in Bereichen mit ausschließlich anstehendem Steinsalz errichtet werden. In diesen Fällen ist es erforderlich, die Streckenverschlüsse im Kalisalz, darunter auch im Carnallitit, zu positionieren. Der Carnallitit weist eine höhere Löslichkeit als Steinsalz auf. Komplizierte geologisch-mineralogische Verhältnisse liegen in der Grube Teutschenthal vor, in der Carnallitit vergesellschaftet mit Tachyhydrit- und Kieseritanteilen als Wirtsgestein ansteht (siehe Abbildung 1).

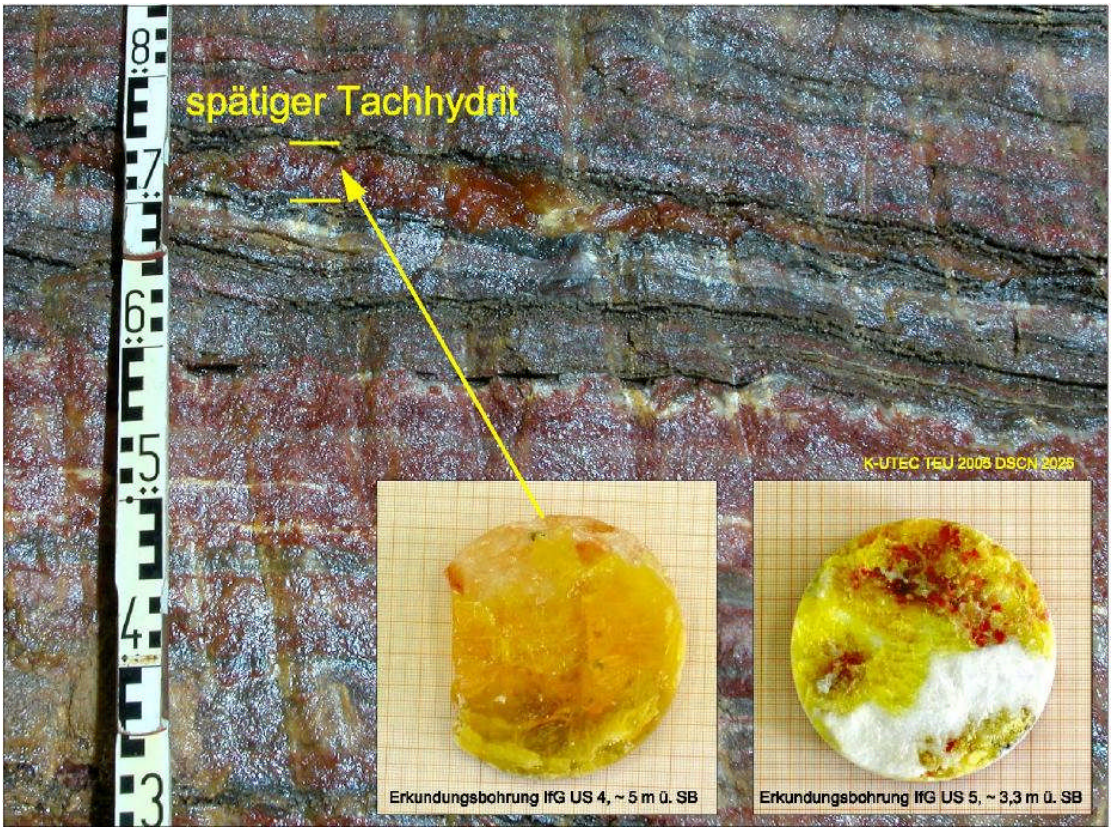

Abbildung 1: Typischer Aufschluss des Hangenden Lagerteils des Kaliflözes Staßfurt in der Grube Teutschenthal (Detailaufnahmen: links: grobkristalliner bis spätiger Tachyhydrit, rechts Tachyhydritnester mit Kieserit – weiß) [17]

Deshalb ist dort die Errichtung von langzeitsicheren und lösungsdichten Abdichtbauwerken eine außerordentlich komplizierte wissenschaftlich-technische Herausforderung. Für leichtlösliche Salzgesteine wurde bis heute noch kein nachweisbar langzeitstabiles Dichtungssystem entwickelt. Die bisherigen Entwicklungsarbeiten von Streckendämmen im Salinar beziehen sich überwiegend auf Standorte im Steinsalz.

Mit dem vorliegenden FuE-Vorhaben wurde ein Grundkonzept und die dazu gehörigen Bemessungsgrundlagen für die Errichtung von Streckendämmen im Carnallitit entwickelt. Ein erstes, vorläufiges Grundkonzept wurde bereits im Rahmen des ersten Teils des FuE-Vorhabens [17] entwickelt.

Die grundsätzliche Lösung dieser Aufgabe für die besonders komplizierten geologischen Bedingungen der Grube Teutschenthal stellt eine prinzipielle wissenschaftlich-technische Grundlage für andere, ähnlich gelagerte Anwendungsfälle dar. Dadurch ist das neue weiter entwickelte Grundkonzept für langzeitstabile Streckenverschlüsse im tachyhydrithaltigen Carnallitit grundsätzlich auf die Bedingungen in anderen Gruben (UTD, UTV) übertragbar und verallgemeinerungsfähig. Die Aufgabe der Errichtung langzeitsicherer Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Gebirge erhält somit eine besondere, über die Grube Teutschenthal hinausgehende Bedeutung und die Lösung dieser anspruchsvollen Aufgabe liefert Grundlagenerkenntnisse für vergleichbare geologische Positionen im gesamten Kali- und Steinsalz-, Versatz- und Endlagerbergbau.

Mit Förderung durch das BMBF wurde deshalb eine FuE-Aufgabe formuliert, die den Charakter einer Grundlagenforschung hat und die Bedeutung für das Deponie- und Endlagerproblem generell besitzt. Ihre Umsetzbarkeit am Beispiel der Grube Teutschenthal wird exemplarisch demonstriert.

Das gesamte FuE-Vorhaben besteht aus den zwei Teilen

Teil 1: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) – Grundlagenuntersuchungen - ; Laufzeit 01.10.2002 bis 31.10.2004; Projektnummer 02C0942; und

Teil 2: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) – Erprobung von Funktionselementen -, inkl. Vorhabenserweiterung; Laufzeit 01.11.2004 bis 30.06.2010; Projektnummer 02C1204.

2.1.1 Ergebnisse des Teil 1 des Vorhabens

Die Forschungsarbeiten dieses Teils konzentrierten sich auf die Analyse des damals vorliegenden Erkenntnisstandes, auf die prinzipiellen Möglichkeiten der Verhinderung von Auf- bzw. Anlösungserscheinungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (EGB im Sinne von [2]), auf die erste Auswahl möglicher Materialien für die Errichtung der Dammkörper und auf die Schlussfolgerungen für eine erste Annäherung an ein mögliches Grundkonzept für das komplexe Abdichtungsbauwerk sowie auf die Identifizierung der dazu erforderlichen weiteren Forschungsarbeiten [17]. Für die durchgeführten in situ Untersuchungen wurde zunächst ein Referenzstandort gewählt, der stratigraphisch dem unteren Teil des Carnallititthorizontes zuzuordnen war (VO1[1]). Auf der Basis der in situ und im Labor durchgeführten Untersuchungen und erster Modellrechnungen wurde ein erster Entwurf für das Grundkonzept eines langzeitstabilen Streckenverschlussbauwerkes im leichtlöslichen Salzgestein erarbeitet. Dieser Entwurf stellte konzeptionell den ersten Schritt für die Entwicklung künftiger Verschlussbauwerke im Carnallitit dar, der mit dem Abschluss der FuE-Arbeiten im Teil 2 des Vorhabens ein vervollständigtes Grundkonzept überführt wurde (s. vorliegender ZAB[2], Abschnitt 10).

Im Einzelnen wurden mit dem Bearbeitungsabschluss des Teils 1 die folgenden Ergebnisse erzielt [17]:

Wissensstand zu Beginn des Vorhabens

Aus der Analyse nationaler und internationaler Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge folgte, dass aufgrund der fehlenden praktischen Referenzbeispiele nicht auf vorliegende Erfahrungen zu Dammbauwerken im leichtlöslichen Salzgebirge zurückgegriffen werden konnte. Der einzige im Kalibergbau realisierte Streckenverschluss war der 1984 in Kanada gebaute Damm "Rocanville". Allerdings lagen und liegen zu ihm keine Detailinformationen vor. Andere Konzepte für Streckendämme im leichtlöslichen Gebirge waren zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Teils 1 des Vorhabens nicht realisiert worden.

Prinzipielle Möglichkeiten der Verhinderung von Auflösungserscheinungen des Wirtsgesteins

Auflösungserscheinungen 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 gegenüber einem Salzgestein vom Typ des Carnallitits-Teutschenthal (CaT) inert sind. Bei Lösungszutritt kann grundsätzlich immer nur das Auflösen eines der beiden Minerale durch Konditionierung der angreifenden Lösung verhindert werden. Bei den in Teutschenthal vorliegenden Tachyhydritgehalten erwies es

[1] Erläuterung: s.TB2 und Glossar
[2] Die Bezeichnungen ZAB und TB beziehen sich auf die Berichtsstruktur des vorliegenden Abschlussberichtes;

sich als sinnvoll, durch zusätzliche „Vorbauelemente“ (s. ZAB, Abschnitt 7 und TB 8) zum Dammkörper eine Lösung einzustellen, die zumindest gegenüber Tachyhydrit gesättigt ist, Kieserit jedoch anlösen kann.

Prinzipielle Schlussfolgerungen, die aus der Aufarbeitung des Kenntnisstandes für ein mögliches Grundkonzept gezogen wurden

In den Voruntersuchungen wurde das Verschlussprinzip einer "Dichtungskomponente mit großer Steifigkeit" favorisiert, um die möglichst frühzeitige Entstehung einer Normalspannung in der ALZ und in der Kontaktfuge (KF), resultierend aus dem Aufkriechen des Gebirges auf den Dammkörper, zu bewirken.

Auf Grund fehlender technischer bzw. in situ Erfahrungen sowie der unzureichenden Kenntnisse über die zu erwartenden geochemischen und hydraulischen Verhältnisse, bei der Planung und Konzeptentwicklung von Verschlüssen im leichtlöslichen Salzgebirge wurde ein diversitärer Aufbau bzgl. der Dichtelemente angestrebt. Dieser sollte durch Hintereinanderschaltung von Verschlusskomponenten mit gleicher Funktion (Dichtwirkung) aber unterschiedlichen Wirkungsweisen (unterschiedliche Materialien mit unterschiedlichem Wirkprinzip) erreicht werden.

Für Verschlüsse im leichtlöslichen Salzgebirge wurden deshalb die folgenden Verschlusselemente vorgeschlagen:

- Vorschüttung zur Absicherung einer tachyhydritgesättigten Lösung
- Haupt-Dichtelement (Querschnittsabdichtung mit hoher Steifigkeit)
- Standsicherheitselement (Sicherung der dauerhaften Stabilität, ggf. gekoppelt mit dem Hauptdichtelement)
- Maßnahmen zur Vergütung der Auflockerungszone (ALZ) und der Kontaktfuge (KF)
- Dichtungsschlitze

Folgende Elemente wurden als prinzipiell technisch realisierbar eingeschätzt:

- Vorschüttungen aus speziellen Salzgemischen,
- Dichtelemente aus Bentonitformsteinen,
- Standsicherheits- und Dichtelemente aus MgO-Beton (alternativ auch aus lastabtragenden Gelsystemen),
- Hochfeines MgO für Verpressarbeiten.

Mineralogische, geologische, geomechanische und geohydraulische Besonderheiten des anstehenden Salzgesteins

Aus den Untersuchungsergebnissen ließen sich folgende Besonderheiten ableiten:

- Als potenzielle Schwachstellen gelten im Bereich von ALZ und KF u.a. die bereits unter dem Einfluss der Wetterfeuchte stark auswitternden Bereiche der Gebirgsoberfläche vorzugsweise in der Umgebung der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen.
- Die Ausbildung einer aufgelockerten und durchfeuchteten Zone in den Stoßbereichen ist in starkem Maße von der Verteilung der sensiblen Mineralkomponenten anhängig. Die Stoßbereiche können im Bereich der Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen dabei deutlich durchfeuchtete Zonen - lokal bis in einige Dezimeter Tiefe - aufweisen.
- Weitere Schwächezonen werden lokal 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. In diesen Bereichen sind stärkere Wechselwirkungen und Beeinflussungen zwischen Baustoff und Wirtsgestein als in den Bänderstrukturen zu erwarten. Aus diesem Grunde ist eine detaillierte Stoßaufnahme am Ort der Dichtungselemente in Verbindung mit

geoelektrischen Erkundungsmaßnahmen erforderlich, um diese Strukturen bei der Standortauswahl ausschließen zu können.

- Die durchgeführten Fracmessungen zur Ermittlung der Minimalspannungsverteilung in Firste und Nordstoß belegten am Versuchsort VO1 (Maschinenstrecke mit kreisförmigem Querschnitt) eine nahezu rotationssymmetrische Spannungsverteilung im Umfeld [29]. Die Spannungsmessungen in unmittelbarer Nähe der Kontur (< 0,40 m) deuteten auf eine entspannte Zone hin, die qualitativ mit der Länge kompakt erbohrter Bohrkerne übereinstimmt. Darüber hinaus steigt die Minimalspannung deutlich an, bis bei ca. 3 m Konturabstand nahezu der Grundspannungszustand erreicht ist.
- Im nicht verwitterten Bereich besaß das Carnallititgebirge eine mit Kurzzeitpermeabilitätsmessungen an diskreten Messpunkten gemessene, maximale Gaspermeabilität von $3{,}5 \cdot 10^{-16}$ m^2. Im verwitterten, stoßnahen Bereich wurden höhere Gaspermeabilitäten bis maximal $2{,}4 \cdot 10^{-14}$ m^2 nachgewiesen [29]. Das lokale Permeabilitätsverhalten wird dabei stark durch die lithologische Zusammensetzung und die stratigraphische Schichtung bestimmt.

Im Hinblick auf Anforderungen an Dammbauwerke und Dichtungskomponenten sowie Versuchsplanungen konnten in [17] folgende Schlüsse gezogen werden:

- Für den Einbau von Dichtungskomponenten ist nach dem im Ergebnis des Teils 1 erreichten Kenntnisstand der Einsatz eines Beschichtungsmaterials der Gebirgskontaktfläche KF Bauwerk⇔Wirtsgestein hilfreich bzw. erforderlich. Die getesteten Beschichtungsmaterialien erreichten jedoch nur eine temporäre Wirkung.
- Generell dürfen alle einzusetzenden Baustoffe im Bauzustand bestimmte Wärmeabgabemengen nicht überschreiten, um die Freisetzung von Kristallwasser im Kontaktbereich zwischen Dammelement und Gebirgsverband mit nachfolgender Schädigung der Gebirgsoberfläche an der KF zu vermeiden.

Charakterisierung und Modellierung der Auflockerungszone

Die Ausbildung der ALZ hängt primär von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des aufgeschlossenen Salzgesteins und vom Spannungszustand im Bereich des Grubenbaus ab, der wiederum stark von der offenen Standzeit der Strecke abhängt. Die ALZ wird entlang des Grubenbauaufschlusses schichtspezifisch durch eine schichtparallel relativ tief greifende Verwitterung der leichtlöslichen Salzkomponenten überprägt. Unter Auflösung hygroskopischer Salzminerale wie Tachyhydrit (ta) und Kieserit (ks) kommt es lokal zur Ausbildung entsprechend erhöhter Permeabilitäten bzw. sogenanntem "Lochfraß“ in der ALZ.

Die Reichweite und die Größenordnung der durch Verwitterungsprozesse überprägten ALZ ergeben sich in Abhängigkeit von der Dauer und der Intensität der Einwirkung über den Volumenanteil und den Verwachsungsgrad der Minerale Tachyhydrit und Kieserit. In Abbildung 2 sind die Permeabilität und die Minimalspannung in Abhängigkeit des Abstandes von der Kontur dargestellt. Die Ergebnisse in Abbildung 2 stellen die Synthese der Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung der Ausdehnung der ALZ im Stoss anhand der teufenabhängigen Variation verschiedener Messverfahren und in situ Beobachtungen, ermittelt mit Hilfe der Muliti-Methoden-Erkundungsstrategie (MMES) [17] dar.

Die am Experimentalort VO1 beobachtete lithologische Heterogenität macht deutlich, dass für ein in der Anwendungspraxis zu erstellendes Verschlussbauwerk immer eine entsprechende spezifische Standortcharakterisierung erforderlich ist. Die generellen Wirkprinzipien, die zur Ausbildung der ALZ in leichtlöslichen Gesteinen führen, konnten näherungsweise über einen interdisziplinären Ansatz erkannt werden. Sie mussten jedoch weiter abgeklärt werden und stellten einen Schwerpunkt der Untersuchungen im Teil 2 dar.

Insgesamt stehen für die Simulation der gesteinsmechanischen und hydraulischen Prozesse geeignete Werkzeuge zur Verfügung, die jedoch material- und standortspezifisch anzupassen sind. Auf dieser Grundlage sind grundsätzlich die gebirgsmechanische Bemessung des untertägigen Dichtsystems sowie die Berücksichtigung der hydraulisch-mechanischen Wechselwirkung in und um den Streckendamm möglich.

Maßnahmen zur Einstellung einer zielgerichteten Lösungszusammensetzung

Theoretische und experimentelle Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, bei Zutritt ungesättigter Lösungen durch geeignet gewählte, trockene Aufschüttungen von Salzkomponenten die Lösungszusammensetzungen so zu transformieren, dass eine Anlösung in der ALZ bzw. im umliegenden Gebirge des Dammbauwerkes minimiert bzw. verhindert werden kann. Dazu wurde das Wirkprinzip eines sogenannten 3-Zonen-Vorbauelements entwickelt.

Für die Dimensionierung und Wahl der Zusammensetzung der Schüttbereiche dieses Vorbauelements sind folgende Funktionen von besonderer Bedeutung (siehe Abbildung 3):

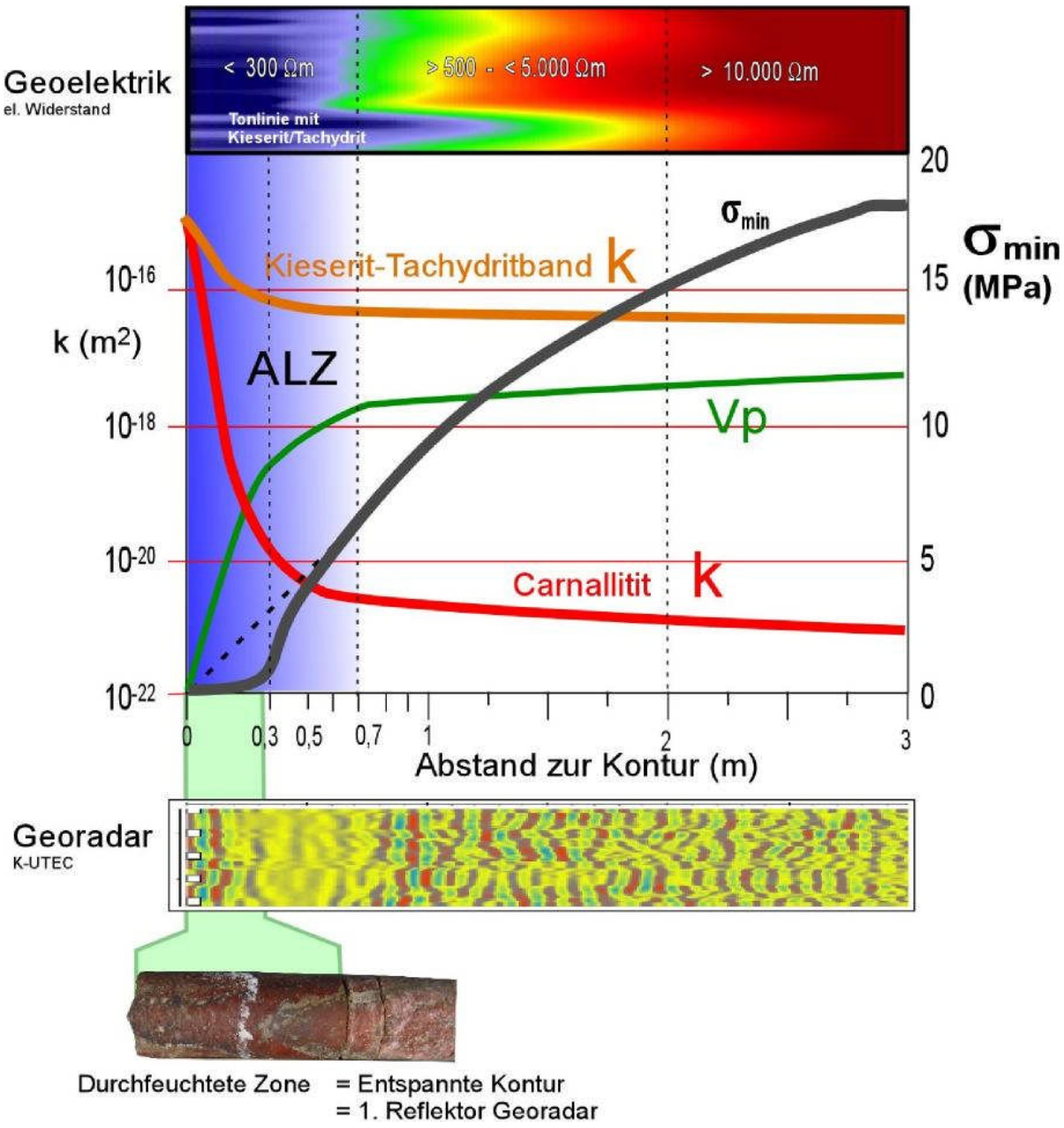

Abbildung 2: Synthese der Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung der Ausdehnung der ALZ im Stoss anhand der teufenabhängigen Variation verschiedener Messverfahren und in situ Beobachtungen, ermittelt mit Hilfe der Muliti-Methoden-Erkundungsstrategie (MMES) [17].

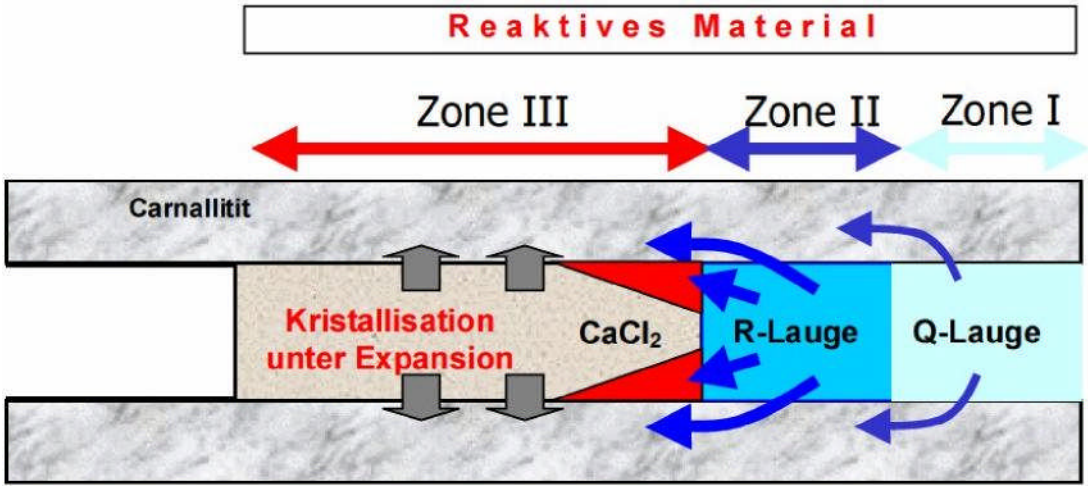

Abbildung 3: Einbringen von reaktiven Sulfaten in 3 Zonen zum Sichern der Sättigungsbedingungen und Erzeugung einer Abdichtwirkung unter dem Gesichtspunkt eines gleichzeitigen Antreffens von Carnallit, Tachyhydrit und Kieserit in der ALZ [17]

1. Beim Durchlaufen einer NaCl-Lösung bzw. einer ungesättigten Kalilauge durch ein Carnallititthaufwerk wird die Zusammensetzung Q-Lösung 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 eine schnelle 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 Porenraumverringerung 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.

Möglichkeiten für eine langzeitliche Ertüchtigung der ALZ

Für die Vergütung des Kontaktbereiches zwischen Bauwerk und Gebirge durch Penetration/Injektion wurden Suspensionen aus hochfeinen MgO und R-Lösung sowie ein neu entwickeltes Zweikomponenten-Bitumen (2-K-Bitumen [17]) in situ getestet. Bei der Injektion mit MgO-Suspensionen konnten selektive Lösungserscheinungen im Gebirge nicht ausgeschlossen werden, so dass die Kontaktfuge KF nicht vollständig vergütet werden konnte. Das Zweikomponenten-Bitumen ist kalt verarbeitbar und kann Rissweiten bis minmal etwa 30 µm ausfüllen. Vorteilhaft ist sein gegenüber den Salzlösungen und dem Gebirge inertes Verhalten. Die Qualität der Vergütung der KF mit dem 2-K-Injektionsbitumen wurde durch Permeabilitätsmessungen und mikroskopische Untersuchungen

nachgewiesen. Eine vollständige "Vergütung“ der KF und der angrenzenden Verwitterungszone VWZ ist jedoch nicht sicher erreichbar.

Bohrlochversuche mit Bentonitdichtelementen 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 hygroskopischen tachyhydrithaltigen Carnallitits die Wasseraufnahme und damit das Quellverhalten des Bentonits stark eingeschränkt sind.

Mit Bohrlochverschlüssen aus MgO-Beton wurden zahlreiche Versuche zu Bohrlochabdichtungen durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind folgende:

- Bohrlochverschlüsse aus MgO-Beton (Rezeptur MB6) waren hinsichtlich des Lastabtrags auch bei Flüssigkeitsdrücken bis mindestens 100 bar stabil.
- Durch eine zwischengeschaltete Bitumendichtschicht sind Elemente aus MgO-Beton praktisch flüssigkeitsdicht. Eventuelle 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 Abdichtsystems im Bohrloch ($k < 10^{-17}$ m^2) ist eine Beraubung der aufgelockerten und verwitterten Bereiche des konturnahen Gebirges. Ansonsten kommt es zu hydraulischen Kurzschlussströmungen über die ALZ. Die Funktionstüchtigkeit der MgO-Betonpfropfen hinsichtlich Dichtheit war am Versuchsort ab einer Tiefe des Streckenstoßes von 50 – 60 cm erreicht.
- Bevorzugte Fließwege im Gebirge lagen offenkundig an den Grenzflächen zwischen Tachyhydrit und Kieserit bzw. Tachyhydrit und Carnallitit sowie an den als tonige Schichten bezeichneten, Tachyhydrit enthaltenden Lagen vor. Die Permeabilität des Gebirges außerhalb der ALZ erreichte am Versuchsort VO1 nach punktuellen Kuzzeitmessungen Werte zwischen 10^{-17} m² und 10^{-21} m^2 .

Durch Untersuchungen zu Wechselwirkungen zwischen polymineralischen Salzproben und ausgewählten Salzlösungen konnte gezeigt werden, dass die untersuchten tachyhydritgesättigten (-übersättigten) Lösungen als Schwerelösung 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 Material für die Last abtragenden Funktionselemente wurde der klassische MgO-Beton an die vorliegenden Bedingungen angepasst. Zunächst wurde als Vorzugsvariante 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.

Weiterhin wurden dauerplastische und ortsstabile Baustoffe auf der Basis von Magnesia-Bindern untersucht. Dazu gehören die von K-UTEC entwickelten Gelbaustoffe, die an die höheren Anforderungen angepasst werden müssen. Eine Tachyhydrit-Sättigung zur Verhinderung von schädigenden Auflösungseffekten in der Kontaktzone zum Wirtsgestein sowie zur Unterbindung von Umläufigkeiten des Absperrbauwerkes über Tachyhydritbänder konnte prinzipiell als realisierbar bewertet werden. 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 (z.B. aus der Vorschüttung) und zur Beschickung und Abschirmung der ALZ.

Anhydritbaustoffe wurden verworfen, da bei $MgCl_2$-gesättigten Lösungen als Anmachflüssigkeit die Hydratisierung von Anhydrit als Zuschlagstoff nicht mehr möglich und die von Halbhydrat deutlich verzögert ist.

2.1.2 Entwicklung eines vorläufigen Grundkonzeptes

Im ersten Teil des FuE-Vorhabens [17] wurden mögliche Wirkprinzipien für die Verminderung der Volumenströme über den konturnahen Gebirgsbereich und den Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für horizontale Verschlusssystem im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) betrachtet. Die daraus gezogenen Schlussfolgerungen für ein langzeitstabiles horizontales Verschlusssystem im Carnallitit lassen sich wir folgt zusammenfassen [17]:

- Der Verschluss soll möglichst lang sein und möglichst überwiegend mechanisch steife Elemente beinhalten. Der Einsatz steifer Elemente soll dem möglichst schnellen Aufbau einer Normalspannung auf die Kontaktfuge KF dienen. Abrupte Wechsel zwischen steifen und nachgiebigen Elementen sind zur Schonung des umgebenden Gebirges und zur Rissbegrenzung im steifen Bauteil durch zwischengeschaltete Übergangsschichten auszugleichen.
- Als Hauptmaterial für Lastabtrag und Querschnittsdichtung wurde MgO-Beton ausgewählt, der mit R-Lösung als Anmachflüssigkeit hergestellt wird.
- Für die Unterbrechung der Strömungswege im ausbruchsnahen Gebirge und im Kontaktbereich wurden umlaufende Dichtungsschlitze und zielgerichtete Kontaktspaltinjektionen vorgeschlagen.
- Aus Gründen der Diversität für Querschnitt- und Kontaktfugendichtung werden zusätzliche Dichtelemente aus Asphalt vorgeschlagen. Das Asphaltelement kann mit Dichtungsschlitzen kombiniert werden.
- Für die Gewährleistung einer ausreichenden Tachyhydrit-Sättigung der zum Verschlussbauwerk anströmenden Lösung werden sogenannte Vorbauelemente vor das eigentliche Dammbauwerk auf der Lösungsseite positioniert. Als geeignete Vorbauelemente wurden eine definierte Dreizonen-Salzvorschüttung oder/und ein ortsstabiles Tachyhydritdepot aus Gelbaustoff identifiziert und die zugehörigen Grundsatzlösungen entwickelt.

Den ersten Entwurf für den prinzipiellen Aufbau eines langzeitstabilen Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgestein zeigt Abbildung 4. Dieser Entwurf basiert auf den Ergebnissen und dem Kenntnisstand des Teiles 1 des Vorhabens CARLA [17]. Dabei kommen folgende Materialien zum Einsatz:

Für die Vorbauelemente:

- Carnallitit / kieseritreicher Carnallitit (Schnittsalz)
- Calciumsulfat-Halbhydrat
- wasserarmes $CaCl_2$
- Schotter
- Gelbaustoff (mit Tachyhydritdepot)

Für die Hauptelemente:

- MgO-Beton
- Asphalt
- 2-Komponenten-Injektionsbitumen

Für die Nachbauelemente:

- Schotter

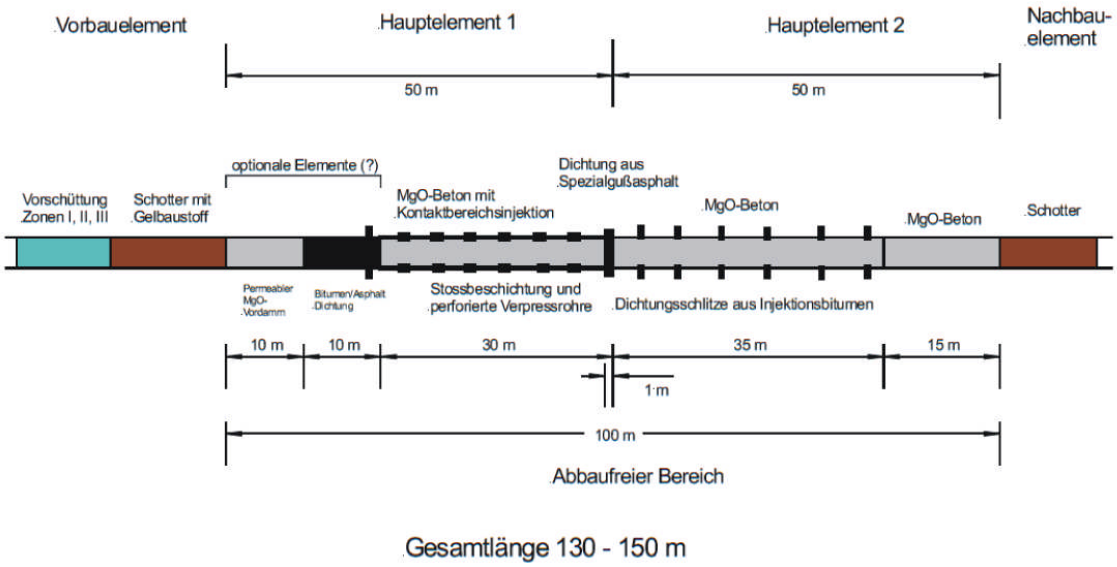

Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau eines langzeitsicheren Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgebirge (vorläufiger Vorschlag im Ergebnis des Teil 1 des Vorhabens) [17]

Zu diesen Materialien liegen bereits erste Untersuchungsergebnisse aus dem Teil 1 des FuE-Vorhabens [17] vor. Die fortlaufenden Untersuchungen haben folgende Zielstellungen:

- Entwicklung technisch einsatzreifer Rezepturen,
- Entwicklung und Erprobung geeigneter Einbauverfahren und Nachweis der Herstellbarkeit der vorgesehenen Elemente,
- Bestimmung der für die Nachweisführung (Funktionstüchtigkeit, Bauwerksintegrität) erforderlichen Materialparameter,
- Nachweis der Langzeitstabilität,
- Entwicklung eines übertragbaren Qualitätssicherungssystems für alle verwendeten Materialien.

Diese Zielstellung wird nachfolgend erläutert.

2.2 Aufgabenstellung für den Teil 2 des Vorhabens CARLA

Gegenüber dem außerhalb des Vorhabens bisher vorrangig untersuchten Salzgestein "quasihomogenes und isotropes Steinsalz“ bedeutet die Erweiterung der Untersuchungen auf Carnallitit/Teutschenthal, das infolge seiner Schichtung stofflich, geomechanisch und hydraulisch deutlich anisotrope Eigenschaften aufweist und zudem noch inhomogen bzgl. seiner mechanischen und hydraulischen Eigenschaften sowie seines Lösungsverhaltens ist, eine wesentliche Erweiterung des wissenschaftlichen Problemspektrums sowie der Untersuchungs- und Modellierungserfordernisse. Folglich wurden zunächst im Teil 1 des Vorhabens die Grundlagenuntersuchungen zu den verwendbaren Baumaterialien, zu den bestimmenden Parametern der Einbindung der Bauwerke in den Gebirgsverband (z.B. Auflockerungszone im Bereich der Gebirgskontur, ALZ), zu den Besonderheiten des zu erwartenden Lösungsangriffs und seiner Wechselwirkung mit den mineralischen

Bestandteilen des Wirtsgesteins untersucht und eine Startvariante eines möglichen Grundkonzeptes für ein Verschlusssystem entwickelt.

Dieses vorläufige Grundkonzept (Abbildung 4) lenkte die Aufmerksamkeit auf die wesentlichen und neuartigen wissenschaftlichen Fragestellungen, auf die Anforderungen an die Baumaterialien und deren Wechselwirkung mit dem umgebenden Gebirge, so dass die erweiterte Basis für vertiefende wissenschaftliche Untersuchungen und für in situ Erprobungen von Funktionselementen mit begleitender rechnerischer Modellierung gegeben waren. Diese Phase der Bearbeitung erfolgte im Teil 2 des Vorhabens und fand eine zusammenfassende Darstellung der ersten Bearbeitungsetappe im Bericht zum 1. Meilenstein [18].

In dieser Phase war es erforderlich und möglich, die wesentlichen Bauvarianten einzelner Funktionselemente in Form von Technikumsversuchen sowie Großversuchen in situ zu planen, zu errichten und zu untersuchen. Andererseits kristallisierten sich weitere neuartige wissenschaftliche Fragestellungen heraus. Die neuen Fragestellungen zwangen zur Erweiterung des Untersuchungsumfangs des Teils 2 des Vorhabens.

Bei der Bearbeitung der Gesamtaufgabe kristallisierten sich als Hauptschwerpunkte der Arbeiten die nachfolgend genannten Fragestellungen heraus, die jede für sich zu einer Vielzahl, außerhalb des Vorhabens z.T. noch nicht bearbeiteten bzw. bisher ungelösten wissenschaftlichen Aufgaben führten.

In erster Linie sind dabei zu nennen:

- Entstehung, Ausbildung, Struktur und geomechanisch/hydraulische Wirksamkeit der ALZ im anisotropen und inhomogenen Salzgebirge, die nicht nur in erster Linie geomechanische sondern auch lösungskinetische und geochemische Ursachen hat;
- Wechselwirkung von angreifenden Salzlösungen (ungesättigte NaCl-Lösungen, Q-Lösung, R-Lösungen, calziumhaltige Kalilaugen) mit dem anstehenden Carnallitit und mit den verwendeten Baustoffen über sehr lange Zeiträume;
- Behandlung der Kontaktfuge (KF) sowie des direkt angrenzenden Bereiches der ALZ zur Gewährleistung der dauerhaften Verhinderung von Permeabilitätszunahmen in diesen Zonen, die der Gewährleistung der geforderten integralen Permeabilität des komplexen Bauwerkes entgegenstehen.

Entscheidend für die Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen war im Teil 2 die technologische Umsetzbarkeit der gefundenen wissenschaftlich-technischen Lösungen im sehr großen Maßstab in situ. Im Rahmen der Forschungsaufgabe konnte aber dabei nicht ein vollständiges Abdichtungsbauwerk in situ errichtet werden, sondern planmäßig wurden einzelne wesentliche Funktionselemente eines solchen Bauwerkes errichtet und untersucht. Aus diesem Grunde teilten sich die wissenschaftlichen Untersuchungen in

- Messungen und Untersuchungen von Einzelzusammenhängen im Labor,
- drei großmaßstäbliche Versuche in situ, die Großversuche GV1, GV2, GV3
- sowie in begleitende mittelmaßstäbliche Untersuchungen (z.B. KV1, In-situ-Bohrlochversuche zur 3-Zonen-Vorschüttung u.a.)

auf. An Hand aller Untersuchungsergebnisse wurde dann das im Teil 1 des Vorhabens CARLA entwickelte Grundkonzept für Abdichtbauwerk weiterentwickelt.

2.3 Lösungsweg für den Teil 2 des Vorhabens

Ausgangspunkt für die Formulierungen des konkreten Lösungsweges sind die Basisvorgaben für die Dammbauwerke und die geowissenschaftlichen Eckpunkte, die sich aus den Ergebnissen des Teils 1 des Vorhabens [17] ergeben.

Funktionalität / Anforderungen:

Das Abdichtbauwerk muss die Anforderungen an Stabilität (Lagesicherheit, Festigkeit, Verformbarkeit, Sicherheit gegen Rissbildung) für Dammkörper und Gebirge sowie die Anforderungen an die Funktionalität (Dichtheit, Korrosionsstabilität) zeitnah nach der Errichtung bis hin zu langen Zeiten erfüllen.

Konzeptionelle Ziele:

Die funktionalen Elemente des Abdichtbauwerkes sollten möglichst redundant und diversitär im Gesamtbauwerk vorhanden sein. Die funktionalen Elemente des Abdichtbauwerkes sollen möglichst redundant und diversitär im Gesamtbauwerk vorhanden sein. Diese Forderung dient der Erhöhung des Sicherheitsniveaus und ist bei großtechnischen Anlagen üblich.

Dichtheitsanforderungen:

Die Dichtheitsanforderungen an das Abdichtbauwerk resultieren zunächst aus den am Standort gegebenen Sicherheitsanforderungen sowie aus der integralen effektiven Permeabilität des Gebirges (unverritztes Wirtsgestein, EWG). Sie führen auf notwendige physikalische, chemische und hydraulische Eigenschaften des Abdichtbauwerkes, die mit den lokalen Bedingungen wie Chemismus der angreifenden Lösung, maximaler Lösungsdruck, Gebirgsspannungen, maximal mögliche Bauwerkslänge usw. zusammenhängen. Die Dichtheitsanforderung an das gesamte Verschlussbauwerkes wird üblicherweise als maximal zulässiger Volumenstrom formuliert.

Bei der Umsetzung der Dichtheitsanforderungen sind insbesondere zu beachten:

- Auflockerungszone ALZ (Bildungsmechanismus, zeitliche Entwicklung, Verheilung, Permeabilitätsdaten),
- Kontaktfuge KF (physikalische Ausbildung und deren zeitliche Veränderung; die mechanische, stoffliche, thermische, chemische Wechselwirkung Baustoff ↔ Gebirge ↔ angreifende Lösung; Einfluss des Spannungszustandes, zeitabhängige Deformation („Zudrücken“) der KF durch das umgebenden Gebirges).

Sicherheitsanforderungen:

Tragfähigkeit: Lagesicherheit (Aufnahme des maximalen Lösungsdruckes p_{max} in den Grubenbauen bei nur minimaler Verschiebung; ggf. Gewährleistung von Widerlagerfunktion für andere Bauteile des Gesamtbauwerkes)

Gebrauchstauglichkeit: Aufnahme der Gebirgsspannungen ohne Rissbildung über die Gesamtzeit; Aufnahme von Temperaturspannungen ohne Rissbildung in der Bauphase; Aufnahme von eigenen Quelldrücken des Baustoffes und Quelldrücken benachbarter Bauteile ohne Rissbildung und Festigkeitsabnahme;;

Für die Bearbeitung der Aufgabenstellung wurden deshalb die folgenden ***Arbeitspakete*** formuliert und bearbeitet, deren Ergebnisse in den Teilberichten TB 1 bis TB 9 beschrieben werden:

AP1: Planung eines Versuchsbauwerkes und seiner einzelnen Funktionselemente;

AP2: Auswahl der Einbaustandorte für die einzelnen zu untersuchenden Funktionselemente des komplexen Absperrbauwerkes;

AP3: Entwicklung eines interdisziplinären Messkonzeptes zum Nachweis der geplanten Eigenschaften der Dammbaumaterialien und des Umgebungsgesteins sowie ihres Verhaltens im Zeitverlauf; Funktionssicherung des Bauwerkes;

AP4: Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktfuge und des unmittelbar daran

anschließenden Gebirgsbereiches (ALZ) in der Einbauzone;

AP5: Labor- und in situ Untersuchungen zu den im Konzept (AP1) aufgeführten Verschlusselementen und Materialien;

AP6: Modellberechnungen für das Komplettbauwerk (Dammelemente, Kontaktfuge, ALZ, unverritztes Gebirge);

AP7: Errichtung und Test von Funktionalelementen (Modulen);

AP8: Konzipierung, Errichtung und Test geeigneter „Vorbau-Elemente“;

AP9: Messtechnische Kontrolle und Überwachung mit Vergleich der Messwerte mit den Berechnungsergebnissen zum geomechanischen und hydraulischen Verhalten;

AP10: Verarbeitung der Ergebnisse zu Prüfkriterien und Testanforderungen für Absperrbauwerke der untersuchten Kategorie;

AP11: Berichtsfassung.

Teil 2, Erweiterung:

E 3.2: Langzeitsicherheit sowie mechanische und hydraulische Eigenschaften des MgO-Betons;

E 5.2: Technologische Beherrschung großer MgO-Beton-Volumina bei unterschiedlichen Herstellungstechnologien;

E 5.3: Dichtelement „Asphaltbarriere“ aus Einzelbausteinen

E 6.2: Verhalten und Eigenschaften der Mineralbestandteile des Gebirgsverbandes: Lösungsverhalten und Gebirgspermeabilität;

E 6.3: Hochauflösenden 3D-Geoelektrik für die Standortcharakterisierung von Dammstandorten in komplizierter geologischer Umgebung;

E 7.2: Untersuchungen der Großversuchsbauwerke GV1, GV2 und GV3 sowie der unmittelbaren Gebirgsumgebung nach Abschluss der Belastungsversuche;

E 8: Klärung der Beständigkeit von geschichtetem, tachyhydrithaltigem Carnallitit gegenüber erhöhten Temperaturen und im eingespannten Zustand.

Unabhängig davon, dass die Ergebnisse des Vorhabens grundsätzliche Gültigkeit besitzen sollten, wurden die experimentellen Untersuchungen, Berechnungen und Messungen exemplarisch für den Forschungsstandort Grube Teutschenthal realisiert, die hauptsächlich durch die folgenden Parameter gekennzeichnet ist:

Teufe:	ca. 700 m,
maximaler Lösungsdruck:	8,0 MPa,
geforderte Funktionsdauer:	> 30.000 Jahre
angreifende Lösungen:	Lagerstättentypische kalziumhaltige Kalilaugen

Bei den Zielstellungen des Vorhabens war von vornherein klar, dass das Ergebnis der Forschungsarbeiten nur eine erste, aber praktikable Näherung an ein langzeitsicheres Abdichtungsbauwerk im leichtlöslichen Salzgebirge sein konnte, weil bei der Bearbeitung der überwiegend neuartigen Aufgabenstellungen eine Reihe wissenschaftlicher Probleme nicht abschließend gelöst werden konnte.

Die im Detail in den Teilberichten TB 1 bis TB 9 dargestellten Forschungsergebnisse werden nachfolgend in den für ein Abdichtbauwerk bestimmenden Sachbestandteilen

- Charakteristik des umgebenden Gebirges im unbeeinflussten und im vorm Grubenbau beeinflussten Zustand bzgl. seiner geologischen, mineralogischen, hydraulischen und gebirgsmechanischen Eigenschaften;
- Auswahl und Beschreibung der in Frage kommenden Baumaterialien für die Dammbauwerke;
- Besonderheiten des Kontaktbereiches zwischen Dammbauwerk und Gebirge;
- Verifizierung der Eigenschaften sowie Untersuchung und Nachweis der technologischen Realisierbarkeit der Eigenschaften von Abdichtbauwerken im carnallitischen Gebirge;
- Möglichkeiten der Beeinflussung des Lösungsangriffs auf die Abdichtbauwerke und
- Grundprinzipien des rechnerischen Nachweises der erforderlichen Eigenschaften eines Abdichtbauwerkes unter den exemplarischen Bedingungen am VO3 der Grube Teutschenthal

zusammenfassend dargelegt.

3. Charakterisierung des carnallitischen Gebirgsverbandes, insbesondere der ALZ

Für die Auslegung und Bemessung von Verschluss- bzw. Absperrbauwerken sind die geomechanischen und geohydraulischen Eigenschaften des umliegenden Gebirges, insbesondere des konturnahen Gebirgsbereiches wichtige Eingangsparameter. Diese werden wiederum durch die geologische und mineralogische Beschaffenheit des Gebirges beeinflusst.

Die Aufgabe einer geotechnischen Standortcharakterisierung besteht deshalb in folgenden Teilaufgaben:

- Nachweis der grundsätzlichen Dichtheit des umgebenden Salzgebirges (EWG), um zu zeigen, dass ein geeignetes Abdichtbauwerk die hydraulische Trennung bestimmter Grubenfelder überhaupt bewirken kann.
- Die geologische und mineralogische Struktur des Gebirges (Wirtsgestein) so weit aufzuklären, dass die gebirgsmechanischen und hydraulischen Anforderungen an ein Abdichtbauwerk und seine Umgebung in die Funktionsnachweise hinreichend genau eingebunden werden können.
- Geogen vorhandene und technogen erzeugte potentielle Wegsamkeiten in der hohlraumbeeinflussten Zone im Kontaktbereich zu erkunden bzw. den Mechanismus ihrer Entstehung aufzuklären und die Wegsamkeiten bezüglich ihrer Reichweite und der Möglichkeiten ihrer Beseitigung zu charakterisieren.
- Bestimmung der geohydraulischen Eigenschaften dieser sekundär entstandenen Wegsamkeiten im Nahfeld.
- Ermittlung der Temperaturempfindlichkeit und der Verwitterungsempfindlichkeit des Carnallititgebirges

Die dabei abgeleiteten Parameter sind essentiell für die Erstellung eines gekoppelten geohydraulisch/mechanischen numerischen Modells. Über numerische Berechnungen an diesem Modell kann dann die Wirkung der Absperrbauwerke nachgewiesen und ein Stofftransport simuliert werden. Erst auf Basis dieses Instruments ist die Projektierung und Errichtung eines realen Absperrbauwerkes unter den standortspezifischen Rahmenbedingungen möglich.

Durch Versuchsorte VO1, VO2A, VO2B und VO3 in der Grube Teutschenthal (s. TB 2) ist das Kaliflöz Staßfurt nahezu vollständig aufgeschlossen und experimentell untersucht. Dadurch ist es möglich, ein umfassendes Bild über die Beschaffenheit und die Eigenschaften des in der Lagerstätte Teutschenthal anstehenden Carnallitits (CaT) darstellen zu können.

3.1 Geologische und mineralogische Charakterisierung des Wirtsgesteins Carnallitit

Der untersuchte Carnallitit besteht aus folgenden Mineralen ([17] und TB 2):

Carnallit ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6\ H_2O$) als Hauptkomponente tritt in kräftig rot bis bräunlichen, grau gefärbten und farblosen Varietäten auf, die je nach stratigraphischem Flözbereich in Schichten von cm- bis m-Dimensionen wechsellagern. Die einzelnen Lagen erweisen sich als relativ rein oder sind durch unterschiedliche Beimengungen gekennzeichnet, wodurch die Anzahl der Schichtungsmerkmale weiter vervielfältigt wird. Im Wesentlichen handelt es sich um die auch sonst als Hauptkomponenten des Gesteins auftretenden Minerale: Halit, Kieserit, Tachyhydrit, um Hämatit als Farbpigment, zurücktretend auch um „tonige“ Substanz.

Halit (NaCl) tritt neben der Einsprengung im Carnallit vor allem in diskreten, relativ kompakten Lagen von cm- bis dm-Mächtigkeiten auf, die bei deutlicher Ausprägung Bedeutung für die feinstratigraphische Flözgliederung besitzen (z.B. sogen. „Spätbank“, einem halitischen Leithorizont im CaT). Sie dominieren in den unteren Bereichen des aufgeschlossenen Flözprofils, treten dagegen in seinen oberen Teilen an Zahl und Mächtigkeit deutlich zurück.

Kieserit, ks ($MgSO_4 \cdot H_2O$) variiert lagenweise in einem weiten Quantitätsbereich von diffusen akzessorischen, makroskopisch nicht wahrnehmbaren Anteilen bis zu vorwiegend kieseritischen (neben Carnallit und/oder Halit sowie Tachyhydrit) Lagen, mit Mächtigkeiten überwiegend im cm-Bereich und vertikal sowie auch seitwärts mit sehr veränderlichen Verwachsungsstrukturen der Komponenten. Je nach Lage liegt der Kieserit Gehalt zwischen 4 und 16 %.

Tachyhydrit, ta ($2\ MgCl_2 \cdot CaCl_2 \cdot 12\ H_2O$) ist in seinem Hauptanteil auf die mittleren und oberen Teile des Flözprofils konzentriert. Das Mineral tritt überwiegend als horizontweise dispergierte, nest- bis linsenartige Einsprengungen im Carnallitit und Kieserit auf. Lagenartig aushaltende Anreicherungen sind vor allem im oberen Lagerteil entwickelt. Durch hohe Hygroskopizität zerfließt das Mineral bald nach seiner Freilegung. Porige bis kleinkavernöse Gesteinsoberflächen, schmierige Zersetzungsprodukte (Gips, Eisenhydroxide), an glatten Stößen von Maschinenstrecken auch Spuren ehemaliger Feuchteflecke sind Hinweise auf seine ehemalige Existenz. Je nach Lage liegt der Tachyhydritgehalt bei Werten von 0 % bis 16 %. Vereinzelt sind höhere Werte (lokal bis 40 %) möglich.

Im nördlichen Bereiche des Grubenfeldes Teutschenthal geht infolge einer tektonischen Überprägung das normal geschichtete Carnallititprofil zum Trümmercarnallitit über. Der Grad der Gefügestörung entspricht der tektonischen Beanspruchung.

Eine lithologische Schichtengliederung am Versuchsort VO3 lässt sich wie in Tabelle 1 darstellen.

Tabelle 1: Lokale lithologische Schichtengliederung am Versuchsort VO3 der Grube Teutschenthal

Nr.	Mächtigkeit [m]	Beschreibung
1	> 1,10	Carnallitit (geschichtet)
2	ca. 0,40	Halitbank (Wurmbank)
3a	0,30 – 0,50	Carnallitit unscharf gebändert
3b	ca. 0,35	Carnallitit mit gestörtem Interngefüge
3c	ca. 0,20	Carnallitit kieseritarm
4	ca. 0,10	Halitbank (gering mächtig)
5	0,30 – 0,60	Carnallitit mit gestörtem Interngefüge und ausgeprägter Kleinfaltung
6a	1,00 – > 3,00	Carnallitit-Wechsellagerung mit gestörter Schichtung Varietät A: dunkler, höhe ta-Gehalt Varietät B: heller, höherer ks-Gehalt
6b	0,50 – 0,70	Carnallitit mit gestörter Schichtung, rote Färbung
7a	0,30 – 0,50	Carnallitit dunkelgrau mit zwei blassroten Streifen
7b	0,10 – 0,60	Carnallitit gestörtes Gefüge, höherer ta-Gehalt z.T. als Klasten auftretend
8	>> 1,00	Carnallitit mit gestörter Schichtung: Varietät A: dunkler, höherer ta-Gehalt; Va B: heller, höherer ks-Gehalt

Die besonders ta-reichen (und ks-ärmeren) Carnallitit-Partien (Schicht 6b und Schicht 7b) können potentielle Problemzonen hinsichtlich möglicher hydraulischer Wegsamkeiten darstellen.

Bezüglich des Vorkommens von leicht löslichen Gesteinspartien ist anzumerken, dass im Gefügedetail eine Ausbildung in Form ungleichmäßig verteilter Flocken und Nestern dominiert, obwohl Tachyhydrit (ta) phänomenologisch als schichtartige Anreicherung zonar in deutlichen Anteilen festzustellen ist. Damit fehlen am Versuchsort VO3 im Gegensatz zum Carnallitit am Versuchsort VO1 aus dem Teil 1 des FuE-Vorhabens [17], der den oberen Lagerteil (oberhalb der Spätbank) des Grubenfeldes repräsentiert, durchgehende kompakte Tachyhydrit-(ta-)-Lagen. Im Versuchsort VO3 sind ta-reiche Bereiche als bevorzugt dunkle, kieserit-ärmere Carnallititpartien vorhanden, z.B. in der Schicht 7.

Weiterhin ist der Tachyhydrit als sehr hygroskopische Mineralkomponente die Hauptursache für die Verwitterung der Gebirgsoberfläche infolge des Zutrittes der Umgebungsfeuchte (Einfluss des Wasserdampfpartialdruckes und der Temperatur (s. TB 9.2 und [9]). Abbildung 5 zeigt die Existenzgebiete von Tachyhydrit und Carnallit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur. Oberhalb der jeweiligen Gleichgewichtslinie setzt ein "Zerfließen" ein. Demzufolge kann Tachyhydrit beispielsweise bei 30°C gemäß theoretischen Berechnungen bis zu einer Luftfeuchte von 17% und entsprechend den durchgeführten Versuchsergebnissen bis ca. 23% existieren. Oberhalb der angegebenen Prozentwerte beginnt er zu zerfließen. Bei 70°C und einer Luftfeuchte von bis zu ca. 22,5% - nach Extrapolation der Messdaten bis ca. 26% - zersetzt sich Tachyhydrit gerade noch nicht.

Die Verwitterung setzt bei einer ausreichenden Wetterfeuchtigkeit unmittelbar nach dem Auffahren des Hohlraumes oder dem Nachschnitt der Kontur ein. Die Verwitterung ist nicht nur vom ta-Gehalt, sondern auch von den jeweilig vorliegenden Mineralvergesellschaftungen bzw. Mineralverwachsungen abhängig.

Für den Einbau von Verschlussbauwerken ist die Verwitterung des anstehenden Gebirges bedeutsam. Da im Bereich der Dichtelemente generell ein Nachschnitt des konturnahen Gebirges erfolgen muss, ist der Prozess der beginnenden Verwitterung sofort nach dem

Nachschnitt relevant. Tabelle 2 zeigt entsprechende Ergebnisse von Versuchen zur Bestimmung der Verwitterungsrate für den Carnallitit in der Grube Teutschenthal (s. TB 9.2).

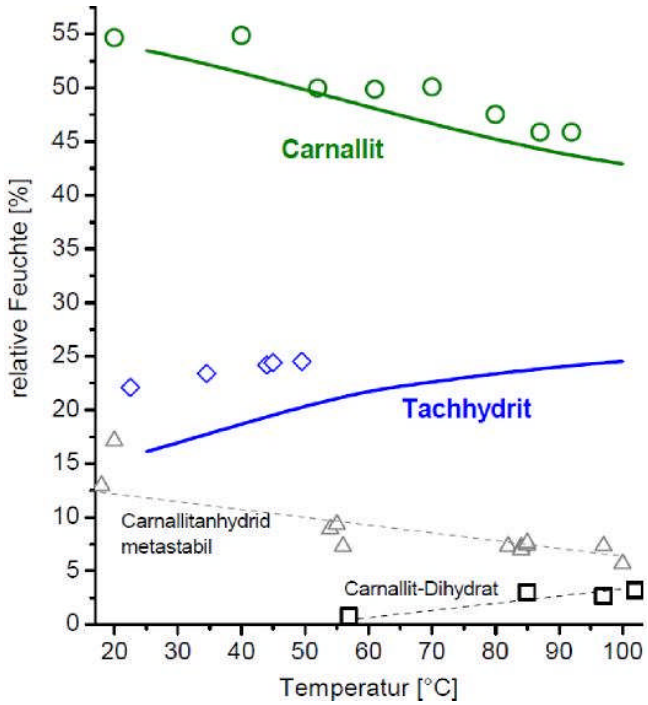

Abbildung 5: Temperatur- und feuchteabhängige Existenzgebiete von Tachyhydrit und Carnallit (TB 9.2)

Tabelle 2: Verwitterung des Carnallitits

	ta-arm	**ta-reich**
Anfangsrate (Simulation Spitzbetoneinbau in Klimakam mit 40 – 60 % rF)	1 mm/d	1 mm/d
Verwitterungsrate nach 10 Tagen Standzeit (Klimakam 40 – 60 % rF)	0,05 – 0,09 mm/d	0,2 – 0,3 mm/d
In situ gemessene Tiefe der Verwitterungsschicht (Großversuche GV2 und GV3)	2 mm	15 mm

Unter trockenen Bedingungen mit einem Grenzfeuchtegehalt der Luft von < 32 % (Winterhalbjahr, geringe aktive Bewetterung) fällt die Verwitterungsrate auf nahezu "0" ab. Weiterhin ist in situ der Verwitterungseinfluss geringer, als sich aus den Versuchsergebnissen mit kleinen Probekörpern in der Klimakammer ableiten ließ (siehe Tabelle 2).

Da die expositionsbedingte Aktivierung sofort nach dem Aufschluss des Materials beginnt und relativ schnell abläuft, ist beim Nachschnitt von Streckenkonturen in diesen Materialien in jedem Falle mit einer verwitterten Zone im cm-Bereich zu rechnen. Eine Ausnahme hiervon bilden reine Tachyhydritlagen und extreme Tachyhydritanreichungen in denen das Mineral spätig in Form von Klasten auftritt. Hier reicht die Verwitterung erheblich tiefer in den tachyhydritreichen Zonen im Bereich des Versuchsortquerschlages am Versuchsort VO3 und des GV 1. Bei der Tachyhydritausbildung vorwiegend als klastische Einlagerungen werden Verwitterungstiefen zwischen 2 cm und 6 cm beobachtet.

Nach der anfänglichen Aktivierung der Tachyhydrit-Verwitterung kommt es zur Bildung eines Lockermaterials bzw. Schlammes auf der Konturoberfläche, das bzw. der den weiteren

Verwitterungsfortschritt deutlich hemmt. Die Ausbildung von Lockermaterial und Schlamm trat hauptsächlich in Bereichen mit Tachyhydrit-Kieserit-Mineralgefügen auf.

Im Hinblick auf die Errichtung von Abdichtungsbauwerken in horizontalen Streckenauffahrungen können für den Bereich der Grube Teutschenthal die folgenden Mineralvergesellschaftungen als besondere Schwachstellen benannt werden (s.a. Abbildung 6):

- Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen mit Mächtigkeiten im cm-Bereich (im oberen Lagerteil) und
- Tachyhydritlagen mit Mächtigkeiten im cm-Bereich in spätiger Ausbildung (im oberen Lagerteil).

Im Bereich des Versuchsortes VO1 liegen markante Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen im Streckenquerschnitt aufgeschlossen vor. Im direkten Hangendbereich oberhalb der Streckenauffahrung treten mehrere Tachyhydritlagen in spätiger Form als weitere Schwachstelle im Gebirgsverband auf. Die genannten Strukturen verlaufen mehr oder weniger parallel zur Streckenachse.

Im Bereich des Versuchsortes VO3 können verschiedene Kieserit-Tachyhydrit-Bänderstrukturen als auch spätig ausgebildete Tachyhydritlagen beobachtet werden. Allgemein hat der Versuchsort VO3 durch die in nördlicher Nachbarschaft auftretende Salzke-Depression eine stärkere tektonische Beanspruchung erfahren. Hierdurch wird der Aufbau der besonders von internen Verzahnungen und liegenden Falten gekennzeichneten Schichten bedingt, wobei die Gefügedeformationen einschließlich lokaler Übergänge zum Trümmergefüge als charakteristisch für den Versuchsort angesehen werden können.

Die Kieserit-Tachyhydrit-Vergesellschaftungen treten hier in der Regel als über weite Bereiche aushaltende Schwaden bis linsenförmige Anreicherungen auf, wobei diese Mächtigkeiten bis zu 3 m erreichen können. Spätig auftretender Tachyhydrit liegt im Bereich des VO3 in klastenartig zergliederter Ausbildung ehemals kompakter Schichtstrukturen vor. Lokale Anreicherungen dieser Komponenten sind besonders im Bereich des GV 1 und in angrenzenden Bereichen des Querschlages zu beobachten.

Als über den gesamten Versuchsort VO3 aushaltende tachyhydritführende Schichtstruktur kann der Hangendbereich der Schicht 7 angesprochen werden. Die Schicht 7 kommt als deutlich hervortretender, durchgehender Horizont mit lokalem stratigraphischem Leitcharakter zur Geltung. Das weitgehende Fehlen kompetenter Einlagerungen hat hier offensichtlich eine relativ geringe Deformation des Interngefüges ermöglicht. Der Hangendbereich der Schicht 7 weist im gesamten Bereich des VO3 eine deutliche Anreicherung von Tachyhydrit bis hin zu teilweise klastenartigen Ausbildungen auf. In ungünstiger Orientierung kann diese Schichtstruktur eine potenzielle Wegsamkeit bei der Errichtung von Abdichtungsbauwerken darstellen.

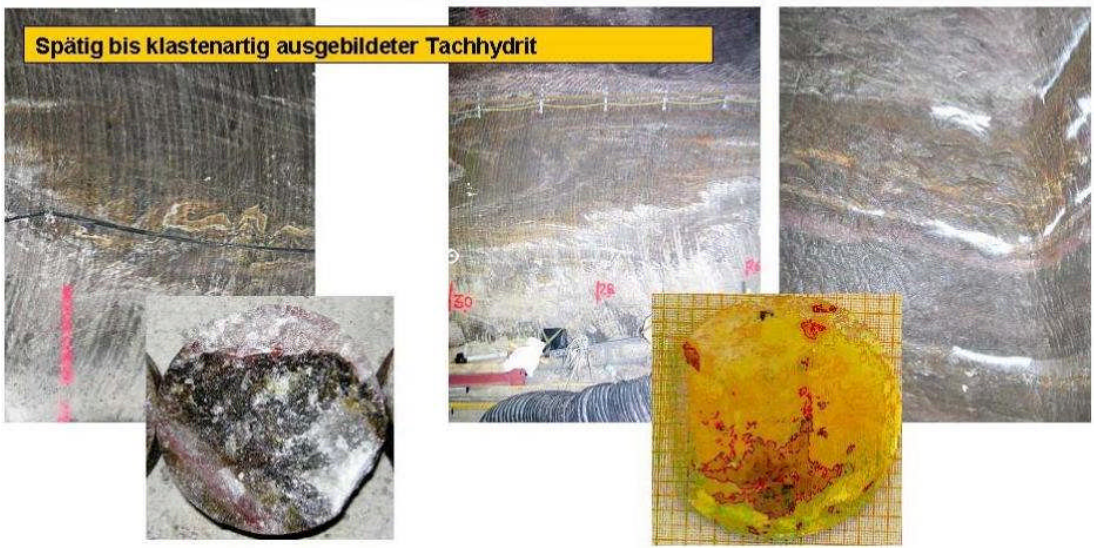

Abbildung 6: Spätig bis klastenartig ausgebildeter Tachyhydrit in den Bereichen der Schicht 7a (rechtes Bild) und in der Schicht 6 Varietät A (Bild Mitte und links), die Kernaufnahmen zeigen einen Grenzbereich zu einer aufgelösten Steinsalzbank im Bereich der Schicht 8 (links) und spätig ausgebildeten Tachyhydrit aus dem hangenden Lagerteil (rechts)

3.2 Geomechanische Eigenschaften des Carnallitits

Umfangreiche Untersuchungsergebnisse zum Festigkeits- und Dilatanzverhalten von Carnallitit sind bereits im Teil 1 des FuE-Vorhabens CARLA vorgestellt worden [17, 29]. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung wurden die Untersuchungen der geomechanischen Eigenschaften des Carnallitits auf die neuen Versuchsstandorte ausgedehnt. Dazu wurden auch am Versuchsort VO3 ein Großblock gewonnen und aus diesem die Probekörper herausgebohrt. Mit den so hergestellten Probekörpern wurden triaxiale Druckversuche mit Manteldrücken von σ_3 = 1; 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5 und 15 MPa im gesteinsmechanischen Labor des IfG durchgeführt.

Die Einzelergebnisse sind im Teilbericht TB 2, Abschnitt 6 dargestellt. Die Abbildung 7 zeigt die gemessene vertikale Bruchspannung σ_{Diff} und die Abbildung 8 den ermittelten Parameter tanβ in Abhängigkeit vom Manteldruck. Beide Parameter sind Eingangsparameter für das visko-elasto-plastische Stoffmodell nach Minkley [27].

In Abbildung 9 sind vergleichsweise die Festigkeits-Manteldruck-Abhängigkeiten für die bisher in der Grube Teutschenthal untersuchten Carnallititvarietäten zusammengestellt. Aus dieser Gegenüberstellung wird deutlich, dass der im Bereich der Begleitstrecke anstehende Carnallitit eine vergleichsweise hohe Festigkeit besitzt.

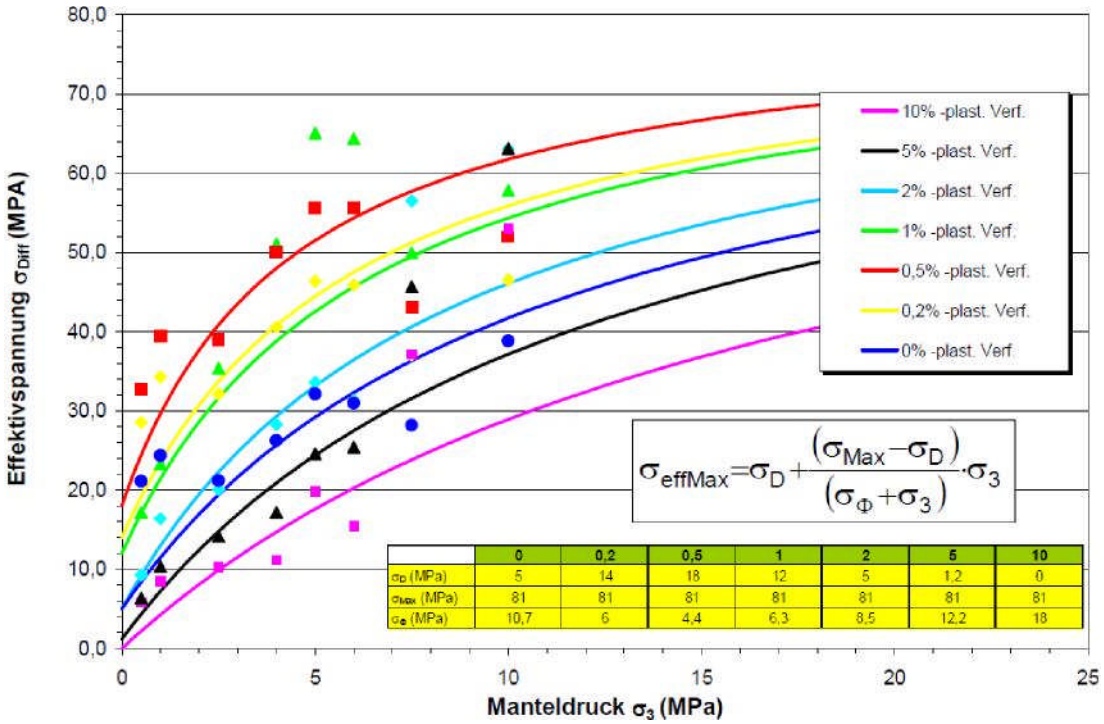

Abbildung 7: Bestimmung der Festigkeitsparameter nach dem Stoffmodell von Minkley [27]

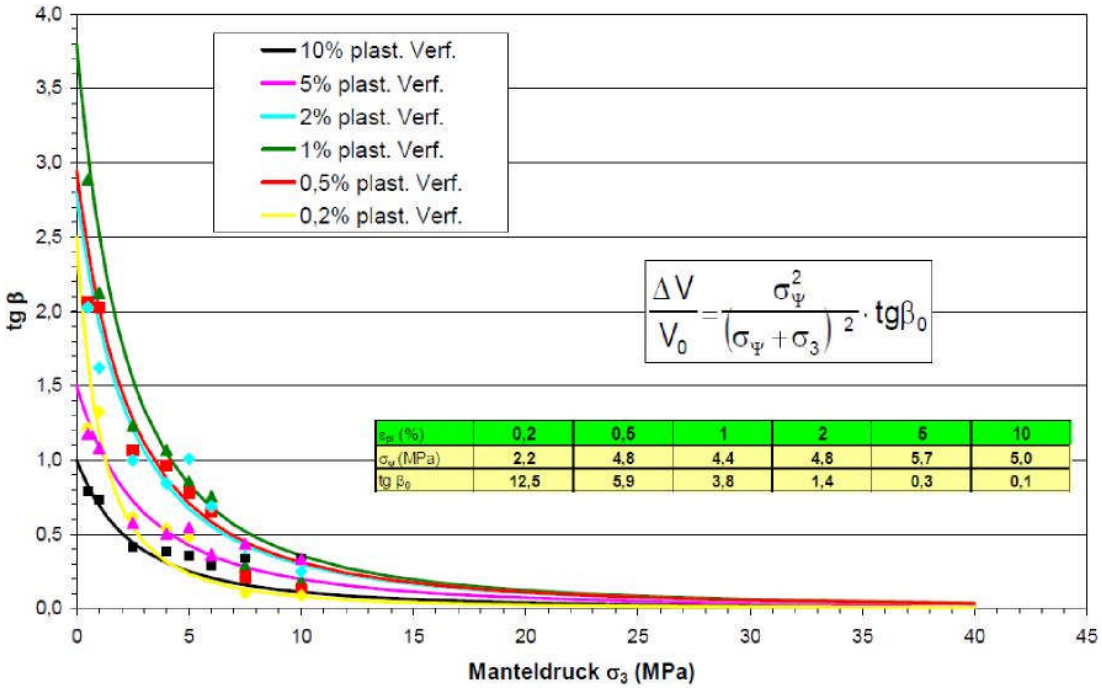

Abbildung 8: Bestimmung der Dilatanzparameter nach dem Stoffmodell von Minkley [27]

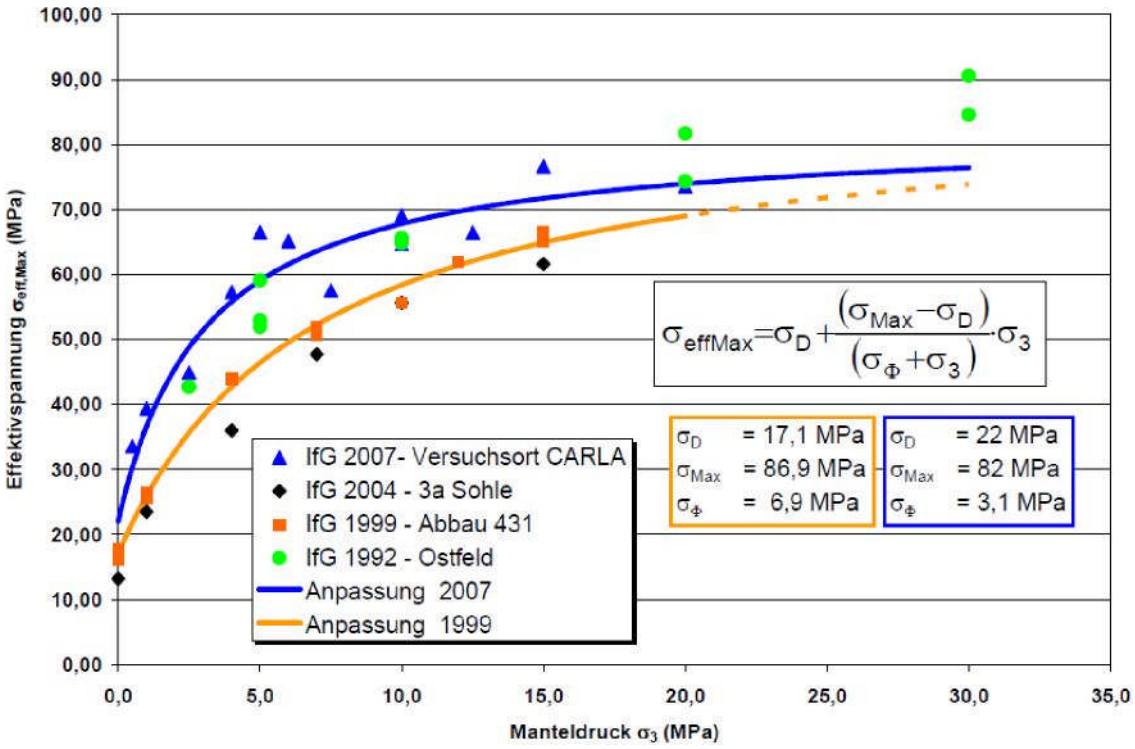

Abbildung 9: Festigkeit verschiedener Carnallititproben aus der Grube Teutschenthal

Die durchgeführten Laborversuche zeigen weiterhin, als zentrales Ergebnis, dass für den im VO3 anstehenden Carnallitit bei den numerischen Modellberechnungen Materialparameter entsprechend eines homogenen und isotropen Gesteins als hinreichende Näherung angenommen werden können.

3.3 Geohydraulische Eigenschaften des Carnallitits

Zur Bestimmung der geohydraulischen Eigenschaften des Carnallitits wurden unter den besonderen geologischen Bedingungen der Grube Teutschenthal (inhomogenes, geschichtetes, polymineralisch aufgebautes, teilweise tektonisch überprägtes Carnallititgebirge mit Vorkommen von bis zu 40 % Tachyhydrit) Bohrlochtests mit Gas (trockene Druckluft) und mit potentiell möglichen Zutrittslösungen (R-Lösung, ta-gesättigte $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung) in Bohrlöchern bei unterschiedlichen Prüfdrücken und in Abhängigkeit vom Konaturabstand sowie von der Zeit durchgeführt. Die Methodik der Permeabilitätsmessungen, insbesondere für Lösung, wurde an die aus der geologischen und mineralogischen Bedingungen des Gebirges resultierenden Besonderheiten angepasst (Prüfintervalle 0,05 m bis 5 m, Ermittlung Gas- und Lösungspermeabilität am Messpunkt, Messwiederholungen für Lösungspermeabilität bis zur Reproduzierbarkeit der Druckganglinien, Versuchszeiten von Tagen bis Monaten). Ziel der Untersuchungen war eine detaillierte Beschreibung der Permeabilität des konturnahen Gebirges und der integralen Permeabilität des unverritzten Gebirges.

Die Permeabilität des konturnahen Gebirges ist für die Konzipierung und Dimensionierung zukünftiger Verschlussbauwerke im Carnallitit eine wichtige Eingangsgröße.

Die integrale Permeabilität des unverritzten Gebirges ist eine entscheidende Kenngröße für den Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins bzw. der geologischen Barriere und für den Langzeitsicherheitsnachweis des Gesamtsystems. Sie bestimmt die Randbedingungen für die Errichtung von Verschlussbauwerken.

Eine detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse wird im Teilbericht TB 2, Abschnitt 7, gegeben. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in den nachfolgenden Abschnitten zusammengefasst.

3.3.1 Permeabilität des konturnahen Gebirges

Bei Gasdrücken unterhalb des Fracdruckes konnte kein Zusammenhang zwischen Prüfdruck und Gaspermeabilität bei einem Konturabstand bis max. 1,5 m und Prüfdrücken von bis max. 8 MPa nachgewiesen werden.

Bei Überschreiten des Fracdruckes (Verletzung des Normalspannungskriteriums) wurde eine instantane, signifikante Erhöhung der Gaspermeabilität um Größenordnungen von 2 bis 5 Zehnerpotenzen festgestellt. Die Permeabilitätserhöhung ist von dem Ausgangsniveau der Permeabilität abhängig. Ob es im Bereich unmittelbar unterhalb des Frac-Druckes bereits zu einer Permeation und in der Folge zu einer Permeabilitätserhöhung kam, kann aus den Versuchen nicht abgeleitet werden. Die pneumatisch ermittelten Frac-Drücke korrelieren gut mit den Erkenntnissen über den Zusammenhang von gebirgsmechanischen Spannungszustand und Konturabstand.

Die zeitabhängige Permeabilitätsentwicklung nach Überschreiten des Frac-Druckes und nachfolgender Entlastung des Bohrloches deutet darauf hin, dass es für den gebirgsmechanischen Einspannungszustand und die vorliegenden geochemischen Standortbedingungen nach einer Standzeit von ca. 90 Tagen zu einem Verschließen der durch den pneumatischen Frac entstandenen Wegsamkeiten kommen kann. Dabei stellte sich das gleiche Permeabilitätsniveau wie im nicht gefracten Gebirgszustand wieder ein.

Generell existiert ein Trend zur Abnahme des Permeabilitätsniveaus mit zunehmendem Konturabstand. Es konnte prinzipiell, unabhängig von der Salzart, ein geringes Permeabilitätsniveau im Bereich > 0,6 m Konturabstand festgestellt werden. Vereinzelt wurden auch höhere Permeabilitäten gemessenen. Die aus den in unterschiedlichen Bohrlochteufen mittels Gas bzw. Salzlösung an zahlreichen diskreten Messpunkten durchgeführten Pulstests abgeleiteten Permeabilitätswerte variieren zwischen 10^{-15} und 10^{-23} m^2 (siehe Abbildung 10).

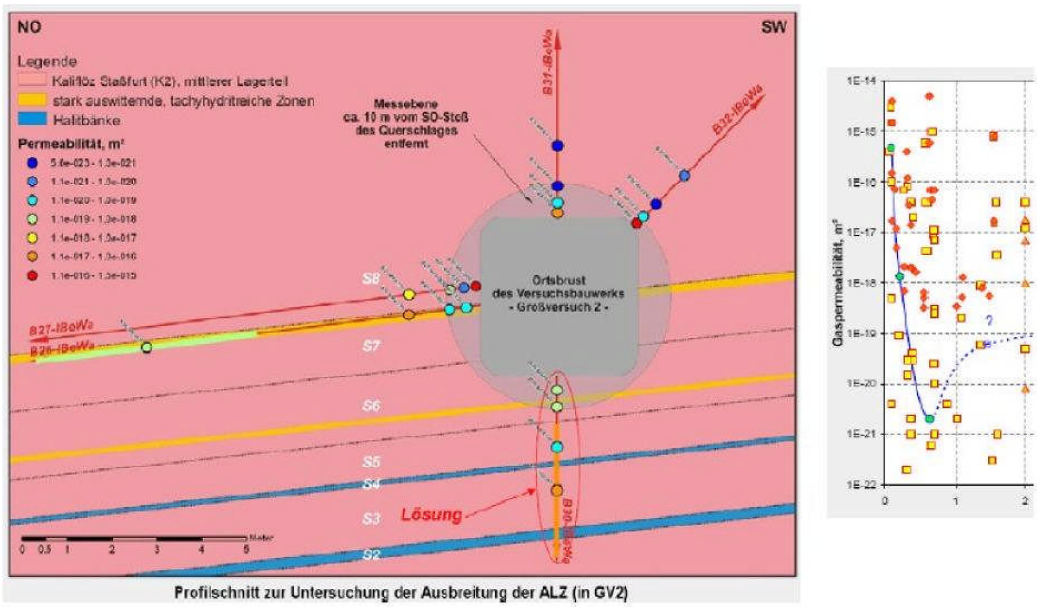

Abbildung 10: Messwerte zur räumlichen Permeabilitätsverteilung am Ort des Großversuches GV2 (VO3) und Streuung von Messwerten im konturnahen Bereich für eine Vielzahl von Einzelmessungen (rechts)

Mögliche Ursachen für die gegenüber dem unverritzten Gebirge um bis zu 7 Größenordnungen erhöhten Permeabilitätswerte sind:

- die Hohlraumnähe mit Ausbildung einer ALZ/VWZ infolge von gebirgsmechanisch induzierter Schädigung und/oder Verwitterung,
- Unterschiede der Gesteinslithologie mit schichtspezifisch variablen Kieserit-Tachyhydrit-Gehalten; Permeabilitätsanisotropie

Allerdings zeigt sich keine eindeutige Zuordnung in systematisch unterschiedliche Teufen- und Gesteinsbereiche.

Nach dem Nachschnitt der Streckenkontur kommt es zu einer Permeabilitätserhöhung. Nach den vorliegen Ergebnissen gibt es Hinweise, dass diese Permeabilitätserhöhung im Kalisalz schneller erfolgt, als im Steinsalz sowie vom Konturabstand, von der Ausgangspermeabilität und von der petrographischen Zusammensetzung abhängt.

Allerdings nimmt selbst innerhalb der VWZ die Permeabilität mit steigendem Konturabstand ab (siehe Abbildung 11). Somit ist die Reichweite der hydraulisch relevanten Konturzone standortspezifisch offenbar auf die wenigen Dezimeter der VWZ beschränkt, wobei sich in der darüber hinaus wirksamen Auflockerungszone graduell noch ein abstandsabhängiger Trend einer Abnahme der Permeabilität bis in die Größenordnung des unverritzten Gebirges ergibt.

Darüber hinaus ist aufgrund der Streuung der durchgeführten In-situ-Messungen an diskreten Messpunkten eine eindeutige Quantifizierung schichtgebundener Strömungseffekte nicht einfach möglich. Ergänzend durchgeführte Laboruntersuchungen mit unterschiedlichen Durchströmungsrichtungen weisen Sperrschichteffekte nach, die zu einer Kanalisierung der Fluidausbreitung entlang permeabler Schichten führen können.

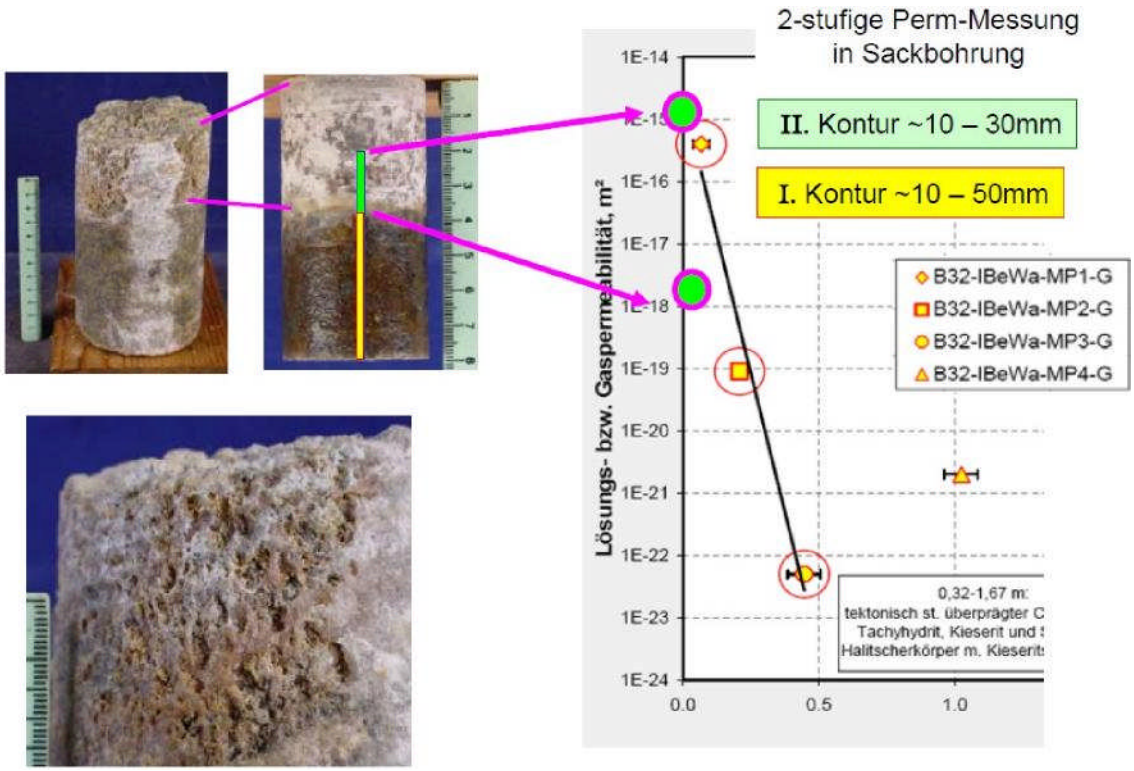

Abbildung 11: Synthese aus In-situ- und Labormessungen zur Ausdehnung der VWZ. Links: Untersuchte Kernproben mit poröser VWZ. Rechts: Abhängigkeit der Permeabilität vom Konturabstand.

3.3.2 Integral wirksame Permeabilität des unverritzten Gebirges

Zur Bewertung der Integrität des Wirtsgestein Carnallitit wurden Bohrlochversuche mit unterschiedlichen Messdauern durchgeführt. Da sich aus Messungen an diskreten Messpunkten und aus Kurzzeitmessungen im Hinblick auf das großmaßstäbliche und unverritzte Gebirgsmassiv nur ein unvollständiges Ergebnis ableiten lässt, wurde der Focus auf Langzeitversuche in langen Bohrungen gerichtet, die mit einem Fluidvolumen von ca. 20 L ein größeres Gesteinsvolumen sowie einen repräsentativen Profilausschnitt des geschichteten Gebirges erfassen [29, 30].

Diese Messungen wurden über 3 – 7 Monate in zwei ca. 21 m langen Bohrlöchern mit R-Lösung und mit ta-gesättigter $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung durchgeführt. Die dabei am Untersuchungsort bestimmte integral wirksame Lösungspermeabilität im anstehenden Gebirge war deutlich kleiner als 10^{-22} m^2. Dadurch wurde für die Versuchsbedingungen die hydraulische Dichtheit des am Messort anstehenden carnallitischen Gebirgsverbandes quantitativ nachgewiesen. Dieses Ergebnis (siehe Abbildungen 12 und 13) steht in Übereinstimmung mit dem vorliegenden allgemeinen Kenntnisstand eines dichten Salzgebirges (einschließlich unverritzter Carnallitit) und mit früheren qualitativen Erfahrungen mit Frac- und Dichtheitsuntersuchungen im Carnallitit [29, 30].

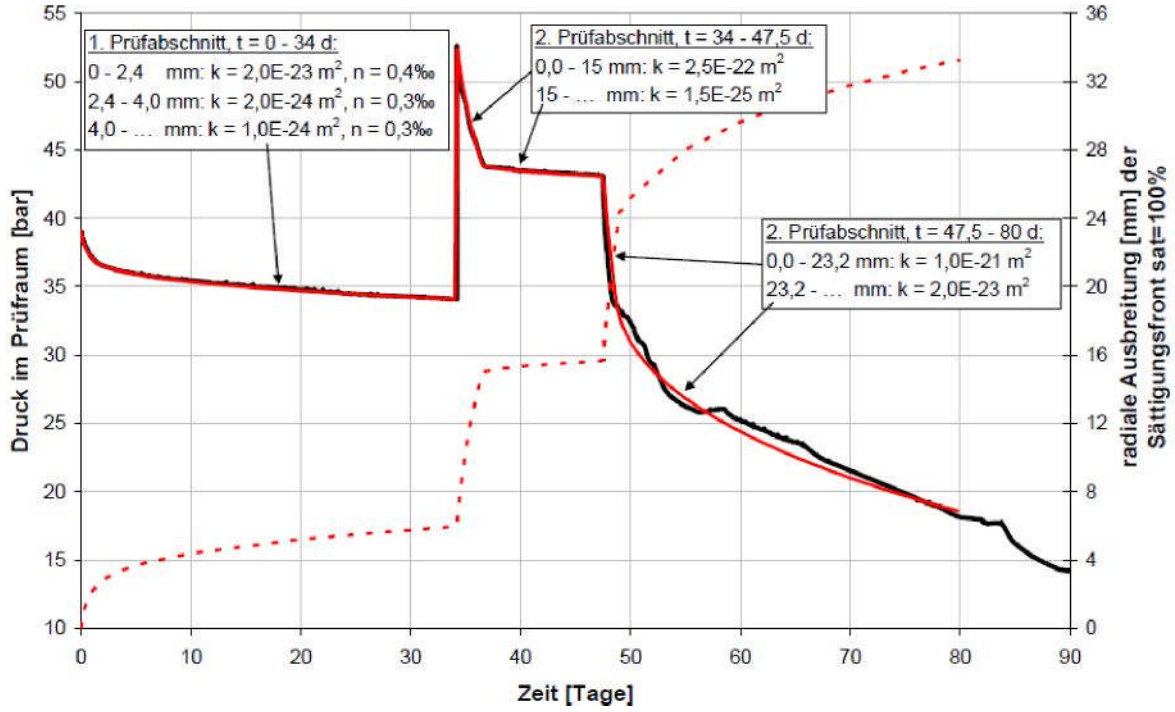

Abbildung 12: Auswertung der Messungen im Bohrloch MB1 in zwei Prüfabschnitten (aus [29, 30]).

Es wurden diskontinuierliche Druckeffekte während der Pulstests beobachtet, die auf lösungschemische Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Salzlösungen (R- bzw. tagesättigter $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung) und dem Gebirge hinweisen. Allerdings kommt es, wie die Druckmessungen zeigen, im zeitlichen Verlauf zu einem Stillstand des Lösungsprozesses, mutmaßlich infolge einer Selbstabdichtung des Gebirges oder Passivierung löslicher Komponenten (hier Kieserit) durch Gipsbildung. Die Beobachtung einer Druckkonstanz in einer als Pulstest druckbeaufschlagten Bohrung wird hier als absolute hydraulische Dichtheit interpretiert, d.h. die integral wirksame Permeabilität ist praktisch gleich 0.

Die hydraulische Eindringtiefe eines Messfluids ist wahrscheinlich aufgrund der im Porenraum des unverritzten Salzgebirges eingeschlossenen und unter lithostatischem Teufendruck stehenden Gase und Fluide auf die druckentspannte mechanische

Auflockerungs- bzw. Verwitterungszone (z.B. Saumzone des Bohrlochs) begrenzt. Dies gilt auch für die hohlraumnahen Konturbereiche. Durch die geotechnischen Untersuchungen wird eine hydraulisch relevante ALZ lokal im Bereich der Untersuchungshohlräume maximal bis in eine Ausdehnung von 1 m nachgewiesen.

Aufgrund der zu beobachtenden lösungschemischen Wechselwirkungen (z. B. inhärenter Druckanstieg auf einige bar innerhalb von Tagen bis Wochen) sind hydraulische Kurzzeittests (Dauer: zumeist wenige Tage) mit Verwendung ungesättigter Salzlösungen im leicht löslichen Salzgebirge allein nicht quantitativ belastbar. Allerdings zeigt sich auch bei kurzzeitigen Messungen nach längeren Versuchszeiten in einigen Fällen eine Druckkonstanz, die ebenfalls die integral wirksame hydraulische Dichtheit des Salzgebirges hinweist.

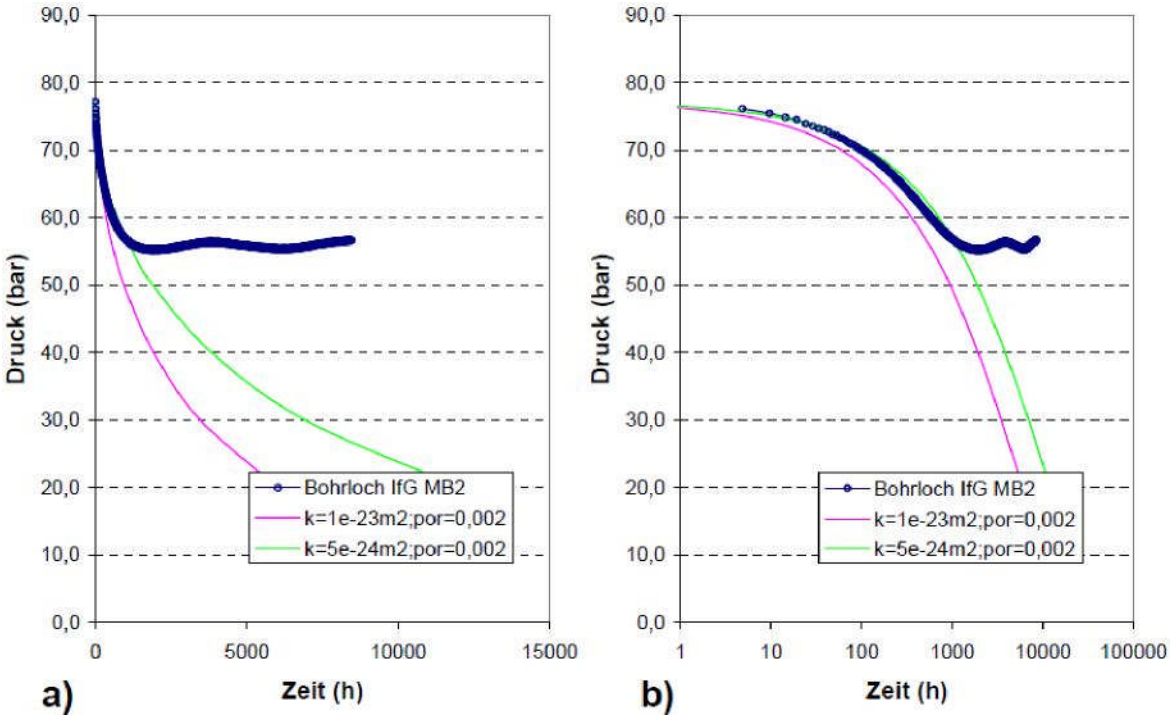

Abbildung 13: Auswertung der gemessenen Druckabfallkurven im Bohrloch MB2 (aus [29, 30]).

3.4 Bewertung der hydraulisch wirksamen Bereiches der Gebirgskontur

Das am Versuchsort anstehende carnallitische Salzgebirge ist auf der Basis der im Abschnitt 3.3 dargestellten Untersuchungsergebnisse trotz seiner vorliegenden schichtgebunden lithologischen Heterogenität (mit leicht löslichen Salzmineralen) als Fernfeld des Verschlussbauwerkes primär hydraulisch dicht und erfüllt damit die Anforderungen einer geologischen Barriere (s. Abschnitt 3.3).

Dagegen könne sich im konturnahen Hohlraumbereich infolge von Spannungsumlagerungen sowie infolge der Einwirkung von Verwitterungsprozessen durch Grubenwetter, insbesondere im leichtlöslichen Salzgebirge, potentielle Wegsamkeiten, die hier als Auflockerungs- (ALZ) und/oder Verwitterungszone (VWZ) beschrieben werden, ergeben. Darüber hinaus sind aufgrund der vertikalen Abfolge von lithologisch und hydraulisch unterschiedlichen Gesteinspartien Sperrschicht- sowie Anisotropieeffekte bei der Fluidausbreitung möglich.

Während des Verwitterungsprozesses kommt es zur Ausbildung von Poren bzw. zur Auflösung ganzer Schichtstrukturen im Gesteinsverband. Da diese expositionsbedingte Aktivierung sofort nach dem Aufschluss des Materials beginnt und relativ schnell abläuft, ist beim Nachschnitt von Streckenkonturen in diesen Materialien in jedem Falle mit einer

verwitterten Zone im cm-Bereich zu rechnen. Eine Ausnahme hiervon bilden reine Tachyhydritlagen und extreme Tachyhydritanreichungen in denen das Mineral spätig in Form von Klasten auftreten kann. Hier ist mit einem schnellerem Verlauf und mit einer erheblich tiefer reichenden Verwitterung zu rechnen.

Die Reichweite dieser hydraulisch relevanten Zone ist allerdings begrenzt. Aufgrund der Komplexität der lokalen Rahmenbedingungen sowie der wechselseitigen Überlagerung von ALZ und VWZ erfordert die Bewertung der Reichweite eine aufwändige Mess- und Untersuchungsmethodik, wie sie am Standort auch eingesetzt wurde. In Abbildung 14 sind die Ergebnisse zur Reichweite der hydraulisch relevanten Konturzone, wie sie mit unterschiedlichen Verfahren oder Indikatoren bestimmt wurden, schematisch als Parametervariation mit zunehmendem Abstand zur Kontur dargestellt. Die Bestimmung der Ausdehnung der hydraulisch relevanten Zone, die sich aus der Überlagerung von VWZ und ALZ zusammensetzt, ergibt sich jeweils über eine Unstetigkeit in der teufenabhängigen Variation des gemessenen Parameters (s.a. [29, 30]).

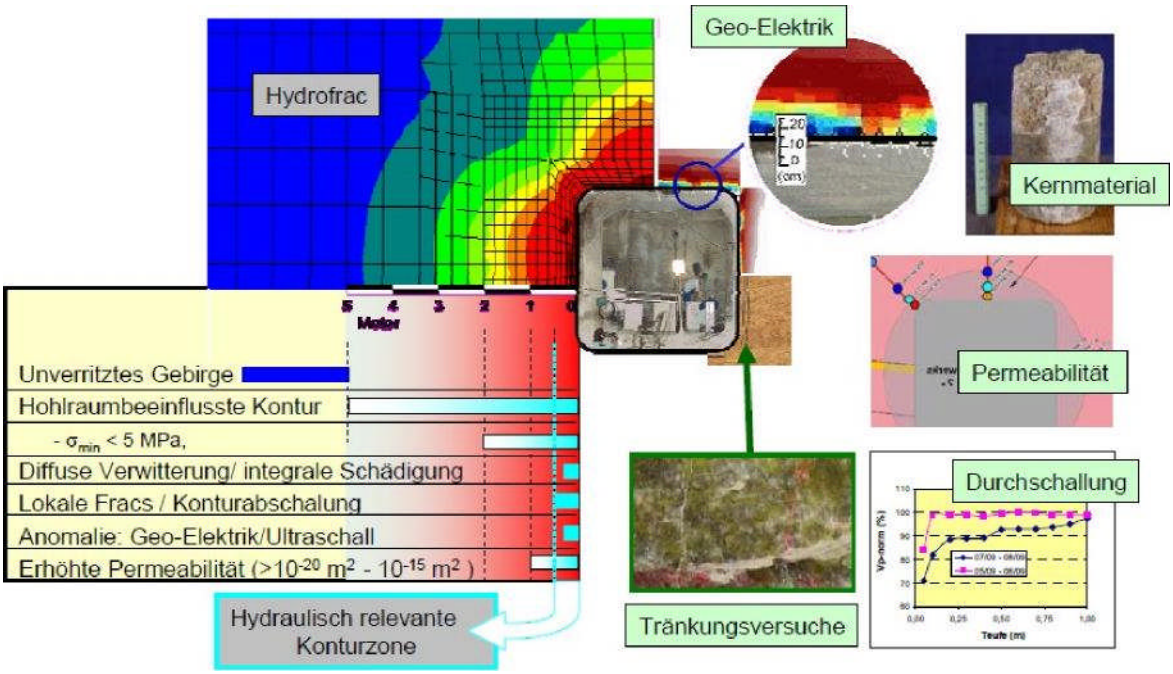

Abbildung 14: Reichweite der hydraulischen Konturzone im leicht löslichen Salzgebirge auf Basis eines interdisziplinären geotechnischen Multi-Methoden-Erkundungsprogramms [29, 30]; (s.a. Abbildung 2).

Die Einzelergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

- Die Reichweite der hohlraumbeeinflussten, druckentspannten Zone beträgt nach Hydrofracmessungen ca. 5 m = **EdZ** („excavated disturbed zone“)
- Die Ausdehnung der Zone mit signifikant reduzierten Gebirgsspannungen (σ_{min} < 5 MPa), d.h. der aus geomechanischer Sicht relevante Konturbereich, in dem infolge mechanischer Auflockerung eine signifikante Zunahme der Permeabilität infolge dilatanzinduzierter Schädigung möglich ist, umfasst ca. 1 m = **EDZ** („excavated damaged zone“).
- Die aus Pulstests (Dauer: ca. 1 d) für unterschiedliche Bohrlochteufen mittels diskreter Punktmessungen abgeleiteten Permeabilitätswerte variieren zwischen 10^{-15} und 10^{-23} m^2. Als Trend ergibt sich eine Permeabilitätsabnahme innerhalb des ersten Konturmeters bis

auf Messwerte zumeist deutlich kleiner 10^{-20} m^2. Allerdings zeigt sich keine eindeutige Zuordnung zu systematisch unterschiedlichen Teufen- und Gesteinsbereichen.

- Das phänomenologische Erscheinungsbild der aufgelockerten und verwitterten Zone am VO3 ist gegenüber den Vorergebnissen am VO1 [17, 29] deutlich moderater ausgebildet, wobei aufgrund des visuellen Konturbefundes und auf Basis der geophysikalischen Messungen die verwitterte Zone dominiert:
  - Die verwitterte Zone (**VWZ**) stellt als „Lochfraß"-Zone eine prominente Wegsamkeit im dm-Bereich dar. Diskrete Laboruntersuchungen an Kernstücken weisen eine Permeabilität zwischen 10^{-15} m^2 und 10^{-18} m^2 nach. Dies deckt sich mit den In-situ-Messungen an diskreten Messpunkten im konturnahen Bereich.
  - Als indirekte Hinweise zur Bestimmung der Reichweite der hydraulisch relevanten Konturzone liegen vor:
    - Geoelektrische Tomografie: Zone mit signifikant reduzierten Gesteinswiderständen, wie sie vorzugsweise für makroskopisch erkennbare Kieserit-Tachyhydrit-Einschaltungen mit Verwitterungserscheinungen auftreten. Allerdings ist die Größenordnung dieser Widerstandsanomalien mit $\rho \leq 1000$ Ωm im Unterschied zu den bereits vorliegenden Ergebnissen am Versuchsort VO1 [17] nur klein, was bedeutet, dass die Durchfeuchtung und somit auch die die Reichweite dieser Prozesse geringer ist: Ihre Ausdehnung beträgt wenige Dezimeter.
    - Ultraschall-„Crosshole"-Messungen: konturnahe "Niedriggeschwindigkeitszone" im Bereich von maximal 20 cm.
    - Rückbau am Großversuch GV3 (s. TB 7): Die Trocknung von definiert aus der Konturzone entnommenen Gesteinsproben weist erhöhte Lösungsgehalte nur im Bereich der offenbar durchströmten Kontaktfuge/VWZ aus, d. h. die Fluidausbreitung erfolgte offensichtlich nicht generell über schichtartige Wegsamkeiten im Gebirge sondern bevorzugt unmittelbar über Wegsamkeiten in der porösen Verwitterungssaumzone.
    - Diskrete Wegsamkeiten infolge mechanischer Schwächezonen (konturparallele Risse) mit schaligen Ablösungen im Nahfeld wurden nur in exponierten Konturbereichen (z.B. Stoßecken) beobachtet: Ausdehnung < 1 m (je nach Konturgeometrie) – sie stellen potentielle diskrete Wegsamkeiten im Nahbereich des Verschlussbauwerkes dar → hydraulische Gebirgsanisotropie
    - Vereinzelt wurden hydraulische Kurzschlüsse zwischen benachbarten Bohrlöchern nach Druckaufbautests beobachtet (Möglichkeit der lokalen Frac-Ausbildung).

Insgesamt liegt im Bereich der Versuchsorte wiederum eine komplexe ALZ vor, wobei die mutmaßlich hydraulisch relevante Verwitterungszone (VWZ) Teil der mechanisch induzierten ALZ (EdZ) ist. Die ALZ, wie sie sich in der Parametervariation der verschiedenen geotechnischen Parameter abbildet, ist hinsichtlich ihrer Phänomenologie qualitativ vergleichbar mit den Vorergebnissen am Versuchsort VO1 [17, 29] (siehe auch Abbildung 2). Die Reichweite einer mechanisch geschädigten Zone, in der eine dilatanzinduzierte Permeabilität auftreten kann, wird hier mit max. 1 Meter eingeschätzt [29]. Sie ist damit trotz des größeren und rechteckigen Querschnitts am VO3 signifikant kleiner, was insbesondere aus der geringere Standzeit der Strecken (< 3 Jahre), der höheren Gesteinsfestigkeit sowie der großzügigen Pfeilerquerschnitte resultiert.

Als hydraulisch relevant wird deshalb hauptsächlich die konturnahe, verwitterte Zone (VWZ) eingeschätzt.

4. Materialien der Dammbauwerke

Im Teil 1 des Forschungsvorhabens [17] wurde herausgearbeitet, dass das Hauptmaterial des Abdichtbauwerkes im leichtlöslichen Carnallitit des Typs CaT ein Magnesiumbeton sein wird. Mit diesem Material kann die Forderung, dass das Abdichtbauwerk in seinen wesentlichen Teilen ein steifes Bauwerk darstellt, das möglichst schnell die Gebirgsbelastungen auf sich zieht und dadurch zur Rückbildung der ALZ führt, erfüllt werden. Zugleich bietet das Material MgO-Beton bei Erfüllung bestimmter Voraussetzungen die Möglichkeit, ein thermodynamisch und mechanisch langzeitstabiles Bauwerk zu schaffen, das sich technologisch auch in der erforderlichen Größe herstellen lässt.

Zunächst wurde im Ergebnis der Rezepturentwicklung im Rahmen des Teils 1 des Vorhabens [17] die Rezeptur MB6 als Ausgangsrezeptur der Rezepturweiterentwicklung für den Einsatz unter in situ Bedingungen untersucht. Weiterführende Untersuchungen im Vorhaben, über die ausführlich in [18] berichtet wurde, führten auf die Rezeptur MB10. Diese die neue Ausgangsrezeptur für sämtliche nachfolgenden chemischen, thermodynamischen, bautechnischen und geomechanischen Untersuchungen wurde und auch das Hauptbaumaterial in den nachfolgend noch beschriebenen Großversuchen für das zu entwickelnde Grundkonzept behandelt.

Weitere wesentliche Materialien, mit denen die Forderungen nach Redundanz und Diversität der Elemente des gesamten Abdichtbauwerkes erfüllt werden können, sind die Baustoffe Asphalt und weitere geeignete Baustoffe für Hilfskonstruktionen wie Widerlager und kleinere konstruktive Bauelemente zur Realisierung technologischer Anforderungen. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse und Eigenschaften der Hauptmaterialien MgO-Beton und Asphalt zusammenfassend dargelegt. Die weiteren Baumaterialien werden im Zusammenhang mit den jeweiligen Funktionselementen behandelt.

Einen Sonderfall stellen die Baustoffe für Vorbauelemente und für die nur zeitlich begrenzt wirksamen Abdichtbauwerke dar. Diese Materialien werden ebenfalls im Zusammenhang mit den genannten Zusatzbauwerken (Abschnitte 7 und 9) dargestellt.

4.1 MgO-Beton

Ein Hauptergebnis der Untersuchungen aus dem Teil 1 des FuE-Vorhabens CARLA [17] ist die Entwicklung der Rezeptur MB6 für den Einsatz als Baumaterial für die hauptsächlichen Dammkörper. Für die Bedingungen im Carnallitit wurde die Rezeptur an R-Lösung als Anmachflüssigkeit angepasst. Dabei handelt es sich um eine Weiterentwicklung des klassischen MgO-Betons, die von folgenden Prämissen ausgeht:

- Langjährige positive Erfahrungen mit MgO-Baustoffen im Kalibergbau.
- Das Molverhältnis MgO/Mg^{2+} soll mindestens bei 5 liegen. Ist dieses Verhältnis kleiner (MgO Mangel bzw. $MgCl_2$ Überschuss) zeigt das Bindemittel ein instabiles Verhalten, das vor allem durch Hygroskopie und Festigkeitsverlust gekennzeichnet ist. Deshalb ist ein MgO Überschuss mit Molverhältnissen MgO/Mg^{2+} von 6 bis 8,3 vorteilhaft.
- Als Gesteinskörnung wird Quarzsand favorisiert (Menge zwischen 3 und 12 kg Zuschlag je kg MgO). Hartgesteinszuschlag führt zu einer höheren Festigkeit (Maßstab: einachsige Druckfestigkeit) und einer erheblich verringerten Kriechrate als Salzzuschlag.

Nachfolgende Arbeiten waren auf die Anpassung des Materials an die Einbautechnologie, deren Erprobung und die Untersuchung der erreichten Baustoffparameter ausgerichtet. Zwischenergebnisse zur Weiterentwicklung des MgO-Betons als Baumaterial für ein geringpermeables Widerlager sind im Bericht zum 1. Meilenstein [18] dokumentiert. Das Ergebnis dieser Arbeiten ist eine optimierte Rezeptur für die Ortbetonbauweise mit der Bezeichnung MB10.

Dazu wurde wesentliches bautechnisches Know-how entwickelt, das nicht nur die Voraussetzung für die Realisierbarkeit zukünftiger Verschlusselemente ist, sondern auch die Entwicklung reproduzierbarer Qualitätssicherungsmaßnahmen ermöglichte.

Neue wissenschaftliche Fragestellungen ergaben sich infolge der im laufenden FuE-Vorhaben CARLA erstmals festgestellten Probleme hinsichtlich der Beständigkeit des vorliegenden MgO-Betons im Kontakt mit Ca^{2+}-haltigen Lösungen. Betonproben nach der Rezeptur MB10, die in eine tachyhydritgeättigte $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung eingelagert wurden, zeigten mit der Zeit Volumenvergrößerungen, die zu einer Desintegration des Baustoffs und zu einer Festigkeitsabnahme führten. Dies ist auf die in der Rezeptur MB10 (und auch in praktisch allen bisher eingesetzten MgO-Betonrezepturen) vorhandene 5-1-8 Bindemittelphase zurückzuführen. MgO-Beton mit 5-1-8-Bindemittelphase ist thermodynamisch nicht langzeitstabil, sondern nur metastabil. Aufgrund der nicht vorhandenen Langzeitstabilität von MgO-Beton aus 5-1-8 Bindemittelphase und der erheblichen Bedeutung der Langzeitstabilität von MgO-Beton bei Dichtelementen wurden zusätzliche Materialuntersuchungen in das Vorhaben CARLA integriert und dieses Vorhaben erweitert. Ein Ergebnis dieser weiterführenden Untersuchungen ist die Entwicklung von MgO-Betonrezepturen auf Basis der thermodynamisch stabilen 3-1-8-Bindemittelphase. Dies stellte eine sehr komplizierte Aufgabe dar, da die neuen Rezepturen ein Molverhältnis MgO/Mg^{2+} = 3 erfordern und damit bisherigen Regeln und Erfahrungen (siehe oben) widersprachen.

Die nachfolgenden Abschnitte fassen die Ergebnisse der Materialuntersuchungen zu beiden Baustoffgruppen (Basis 5-1-8 oder 3-1-8 – Bindemittelphasen) unter der Berücksichtigung der Anpassung an die Ortbeton- und die Spritzbetontechnologie zusammen. Die Detailuntersuchungen sind im Bericht zum 1. Meilenstein [18] und im TB 5.1 beschrieben.

Weiterhin wird auf die Publikationen [23, 31] zu diesem Thema verwiesen.

4.1.1 Weiterentwicklung des klassischen MgO-Betons

Der klassische MgO-Beton basiert auf der 5-1-8-Bindemittelphase [$5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$], die bei Molverhältnissen $MgO/Mg^{2+} > 5$ beim Abbinden entsteht. Deshalb wurde in der nachfolgenden Rezepturentwicklung von einem Molverhältniss MgO/Mg^{2+} von ca. 7,5 ausgegangen. Damit erreicht man hohe Festigkeiten und die Bindemittelrezeptur ist hinreichend robust gegen Schwankungen des Mg-Gehaltes der Anmachlösung im großtechnischen Einsatz.

Bei einem Molverhältnis von 7,5 können die Verarbeitungseigenschaften (z.B. Konsistenz) nur durch den Anteil und die Eigenschaften (z. B. Kornverteilung) der Gesteinskörnung beeinflusst werden. Zusätzlich ist die Aktivität und die Oberfläche des eingesetzten MgO zu beachten. Zweckmäßigerweise wird im Rahmen der Qualitätskontrolle ein normiertes Flüssigkeitsbindevermögen des MgO mit der eingesetzten R-Lösung konstant halten (siehe TB 5.1).

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften des für die Ortbetonbauweise optimierten klassischen MgO-Beton der Rezeptur MB10 [18] zeigt die Tabelle 3.

Die Messergebnisse zur Längenänderung (festgestellt in Schwindrinnen- und Schwindkegel-Versuchen) sind großen Schwankungen unterworfen und werden hauptsächlich durch das MgO-Alter und die Umgebungsfeuchte (Austrocknen von unabgedeckten Proben) bestimmt. Die sofort nach dem Abbinden gemessenen Längenänderungen (Expansion) sind höher als die nachfolgenden Längenänderungen von abgebunden Proben. Nach Lösungskontakt tritt eine mit der Zeit ansteigende Längenänderung (Expansion) ein [18].

Die Druckfestigkeit der an Luft (28 Tage bei 25 °C und 40% rel. Luftfeuchte) gelagerten MB10-Proben war eindeutig höher, als die Druckfestigkeit der MB6-Proben (80,7 MPa im Vergleich zu 65 MPa). Dem gegenüber ist der E-Modul der MB10-Proben geringer (31,6 GPa für MB10 und 38,9 GPa für MB6). Die Spaltzugfestigkeit (im Mittel 5,1 MPa nach 28

Tagen bei Lagerung bei 25 °C und 40% rel. Luftfeuchte) der MB10-Proben ist im gleichen Bereich wie für die Rezeptur MB6 (5,7 MPa) [18].

Die für die Berechnungen der Wärmeausbreitung wichtigen Kenngrößen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Abbildungen 15 und 16 dargestellt (siehe auch [18]). Die Wärmekapazität schwankt bei abgebundenen Proben der Rezeptur MB10 zwischen 1,00 J/(g·K) bei 25 °C und 1,23 J/(g·K) bei 145 °C und steigt in diesem Bereich nahezu linear an. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur von 3,5 W/(m·K) bei 25 °C auf 2,5 W/(m·K) bei 200 °C ab (siehe TB 5.1).

Tabelle 3: MgO-Beton mit 5-1-8-Rezepturansatz (MB10)

MgO-Sorte	G75 der Fa. STYROMAG mit ca. 75 % MgO-Gehalt
MgO (G75)	18,3 Masse-% (im Frischbeton)
R-Lösung	18,3 Masse-% (im Frischbeton)
Masseverhältnis G75/R-Lösung	1
Gesteinskörnung (0-8 mm)	63,4 Masse-% (im Frischbeton) (37,1% Sand 0-2 mm + 26,3% Kies 2-8 mm)
Masseverhältnis Zuschlag/G75	4,5
Ausbreitmaß (DIN 1048)	475 mm
Konsistenz (DIN 1048)	F3 (weich)
Verdichtungsmaß (DIN 1048)	1,03 Sedimentationsstabil
Rohdichte	2,24 t/m³
Längendehnung (Expansion) Einbauzustand	• Max. 0,95 mm/m nach 48 h (Schwindrinne) • 0,02 bis 0,32 mm/m an ausgehärteten Proben (frisches G75, Probe abgedeckt)
Längendehnung (Expansion) Lösungszutritt	2,75 mm/m nach 61 Tagen Lagerung in R-Lösung (nac Tagen Abbindezeit ohne Kontakt mit Lösung)
Einaxiale Druckfestigkeit	(80,7 ± 7,7) MPa (an 5 Proben nach 28 Tagen ohne Ko mit Lösung gemessen)
Statischer E-Modul	(23,8 ± 1,2) GPa nach 14 Tagen (31,6 ± 1,1) GPa nach 28 Tagen
Spaltzugfestigkeit	(5,1 ± 0,9) MPa (an 5 Proben gemessen nach 28 Tagen Kontakt mit Lösung gemessen)

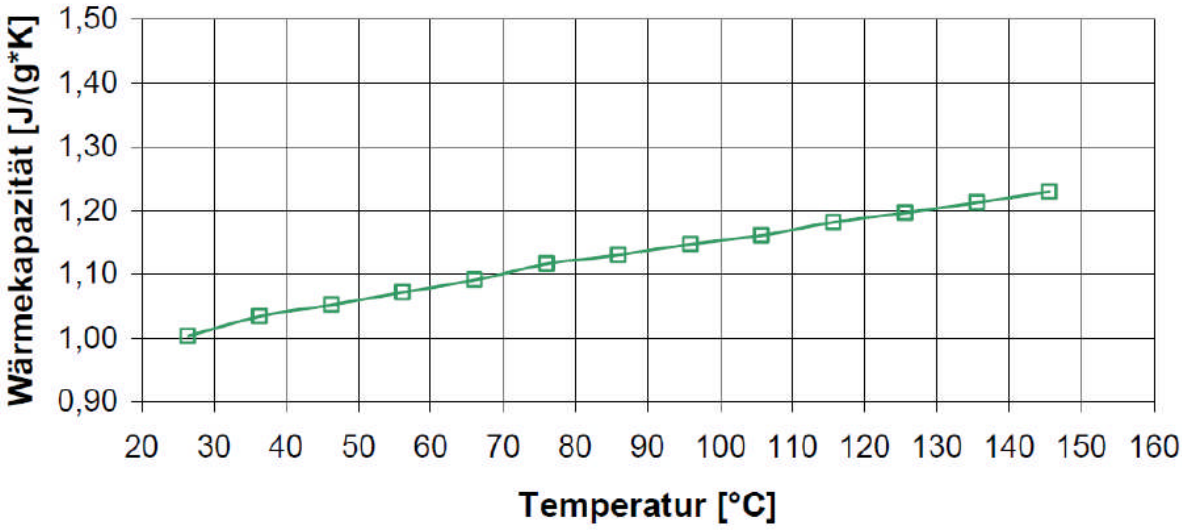

Abbildung 15: Wärmekapazität von MB10 in Abhängigkeit von der Temperatur

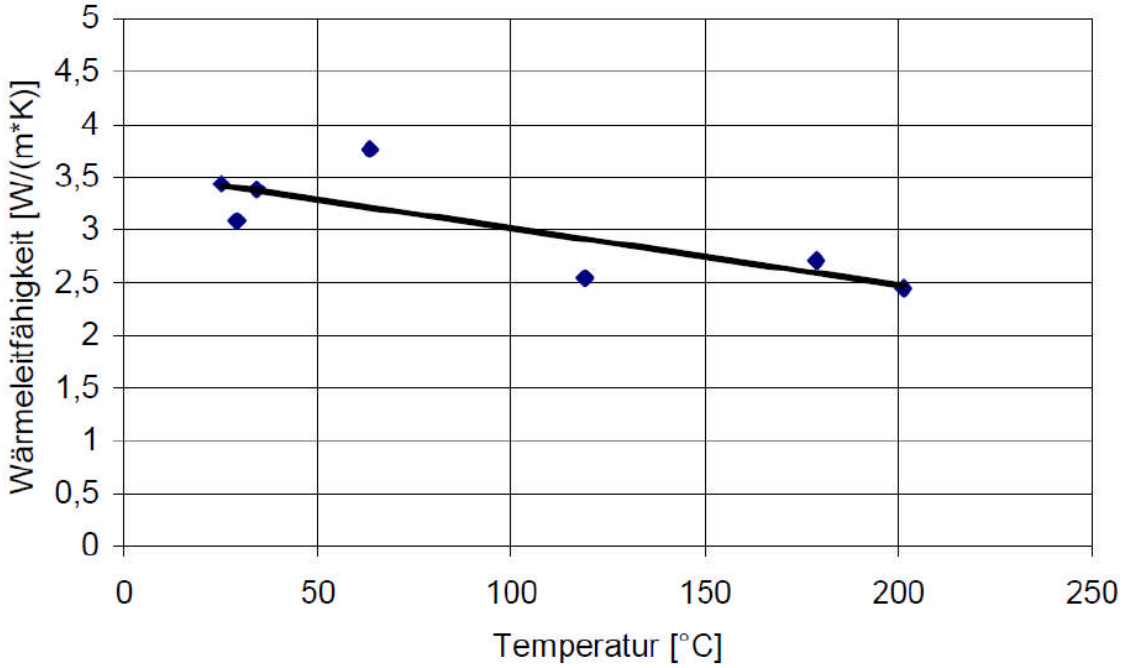

Abbildung 16: Wärmeleitfähigkeit von MB10 in Abhängigkeit von der Temperatur

4.1.2 Entwicklung eines Spritzbetons mit 5-1-8-Rezepturansatz

Auf der Basis der Erkenntnisse zur Entwicklung der Ortbetonbauweise mit MgO-Beton der Vorzugsrezeptur MB10 wurde die Materialentwicklung in Richtung einer geeigneten Spritzbetonrezeptur begonnen. Die Spritzbetonrezeptur sollte die vorteilhaften Eigenschaften des MB10 (Festigkeit) mit den Vorteilen des Spritzbetonverfahrens (gleichmäßige Entwicklung der Hydratationswärme bzw. geringere Maximaltemperaturen) vereinen.

Neben der Baustoffentwicklung mussten parallel Eignungsuntersuchungen zur Auswahl einer geeigneten Spritztechnologie (Trockenspritzen oder Nasspritzen) durchgeführt werden. Als Ergebnis von In-situ-Versuchen stellte sich heraus, dass das Trockenspritzverfahren gegenüber dem Nasspritzverfahren besonders folgende Vorteile besitzt:

- bessere Flexibilität, vor allem bei kleinen Verarbeitungsmengen,
- bessere Eignung zur Überbrückung von Spritzpausen,
- leichtere Korrekturen der Rezeptur möglich (Verhältnis Lösung/Trockenmischung).

Der letzte Punkt ist jedoch dadurch auch nachteilig, da der Anmachlösungsanteil des Spritzbetons vom jeweiligen Düsenführer individuell eingestellt wird und damit unter Umständen nicht konstant ist. Da der Anmachlösungsanteil das Molverhältnis zwischen MgO und Mg^{2+} bestimmt, hat dies Konsequenzen für die Qualität des hergestellten Spritzbetons. Die durch den Düsenführer verursachten Schwankungen des Molverhältnisses MgO/Mg^{2+} sind bei einem Spritzbeton nach dem 5-1-8-Ansatz nicht relevant, sofern die Schwankungen des Molverhältnisses zwischen 6 und 8 liegen. Dieser Toleranzbereich kann durch den Düsenführer in der Regel eingehalten werden.

Beim Nassspritzverfahren muss durch die Zusammensetzung der fertigen Suspension ein Kompromiss zwischen guter Förderfähigkeit und gleichzeitig guter Klebrigkeit bzw. Haftung des Spritzgutes an der Spritzfläche gefunden werden. Beide Anforderungen sind gegenläufig und sind ohne den Einsatz von Zusatzmitteln (Verflüssiger, Abbindebeschleuniger) praktisch nicht erreichbar. Da für das vorliegende Bindemittelsystem keine geeigneten chemischen Abbindebeschleuniger zur Verfügung standen, die in der Spritzdüse zudosiert werden konnten, ergibt sich für das Nassspritzverfahren ein entscheidender Nachteil.

Die In-situ-Versuche zum Nassspritzverfahren (s. TB 5.1) zeigten, dass entweder die Konsistenz des Frischbetons für den kontinuierlichen Aufbau einer Spritzschicht zu dünnflüssig war oder an der Grenze der Förderbarkeit in der Leitung lag. Die optimale Konsistenz ist bei diesem Verfahren ohne Zusatzmittel war nur schwer zu treffen.

Als Ergebnis der Untersuchungen wurde festgestellt, dass das Nassspritzverfahren für MgO-Beton unter den gegebenen Umständen nicht geeignet ist. Deshalb wurde in den weiteren Untersuchungen das Trockenspritzverfahren favorisiert. Erste In-situ-Tests verliefen positiv und wurden in folgenden Stufen durchgeführt:

- Handhabungsversuche zur Herstellung einer Spritzbetonschicht von ca. 1 cm Mächtigkeit auf der unmittelbar davor durch Sandstrahlen gereinigten Carnallititoberfläche.
- Nachweis der Realisierbarkeit einer Spritzbetonschicht mit einer Mächtigkeit von größer gleich 10 cm durch das Trockenspritzverfahren.

Die Rezeptur für die ersten Handhabbarkeitsversuche für eine Beschichtung der CaT-Oberfläche zum Zwecke der Konservierung mit MgO-Spritzbeton wurde aus der Ortbetonrezeptur MB10 abgeleitet. Folgende Unterschiede zwischen der Ortbetonrezeptur MB10 und der Spritzbetonrezeptur bestehen (siehe auch Tabelle 3):

- Verwendung der MgO-Sorte M93 der Firma Van Mannekus mit einem Massenanteil von 14,7 %.
- Begrenzung des Größtkorns auf 2 mm (Zuschlaganteil 67,0 %, bestehend aus 41,3 % Sand 0-2 mm und 25,7 % Sand 0,45 mm)

Die ersten Spritzbeton-Beschichtungsversuche verliefen aus verfahrenstechnischer Sicht erfolgreich. Die Haftung des MgO-Spritzbetons am Gebirgsstoß war sehr gut. Allerdings traten nach 6 Monaten hohle Bereiche unter der Spritzbetonschicht auf. Nach etwa 9 Monaten wurde ein Abschalen der Spritzbetonversiegelung vom Gebirge festgestellt. Aus diesem Grund wurde die Variante der Beschichtung der Gebirgskontur mit Spritzbeton und dem nachfolgenden Einbau von MgO-Ortbeton verworfen.

Eine weitere Rezepturentwicklung für die Realisierung einer Spritzbetonschicht von mindestens 10 cm erfolgte im Rahmen des In-situ-Versuches zum Oberflächenpacker OFP3 (s. TB 5.1). Das Größtkorn der Gesteinskörnung wurde auf ca. 4 mm erhöht und gleichzeitig

ein Gesteinsmehl als Füllermaterial eingesetzt. Die Zusammensetzung dieses Spritzbeton war wie folgt:

14,0 – 15,0 % R-Lösung

15,6 – 15,7 % MgO (M93 Mannekus)

41,5 – 42,0 % Füller (Gesteinsmehl)

28,0 – 28,3 % Quarzsand 0,1 – 3,15 mm

Für eine weitere Verbesserung, insbesondere für das Erreichen höherer Schichtstärken (> 10 cm) wurde die Kornverteilung der Gesteinskörnung optimiert, indem das Größtkorn auf 8 mm erhöht und als MgO wieder die Sorte G75 (STYROMAG) eingesetzt wurde. Die Gesteinskörnung bestand aus Quarzrundkorn 0-8 mm und einem Füller. Als Füller wurde Basaltmehl und Quarzmehl der Firma Quickmix getestet. Beide Mischungen haben eine Korngrößenverteilung nach der Fullerkurve ermöglicht.

Zielgröße für die weitere Optimierung war ein Ausbreitmaß von 25 – 35 cm. Bei einem solchen Ausbreitmaß wurden empirisch die besten Ergebnisse hinsichtlich Haftung erzielt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigt Abbildung 17.

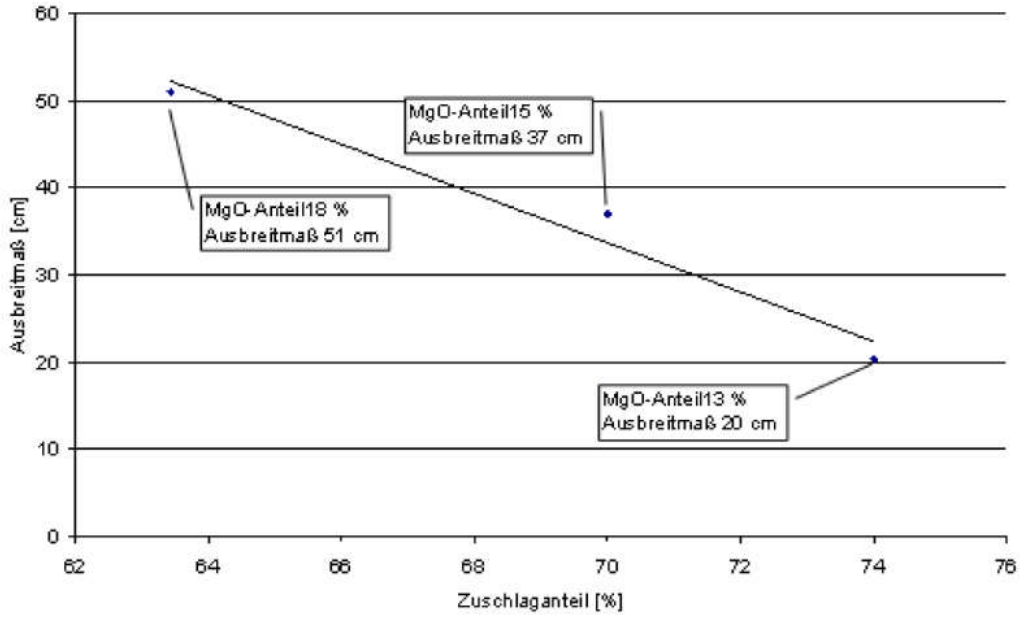

Abbildung 17: Ausbreitmaß in Abhängigkeit vom Zuschlaganteil bei einem Masseverhältnis R-Lösung/MgO = 1

Dabei wurde der Zuschlaganteil variiert und daraus bei dem vorgegebenen festen Massenverhältnisses R-Lösung/MgO von 1 der optimale Zuschlagsanteil mit den vorliegenden Gesteinskornmischungen bzw. der daraus resultierende MgO-Anteil in der Rezeptur bestimmt (siehe Abbildung 17).

Im Vergleich der beiden Füllerarten wies das Gemisch mit Quarzmehl eine bessere Formstabilität der aufgespritzten Schichten auf. Aus diesem Grunde wurde Basaltmehl als Füller für MgO-Spitzbeton verworfen. Die neue Vorzugsrezeptur QF2 setzte sich wie folgt zusammen:

15 % MgO (G75)

15 % R-Lösung

8,75 % Füller (Quarzmehl – Quickmix)

61,25 % Quarzsand 0-8 mm

Masseverhältnis Zuschlag/MgO = 4,7

Diese Rezeptur wurde mit dem Oberflächenpacker OFP8 getestet. Dabei wurden in 3 Lagen mit jeweils 15 cm Stärke ein Spritzbetonkörper (1,05 m * 3,2 m * 0,45 m) aufgebaut. Zwischen Gebirge und Spritzbeton wurde eine Maximaltemperatur von 38 °C gemessen. An Bohrkernen wurden die Gaspermeabilität, die einaxiale Druckfestigkeit σ_D und die Spaltzugfestigkeit σ_Z des aufgespritzten Lagenpaketes bestimmt.

Die Ergebnisse zeigt Abbildung 18.

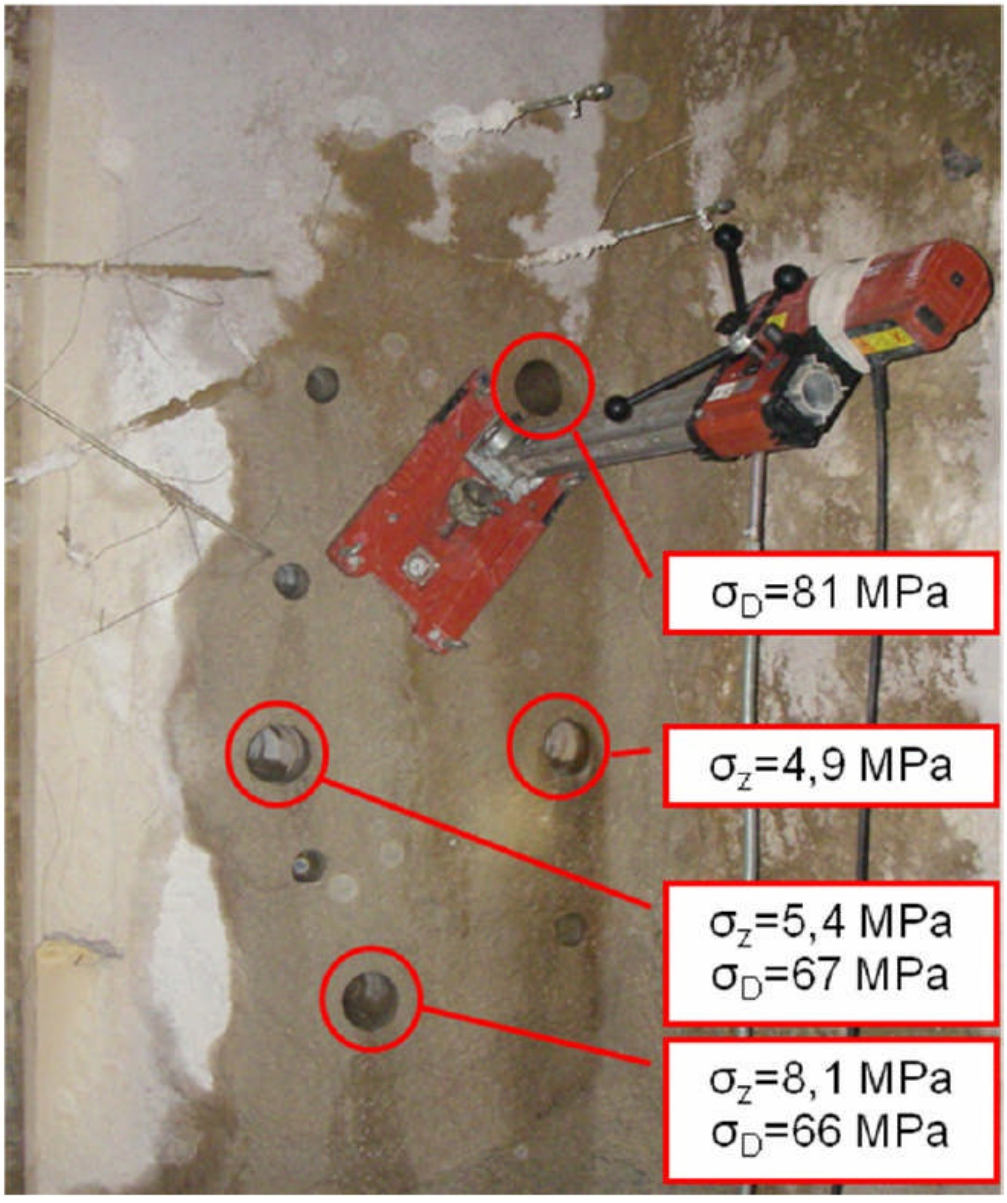

Abbildung 18: Materialparameter am Spritzbetonkörper OFP8 (auf Basis von Bohrkernen)

Die ermittelten Festigkeitswerte (σ_D = 66 bis 81 MPa; σ_Z = 4,9 bis 8,1 MPa) entsprechen den für Ortbeton (MB10) ermittelten Werten. Die an Bohrkernen ermittelten Gaspermeabilitäten lagen zwischen $3{,}7 \cdot 10^{-18}$ m² und $6{,}7 \cdot 10^{-18}$ m². Die mit gesättigter $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung gemessenen Lösungspermeabilitäten schwankten zwischen $2 \cdot 10^{-18}$ m² und

$5 \cdot 10^{-18}$ m². Die Einzelproben unterlagen jedoch im Verlauf der stationären Messungen stärkeren Schwankungen von ± 40% der gemessenen Permeabilität.

Der großtechnische Nachweis der Realisierbarkeit eines kompletten Dammkörpers in Spritzbetonbauweise erfolgte im Rahmen des Großversuches GV2. Dazu wurde ein Baustoff auf der Basis der Rezeptur QF2 weiter entwickelt (siehe Abschnitte 5 und 6).

4.1.3 Verhalten der 5-1-8-Bindemittelphase bei Kontakt mit Lösung

Nach dem Wissensstand zu Beginn des Forschungsvorhabens galt MgO-Beton als langzeitstabil gegenüber gesättigten $MgCl_2$-Lösungen [17]. Nach neuen Erkenntnissen muss die 5-1-8-Bindemittelphase als metastabil betrachtet werden [7,8]. Dies hat entsprechende Konsequenzen, da bei allen technisch relevanten Baustoffrezepturen für MgO-Beton aufgrund des empfohlenen Molverhältnisses MgO/Mg^{2+} von größer 5 [17] die 5-1-8-Bindemittelphase und eines MgO-Überschusses beim Abbinden gebildet wird. .

Erste Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen der 5-1-8-Bindemittelphase und Zutrittslösungen wurden im Jahre 2006 festgestellt. Für den großtechnischen Test der Betontechnologie wurde bei einem Projekt außerhalb des Forschungsvorhabens CARLA von der GTS mit der neuen MgO-Ortbetonrezeptur MB10 (siehe Tabelle 3) ein Fundament und Teile einer Fahrbahn errichtet. In der Nähe der Fahrbahn befand sich eine Laugenzutrittsstelle. Die Lauge wurde mit einer Pumpe kontinuierlich abgepumpt. Infolge eines Pumpenausfalls kam es am Einbauort der Fahrbahn wenige Wochen nach Fertigstellung der Fahrbahn zu einem kurzzeitigen Überfluten der Fahrbahn mit einer Lösung, die 62,14 g/l $CaCl_2$, 327,76 g/l $MgCl_2$, 13,81 g/l KCl und 12,81 g/l NaCl enthielt. Infolge dessen kam es wenige Tage nach Abpumpen der Überflutungslösung aus dem Fahrbahnbereich zu Hebungen der Fahrbahnplatten und Schädigungen am MgO-Beton. Diese Prozesse wurden im Labor reproduziert (s. TB 5.1).

Die Volumenvergrößerung und die damit verbundene Entfestigung der nicht allseitig eingespannten Fahrbahnplatten beruhen auf der Umwandlung der 5-1-8-Bindemittelphase in die 3-1-8-Bindemittelphase, wie sich im Nachhinein herausstellte.. Allerdings wurden in den umfangreichen Laboruntersuchungen unterschiedliche Reaktionen beobachtet. Beispiels-weise wurden an Probekörpern der Rezeptur MB6 im Kontakt mit R-Lösung auch nach nunmehr 7 Jahren keine Schädigungen festgestellt.

Aufgrund dieser komplexen Phänomene wurde der Frage der Wechselwirkung von MgO-Beton mit möglichen Zutrittslösungen eine erhöhte Beachtung geschenkt und ein umfangreiches Untersuchungsprogramm umgesetzt (s. TB 5.1 und TB 5.2). Dabei wurden vor allem Wechselwirkungen mit einer tachyhydritgesättigten $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung untersucht, da im Falle zukünftiger Verschlussbauwerke diese Lösung in direkten Kontakt mit dem MgO-Beton treten kann.

Aus den bisher vorliegenden Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

(1) Der Gehalt an Ca^{2+}-Ionen in der Zutrittslösung beschleunigt die Umwandlungsreaktionen im MgO-Beton von Phase 5-1-8 in Phase 3-1-8. Dies führt zu einer Desintegration/Entfestigung des Baustoffes. Möglicherweise spielt dabei ein hoher CaO-Gehalt im MgO und eventuell ein hoher Ca^{2+}-Gehalt in der Anmachlösung (für R-Lösung praktisch nicht zutreffend) noch eine ungünstige Rolle.

(2) Mit zunehmendem Alter des MgO-Betons (Reifezeit ohne Lösungskontakt) sinkt die Umwandlungsgeschwindigkeit der 5-1-8-Bindemittelphase im Kontakt mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung. Die Reifezeit ist die Zeit zwischen dem Abbinden des MgO-Betons und dem Kontakt mit jeder Art von Lösung.

(3) Die Umwandlungsgeschwindigkeit der 5-1-8-Bindemittelphase im Kontakt mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung in die 3-1-8-Bindemittelphase verringert sich bei Einspannung der MgO-Betonproben – auch bei Einlagerung unter äußerem Flüssigkeitsdruck.

Aufgrund des metastabilen Charakters der 5-1-8-Bindemittelphase und der damit verbundenen langsamen ablaufenden, aber lange andauernden Wechselwirkungen zwischen (5-1-8-)MgO-Beton mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung ist ein Nachweis der thermodynamischen Langzeitstabilität für einen MgO-Beton auf der Basis der 5-1-8-Phase nicht möglich. Allerdings kann bei niedrigen Umwandlungsgeschwindigkeiten (bei langer Reifezeit und damit spätem Lösungszutritt und bei allseitiger Einspannung des Bauwerkes) MgO-Beton auf Basis der 5-1-8-Phase auch eingesetzt werden, wenn sich dabei entsprechende Vorteile gegenüber Baustoffen auf Basis der 3-1-8-Bindemittelphase bieten. In diesem Fall ist eine Prognose der Umwandlungszeit erforderlich.

Über das Festigkeitsverhalten von 3-1-8-MgO-Beton, der sich unter bestimmten Bedingungen (Reifezeit, Größe der Einspannung, usw.) über einen sehr langen Zeitraum aus 5-1-8-MgO-Beton entwickelt hat, liegen derzeit noch keine abschließenden Erkenntnisse vor.

4.1.4 MgO-Beton auf der Basis der 3-1-8-Bindemittelphase

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Probleme mit der Langzeitstabilität des auf der 5-1-8-Bindemittelphase basierenden MgO-Betons wurden Rezepturen für MgO-Beton entwickelt, dessen Bindemittelphase ausschließlich aus der 3-1-8-Phase besteht. Dabei soll ein Molverhältnis MgO/Mg^{2+}:H_2O von 3:1:11 eingehalten werden [7,8].

Bei diesem Molverhältnis erhält man Grundrezepturen mit geringeren MgO-Anteilen. Dies führt im Vergleich mit dem 5-1-8-MgO-Beton zu einer flüssigeren Konsistenz und sogar zu Sedimetationserscheinungen in der Bindemittelphase. Die Aufgabe für die Rezepturentwicklung eines MgO-Betons mit 3-1-8-Bindemittelphase (dieser wird erhalten bei einem 3:1:11-Ansatz für den Frischbeton) bestand deshalb in der Anpassung der Frischbetonkonsistenz und dem Erreichen einer ausreichenden Sedimentationsstabilität des Frischbetons unter Zuhilfenahme geeigneter Feinstkornkomponenten. Dabei wurden sowohl artfremde Stoffkomponenten (Gesteinsmehl und Mikrosilica) als auch arteigene Stoffkomponenten auf Basis des Bindemittelsystems (MgO, $MgCl_2$ und H_2O) getestet.

Für die Rezepturentwicklung wurden folgende Komponenten getestet:

- Basaltfiller (Gesteinsmehl)
- Microsilica (silica fume)
- Auf < 250 µm gemahlene 3-1-8-Bindemittelphase
- Auf < 250 µm gemahlene und 7 Tage bei 50 °C temperierte 3-1-8-Bindemittelphase

Von den artfremden Zusatzkomponenten sind Mikrosilica vorteilhafter als Basaltfiller. Nachteile des Basaltfillers sind die erforderliche hohe Zugabemenge von ca. 13 bis 14% und die nicht normierte Zusammensetzung des Gesteinsmehles.

Der Keimbildner (auf < 250 µm gemahlene 3-1-8-Bindemittelphase) wurde aus MgO der Fa. Magnesia (Sorte 2923) und 5 molaler $MgCl_2$-Lösung hergestellt. Der gewählte Rezepturansatz lautete 1000 g MgO + 3050 g $MgCl_2$-Lösung. Die Abbindetemperatur betrug 25 °C. Das Ergebnis der Phasenanalyse ergab, dass die Bindemittelprobe aus der kristallisierten 3-1-8-Phase bestand. Beim Mahlen des arteigenen Keimbildners traten jedoch Probleme (Verklumpen, Hygroskopie) auf. Diese wurden durch den Einsatz der Nassmahlung in R-Lösung gelöst. Je nach Feststoffkonzentration erhält man pastöse Keimbildnersuspensionen unterschiedlicher Konsistenz.

Durch eine Zugabe von 16% Keimbildner zum MgO-Binderleim wurde eine deutliche Verringerung der Erstarrungszeit (Erstarrungsbeginn nach 195 min) erreicht. Ziel der Zugabe war es, mit einer arteigenen Mehlkornkomponente eine ähnliche Konsistenz des 3-1-8-Frischbetons wie beim 5-1-8-Spritzbeton des Großversuches GV2 (siehe TB 5.1) zu erreichen. Das Erreichen dieser Zielkonsistenz wurde durch Untersuchungen im Rheometer

festgestellt (siehe Abbildung 19). Die Sedimentationsstabilität der Bindemittelsuspension wurde bereits bei einem Anteil von 10 Masse-% Keimbildner erreicht. Dabei wurden keine Unterschiede zwischen den temperierten und den nicht temperierten Keimbildnern festgestellt.

An Bindemittelproben wurde der Einfluss des Keimbildners auf die einaxiale Druckfestigkeit untersucht. Sie beträgt für die Rezeptur ohne Zusatzkomponenten im Mittel 15 MPa (Werte zwischen 14,2 MPa und 16,1 MPa). Für die Rezepturen mit arteigenem Keimbildner wurde eine mittlere einaxiale Druckfestigkeit von 25,6 MPa bestimmt. Dabei ist kein Unterschied zwischen den Proben mit temperiertem (Werte zwischen 18,1 und 30,4 MPa) und nicht temperiertem Keimbildner (Werte zwischen 10,7 und 28,8 MPa) ableitbar. Allerdings schwanken in beiden Fällen die Einzelwerte sehr stark.

Im Ergebnis der Untersuchungen wurden zwei Vorzugsrezepturen für Ortbeton mit dem 3-1-8-Bindemittelphase im Feststoff (d.h. mit einem 3-1-11-Rezepturansatz) entwickelt. Eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 4. Im Ergebnis der Untersuchungen wurden zwei Vorzugsrezepturen für Ortbeton mit dem 3-1-8-Ansatz entwickelt. Eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 4.

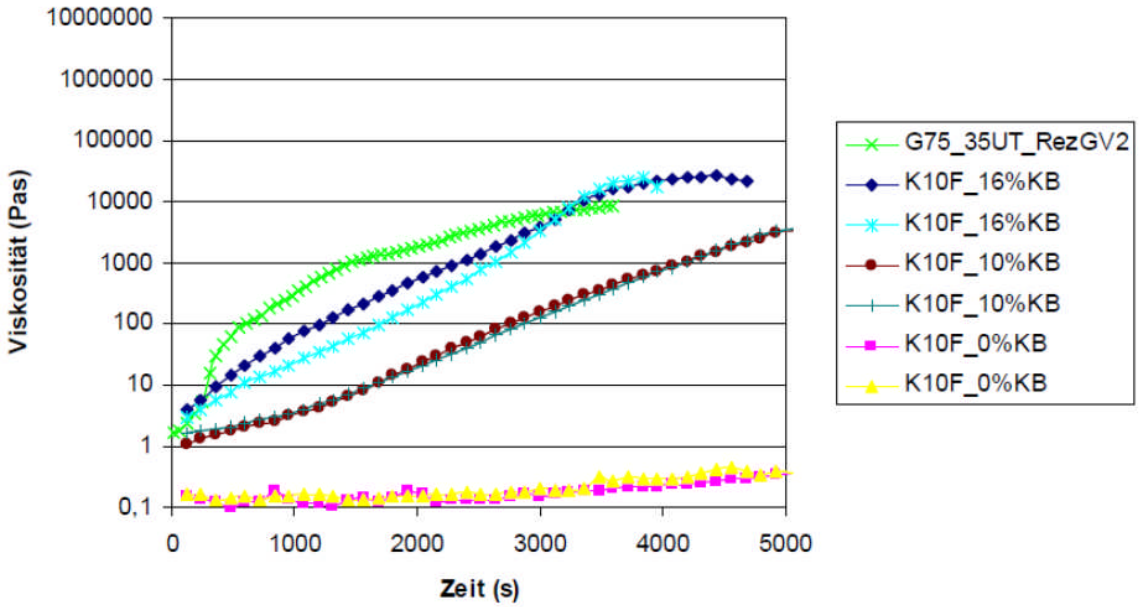

Abbildung 19: Einfluss des Massenanteils des Keimbildners auf die Viskosität

Tabelle 4: MgO-Beton mit 3-1-8-Rezepturansatz und Microsilika bzw. Keimbildner

Rezeptur	**SA-SF-3**	**SA-KB-6**
MgO-Sorte	K10F der Fa. STYROMAG mit ca. 80 % MgO-Gehalt	
MgO (K10F)	6,55%	7,1%
R-Lösung	14,45%	15,6%
Gesteinskörnung (0-8 mm)	75,31%	76,20%
Zusatzkomponente	3,69% Microsilica	1,1% Keimbildner bzw. 15,9% Keimbildnersuspension
Ausbreitmaß (DIN 1048)	520 mm	550 – 560 mm
Rohdichte	2,27 t/m³	2,21 t/m³
Längendehnung (Expansion) im Einbauzustand	0,4 mm/m nach 6 Tagen 1 mm/m nach 12 Monaten	0,6 mm/m
Einaxiale Druckfestigkeit	39,3 MPa	36,5 MPa
Spaltzugfestigkeit	3,5 MPa	3,4 MPa

Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass für beide Vorzugsrezepturen die einaxiale Druckfestigkeit (jeweils bestimmt an 3 Proben) zwischen 35 MPa und 40 MPa und die Spaltzugfestigkeit zwischen 3,0 MPa und 3,6 MPa liegt. Die Festigkeiten bei einem MgO-Beton mit der 3-1-8-Bindemittelphase sind somit signifikant kleiner als die Festigkeiten eines MgO-Betons mit der 5-1-8-Bindemittelphase.

Für weitere Untersuchungen zum Kriechverhalten wird auf den TB 6, Abschnitt 2.3, verwiesen. Die Rückschlüsse aus diesen Ergebnissen werden im Abschnitt 4.1.6 diskutiert.

4.1.5 Verhalten der 3-1-8-Bindemittelphase bei Kontakt mit Lösung

Mit unterschiedlichen MgO-Leim-Proben (also ohne Zuschlagstoff) mit der 3-1-8-Bindemittelphase wurden Einlagerungsversuche in $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung durchgeführt. Diese Versuche sind anschließend auch mit Betonproben mit dem 3-1-8-Bindemittelphase durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind ausführlich im TB 5.1 (Abschnitt 5.1.2.1) dokumentiert. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Einlagerung der Probekörper in $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung führte bereits nach 21 Tagen zu großen Volumenvergrößerungen, bis zu 27% (bezogen auf das Ausgangsvolumen) bei dem getemperten Keimbildnerzusatz und bis zu 17% bei dem ungetemperten Keimbildnerzusatz. Bei weiterer Lagerung haben sich die Proben entfestigt. Die Hauptursache für die Entfestigung sind Restgehalte an 5-1-8-Phase. Die Umwandlung zur 3-1-8-Phase war noch nicht abgeschlossen.
- Der Zusatz von 3-1-8-Phase in Form von Keimbildnersuspension beeinflusst die Kristallinität der Proben im Vergleich zu Vergleichsproben ohne Zusatz von Keimbildnersuspension nicht wesentlich. Das Tempern des Keimbildnermaterials hat keinen positiven Einfluss auf die Kristallinität der Proben. Ebenso wenig wird die Stabilität der Proben bei Einlagerung in $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung durch den Einsatz

getemperter Keimbildner verbessert. Die Proben mit ungetemperten Keimbildnern enthalten weniger 5-1-8-Phase.

- Hinsichtlich der Beständigkeit von jungem und an Luft einen Monat gealterten 3-1-8-MgO-Beton in $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung erfüllen sowohl die Rezeptur SA-SF3 als auch die Rezeptur SA-KB6 nicht die Anforderungen an ein Baumaterial für langzeitstabile Streckenverschlüsse (zur Rezeptur von Sa-Sf3 und SA-KB6 siehe TB 5.1). Nach 10 Wochen Einlagerung in Lösung waren die Proben unter Rissbildung zerstört.
- Es gibt erste Hinweise darauf, dass die Abbindetemperatur von MgO-Binderproben Einfluss auf den Phasenbestand und die Kristallinität hat. Es wird vermutet, dass der Grad der Kristallinität die Festigkeitseigenschaften des MgO-Ortbetons und die Beständigkeit gegenüber $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung günstig beeinflusst. Für den Zeitraum der erhöhten Temperatur von beispielsweise 24 h bei 80 °C wurde die Primärkristallisation einer 9-1-4 Phase festgestellt. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur setzt unter Verbrauch von Porenlösung die Umwandlung in die 3-1-8-Phase ein. Ein solcher Probekörper (1 kg), bei 80°C abgebunden und 24 h bei dieser Temperatur gehalten, wurde nach weiteren 28 Tagen der Lagerung bei 25°C und 40%rLF in $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung eingelagert. Nach 7 Monaten zeigte die Probe keinen Zerfall. Der Weg der Phasenbildung über hohe Temperaturen scheint sich vorteilhaft auf die Gefügebildung und deren mechanischer Stabilität in Gegenwart von Gleichgewichtslösung auszuwirken. Dazu sind weitere Untersuchungen zur Ermittlung des erforderlichen Temperatur-Zeit-Verlaufes erforderlich.

4.1.6 Vergleich beider Materialien

Wie in den vorangegangenen Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 dargestellt, wurden Rezepturen für einen MgO-Beton mit der 5-1-8-Bindemittelphase für die Ortbetontechnologie und die Spritzbetontechnologie bis zur technischen Anwendungsreife entwickelt. Hinsichtlich der Festigkeit und der Permeabilität erfüllt dieses Material die Anforderungen an einen Baustoff für Verschlusselemente im Carnallitit.

Nachteilig ist der metastabile Charakter der 5-1-8-Bindemittelphase, der sich besonders in den beobachteten Wechselwirkungen des MgO-Betons mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung zeigt. Ein auf einem thermodynamischem Gleichgewichtszustand basierender Nachweis der Langzeitstabilität des 5-1-8-Baustoffes ist nicht möglich.

Allerdings kann bei niedrigen Umwandlungsgeschwindigkeiten oder bei günstigen Randbedingungen (bei langer Reifezeit und damit bei späten Lösungszutritt und bei allseitiger Einspannung des Bauwerkes) der Baustoff auf Basis der 5-1-8-Bindemittlelphase eingesetzt werden, wenn sich dabei entsprechende Vorteile gegenüber Baustoffen auf Basis der 3-1-8-Bindemittelphase bieten. In diesem Fall ist eine Prognose der Umwandlungszeit erforderlich.

Für den MgO-Beton mit 3-1-8-Bindemittelphase wurden praktikable Ortbetonrezepturen entwickelt (siehe Tabelle 4). Aufgrund der erforderlichen Frischbetonkonsistenz beim Einbau müssen aber Zusatzkomponenten eingesetzt werden. Diese können entweder Mikrosilica als artfremde Komponenten oder ein arteigner Keimbildner aus aufgemahlener kristalliner 3-1-8-Phase sein, der als Suspension zugesetzt wird. Der Einsatz von Keimbildnersuspension verbessert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und es kann damit auf artfremde Zusatzstoffe zur Stabilisierung des Frischbetons (Vermeidung von Sedimentation und Ausbluten, Förderfähigkeit) verzichtet werden. Unter diesen Prämissen ist die Rezeptur SA-KB-6 die Vorzugsvariante eines 3-1-8-MgO-Ortbetons.

Allerdings hat die Untersuchung von 3-1-8-MgO-Ortbetons gezeigt, dass auch hier Wechselwirkungen mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung nicht ausgeschlossen werden können. Die Ursachen sind nach bisherigen Erkenntnisse Restgehalte an 5-1-8-Bindemittelphase und amorphe Bestandteile bzw. ein ungenügender Kristallinitätsgrad der gebildeten 3-1-8-Bindemittelphase.

Ein weiterer Nachteil des 3-1-8-MgO Ortbetons ist die geringere Festigkeit (siehe Tabelle 4 im Vergleich zu Tabelle 3 sowie Abbildung 21) und das bisher festgestellte ausgeprägte Kriech- und Relaxationsverhalten der 3-1-8-Bindemittelphase (s. TB 6). Durch das ausgeprägte Kriechverhalten des erhärteten 3-1-8-MgO-Betons verformt sich der MgO-Beton unter Last zeitabhängig erheblich. Der MgO-Beton entwickelt keine Festigkeit und ist damit als Dammbaumaterial im derzeitigen Entwicklungsstand ohne mechanische Einspannung noch nicht brauchbar.

Um die Festigkeitsentwicklung von 3-1-8-MgO-Ortbeton zu verbessern, wurde der MgO-Beton während des Abbindens gezielt temperiert, so dass die Bildung der langzeitstabilen 3-1-8-Phase über das Stadium der Primärkristallisation einer 9-1-4 Phase erfolgte. Die auf diesem Weg gebildete 3-1-8-Phase hat einen höheren Kristallinitätsgrad. Mit wachsender Abbindezeit bei 80 °C verringert sich das Kriechvermögen (bzw. die Kriechrate) und verbessert sich die Tragfähigkeit des Materials. Daraus folgt, dass ein 3-1-8-Ortbeton, der eine hohe Tragfähigkeit und Beständigkeit gegenüber möglichen Zutrittslösungen erfüllen soll, über eine Dauer von mindestens 48 h während des Abbindens eine Temperatur von 80 °C aufweisen muss. Ob diese Bedingung in der Praxis erfüllt werden kann, muss durch thermomechanische Modellrechnungen geprüft werden. Dazu müssen die thermischen Parameter des 3-1-8-Ortbetons (Aktivierungsenergie, Wärmekapazität, Hydratationswärme) noch bestimmt werden.

Des Weiteren wurde für den 3-1-8-MgO-Ortbeton die Kohäsion zwischen 7,5 und 8,0 MPa und ein Winkel der inneren Reibung von 32° bestimmt (siehe Abbildung 21).

Weiterhin ist jedoch zu beachten, dass Temperaturen von 80°C beim CaT an der Gebirgskontur zu Schädigungen führen, die sich ungünstig auf die Durchlässigkeit des konturnahen Gebirges im Bereich der MgO-Betonelemente auswirkt.

Um MgO-Beton mit 3-1-8-Bindemittelphase trotzdem einsetzen zu können, wurde versucht, diesen Baustoff als Spritzbeton aufzutragen und eine entsprechende Spritzbetonrezeptur entwickelt (s. TB 5.1). Mit der Anwendung der Spritzbetontechnologie sollte getestet werden, ob auch bei einer etwas niedrigeren Abbindetemperatur als 80°, eine 3-1-8-Bindemittelphase nach dem Abbinden erreicht werden kann war. Dies war jedoch nicht der Fall. Aus diesem. Grund wird auf eine Darstellung der Ergebnisse zur Entwicklung des 3-1-8-Spitzbetons an dieser Stelle verzichtet.

Hinsichtlich der MgO-Baustoffe verbleiben nach dem vorliegenden Untersuchungsstand folgende offenen Fragen, die in einem nachfolgenden FuE-Thema bearbeitet werden müssen:

- Phasenbildung bei erhöhten Temperaturen,
- Berechnung des Temperatur-Zeitverlaufes in Abhängigkeit vom MgO-Gehalt und von der Geometrie des MgO-Betonkörpers in situ bzw. der Probe,
- Einfluss von Sulfat und Calcium auf die Sorelphasenbildung,
- Ermittlung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens (Kriechverhalten, Relaxationsverhalten),
- Untersuchung von eingelagerten Proben hinsichtlich Nachreaktionen, Volumenveränderungen, Festigkeitsveränderungen in Abhängigkeit der verwendeten MgO-Sorte (bzw. in Abhängigkeit der Aktivität des MgO), der Probenreifezeit bis zur Einlagerung in Lösung und der Art der Einlagerungslösung
- Expansionsdruck von Sorelphasen.

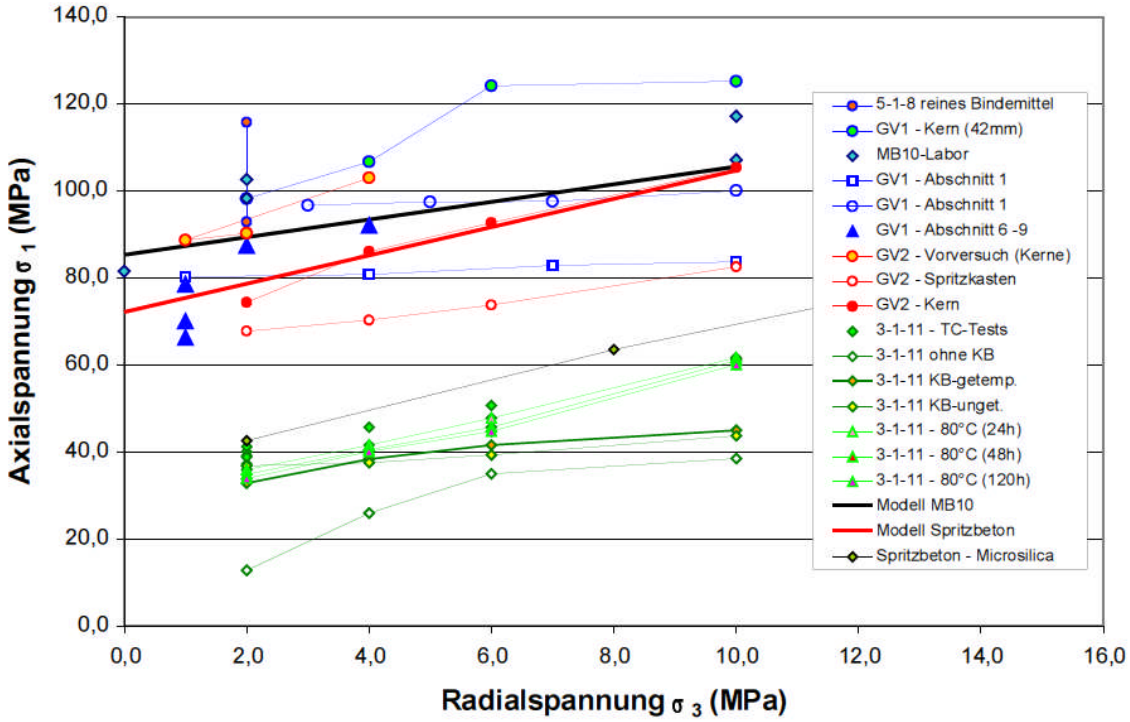

Abbildung 20: Ergebnisse von Triaxialversuchen unterschiedlicher MgO-Betone: Vergleich zwischen MgO-Beton mit 5-1-8- und 3-1-8-Bindemittelphasen

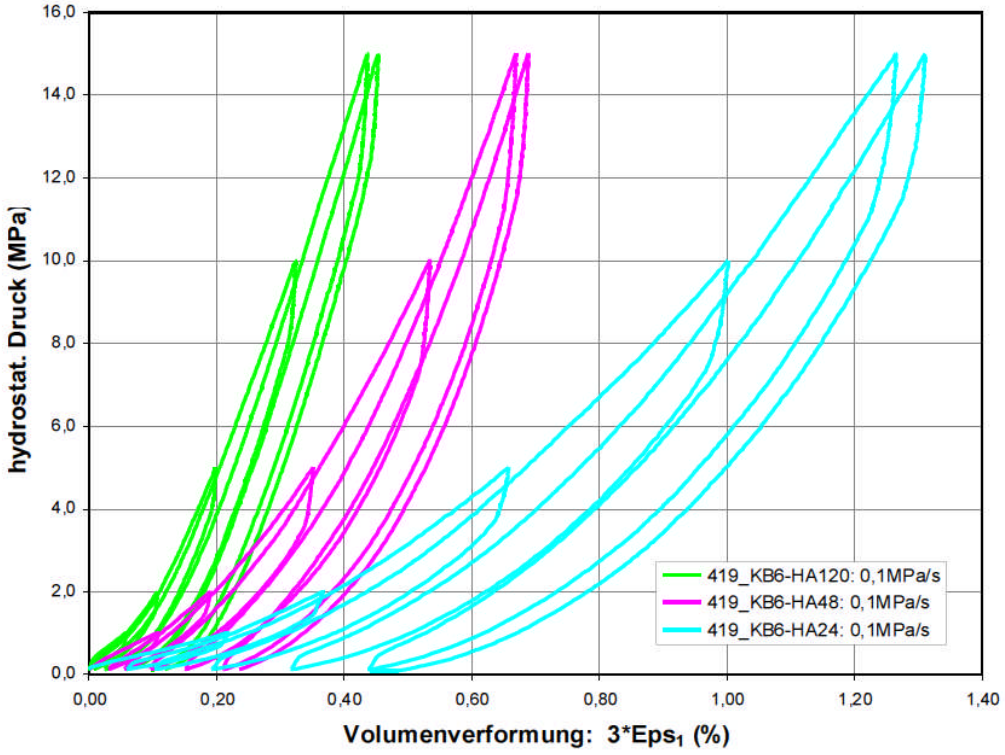

Abbildung 21: Verformungsverhalten des bei 80 °C abgebundenen 3-1-8-MgO-Ortbetons bei unterschiedlicher Dauer der Wärmebehandlung (24 h, 48 h, 120 h) und bei einer Belastungsrate von 0,1 MPa/s

4.1.7 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von MgO-Beton

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Funktionselemente von Verschlussbauwerken in 2 Großversuchen GV1 und GV2 getestet. Details sind in TB 7 beschrieben. Beim Großversuch GV1 (Längsschnitt siehe Abbildungen 31 und 35) wurden 365 m³ Ortbeton in 13 Scheiben (= Betonierabschnitten) bei einem Kegelstumpf mit bis zu 5,6 m Durchmesser eingebracht. Beim Großversuch GV2 (Längsschnitt siehe Abbildung 32) wurde ein nahezu 10 m langes Verschlusselement in Spritzbeton mit einer Lagenstärke von etwa 10 cm erstellt.

Die Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von MgO-Beton werden deshalb im Zusammenhang mit den Großversuchen gezogen (Abschnitt 6.5.1).

4.2 Asphalt als Dichtelement

4.2.1 Baustoffeigenschaften

Als wichtige Vorarbeit zur Weiterentwicklung von Asphaltdichtelementen für Streckenverschlüsse ist das vom 1.10.2004 bis 30.9.2008 am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg BMBF-geförderte Vorhaben "Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke" (FKZ 02C1124) bearbeitet worden [21]. Folgende Ergebnisse dieses Vorhabens fließen in das Vorhaben CARLA ein:

- Als Bitumen für Dichtaufgaben und als Bindemittel für Dichtasphalte wird Oxidationsbitumen favorisiert. Auf der Basis von Oxidationsbitumen wurden neue Asphaltrezepturen mit verbessertem Dichtverhalten entwickelt.
- Bitumen ist eine zähe Flüssigkeit (und keine Feststoff) bei den Temperaturen unter Tage (25°C und mehr).
- Bei Streckenverschlüssen generell und insbesondere bei Standorten im Carnallitit ist der Heißeinbau von Gussasphalt problematisch. Deshalb wurde ein neues Verfahren des Kalteinbaus und dafür ein neuer Baustoff in Form von vorgefertigten Gussasphaltblöcken entwickelt [12]. Als Bindemittel für die Gussasphaltblöcke wird Oxidationsbitumen 85/25 verwendet. Der Bindemittelgehalt liegt zwischen 12 und 20%. Der Zuschlag besteht aus einer Mischung aus 85% Natursand 0/2 mm und 15% Tonschiefermehl kleiner 0,09 mm. Experimentell wurde gezeigt, dass es durch die Kombination von moderaten Temperaturen (< 60°C) und Drücken (< 400kPa) möglich ist, Asphaltsteine im Laufe von 1-3 Tagen vollkommen fugenfrei zu verbinden ("Monolithisieren" des Dichtkörpers).
- Bei einer Asphaltdichtung (Firstspaltbildung infolge zeitabhängiger Verformungen unter Wirkung der Schwerkraft) sollen Konstruktionen mit einem druckseitigen Asphaltreservoir in Verbindung mit einem statischen Widerlager aus MgO-Beton eingesetzt werden.
- Das Langzeitverhalten einer Bitumendichtung im Kontakt mit Salzlösung wird durch das Benetzung (unterschiedliche Grenzflächenspannung von Bitumen und angreifender Lösung) wesentlich beeinflusst.
- Zur Verbesserung des Haftverhaltens von Bitumen/Asphalt am Salzgestein wurde ein spezieller Bitumenanstrich entwickelt [11], der im Labor erfolgreich getestet wurde. Durch den Einsatz eines Voranstriches wird die Benetzung des anstehenden Salzgesteins durch Bitumen und damit das Dichtverhalten des Gesamtsystems verbessert.

Im Vorhaben CARLA wurden die Materialuntersuchungen zur Asphaltdichtung im Rahmen von Bohrlochversuchen im Carnallitit fortgesetzt. Ziel der Bohrlochversuche war:

- Erprobung des neuen Einbauverfahrens der Monolithisierung von Aspahltformsteinen.
- In-situ-Erprobung des neu entwickelten Voranstrichs in Verbindung mit den möglichen Einbauverfahren.

Dazu wurden in der Grube Teutschenthal folgende Bohrlochversuche (D = 300 mm) im Carnallitit durchgeführt:

GLAU-1: Dichtelement aus durch Druck monolithisierten Asphaltsteinen o Voranstrich

GLAU-2: Dichtelement aus durch Druck und Temperatur monolithisie Asphaltsteinen ohne Voranstrich der Kontur

GLAU-9: Dichtelement mit Asphaltmastix im Heißeinbau bei 170 °C Voranstrich und Haftmittel auf der Kontur

GLAU-10: Dichtelement aus durch Druck und Temperatur monolithisie Asphaltsteinen mit Voranstrich auf der Kontur

Beim Bohrlochversuch GLAU-1 wurden die Asphaltsteine durch Druck, der über einen Stahlstempel aufgebracht wurde, monolithisiert. Der Versuch zeigte, dass bei Gebirgstemperatur (ohne zusätzliche Temperaturerhöhung) die Verheilung der Fugen zwischen den Gussasphaltsteinen nur nach langer Zeit (>4 Monate) und bei sehr hohen Drücken (>600kPa) erfolgte. Aufgrund einer Beschädigung der Messstelle durch ein Fahrzeug konnte der Versuch nicht zu Ende geführt werden.

Beim Bohrlochversuch GLAU-2 wurden die Asphaltsteine über einen beheizbaren Druckstempel monolithisiert. Wird dabei das Dichtelement auf ca. 60°C erwärmt und gleichzeitig ein Druck von 4 bar aufgebracht, wird das Dichtelement vollständig monolithisiert und damit der Bohrlochquerschnitt im Carnallititgebirge abgedichtet. Ein Widerlager aus MgO-Beton wurde bei den Versuchen Glau-1 und Glau-2 nicht eingebaut. Die integrale Gaspermeabilität des Systems Bohrloch/Asphaltdichtung bei einem Prüfdruck von 3 bar betrug beim Versuch Glau-2 $8 \cdot 10^{-20}$ m².

Bei Prüfdrücken >3 bar kam es zum Versagen der Dichtung mit einer Permeabilitätserhöhung auf $>3 \cdot 10^{-15}$ m².

Danach wurde der Anpressdruck durch den Stahlstempel auf 4 bar erhöht. Damit konnte der dichte Ausgangszustand wieder hergestellt werden. Danach wurde die Permeabilität des Dichtelementes mittels Gas getestet, wobei der Druck des Stahlstempels während des Permeabilitätstests beibehalten wurde. Beim Permeabilitätstest versagte die Dichtung erst bei einem Prüfdruck von ca. 6 bar. Das Dichtelement versagte an der Kontaktzone, da Normalspannungskriterium nicht eingehalten wurde. Beim nachträglichen Rückbau wurde festgestellt, dass die Asphaltdichtung aus Formsteinen vollständig monolithisiert war (siehe Abbildungen 22 und 23).

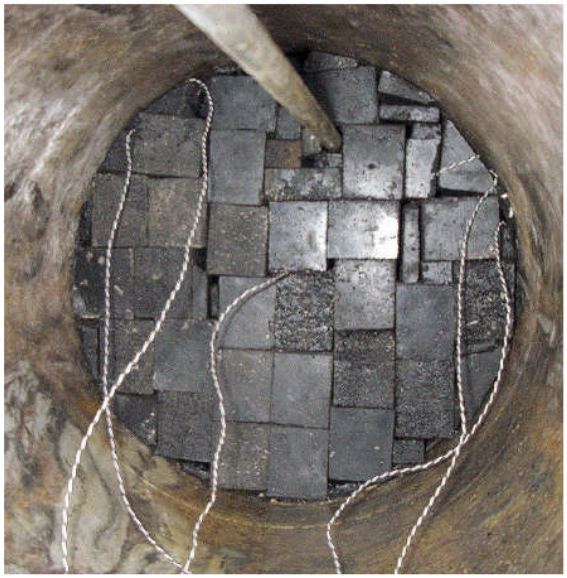

Abbildung 22: Asphaltdichtelement im Einbauzustand - Versuch GLAU-2

Abbildung 23: Asphaltdichtelement nach dem Monolithisieren - Versuch GLAU-2

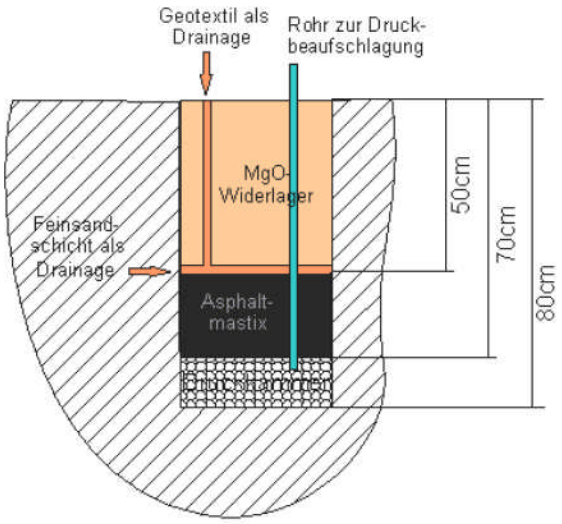

Abbildung 24: Aufbau Versuch GLAU-9

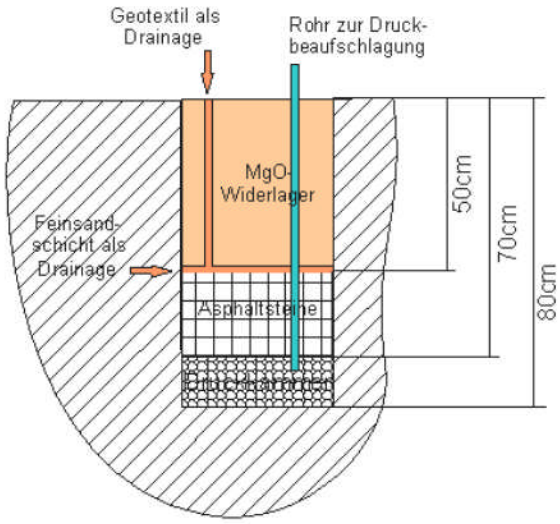

Abbildung 25: Aufbau Versuch GLAU-10

In den Versuchen GLAU-9 und GLAU-10 (siehe Abbildungen 24 und 25) wurde der neu entwickelte Voranstrich [11] in situ erprobt. Weiterhin wurde eine neu entwickelte Asphaltmastixrezeptur aus Oxidationsbitumen 85/25 (Bindemittelgehalt ca. 44%) und Schiefermehl verwendet. Diese Mischung wurde im Versuch GLAU-9 im Heißeinbau und im Versuch GLAU-10 im Kalteinbau aus vorgefertigten Asphaltsteinen eingesetzt. Nach dem Entfernen des Druckstempels wurde über dem monolithisierten Asphaltelement ein permeables Widerlager aus MgO-Beton eingebaut. Durch den Voranstrich bei beiden Versuchen betrug beim Heißeinbau die maximale Oberflächentemperatur (nach 10 Sekunden) nur 100 bis 120 °C (bei 180 °C Einbautemperatur und gemessenen max. 170 °C im Kern). Der Voranstrich führte damit zu geringeren Temperaturen und damit zu geringeren Schädigungen der Kontur als ohne Voranstrich. Durch den Konturanstrich wird quasi ein “abgeschlossenes” System erreicht, in dem die mögliche Grenztemperatur für das umliegende Gebirge höher liegen kann (s. TB 9.2).

In beiden Bohrlöchern betrug die Ausgangspermeabilität des Gebirges $<10^{-21}$ m². Im Versuch GLAU-9 wurde bei einem Prüfdruck von 10 bar eine Permeabilität des Gesamtsystems von $5 \cdot 10^{-20}$ m² gemessen. Der Fracdruck des Systems lag bei 58,9 bar.

Im Versuch GLAU-10 wurde nach dem Monolithisieren über den beheizbaren Druckstempel das Ergebnis des Versuches GLAU-2 mit einer bei 3 bar Prüfdruck gemessenen Permeabilität des Gesamtsystems von $2 \cdot 10^{-20}$ m² bestätigt. Der Fracdruck des Systems lag bei 61,1 bar.

Aus diesen beiden Versuchen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Verwendung des Voranstriches führt generell zu einer Verbesserung der Dichtwirkung eines Asphaltelementes – sowohl bei einem Dichtelement aus monolithisierten Asphaltformsteinen, als auch beim Heißeinbau..
- Der Konturanstrich führt beim Heißeinbau zu geringeren Oberflächentemperaturen und verringert die Permeabilität an der Kontur des Asphaltelementes.

Eine Universalrezeptur für einen Dichtungsasphalt kann nicht angegeben werden. Die Asphaltrezeptur wird entsprechend den vorliegenden Randbedingungen (z. B. Gebrigspermeabilität) nach der gewünschten Dichte und der erforderlichen Viskosität optimiert.

Das Verfahren der thermischen Vorbehandlung des Carnallitits für die Bildung einer MgO-Schutzschicht [24] wurde nicht weiter verfolgt, da hierbei mit der Entstehung von gasförmigem HCl gerechnet werden muss.

Nachteilig für den Einsatz von Asphalt als Dichtmaterial ist das generell noch offene Problem der unterschiedlichen Grenzflächenspannung des Bitumens (Flüssigkeit!) auf der Salzoberfläche im Beisein von Salzlösung. In der Kontaktzone zwischen Bitumen und Salzgestein können dabei aufgrund der unterschiedlichen Grenzflächenspannung der Salzoberfläche mit beiden Flüssigkeiten Probleme mit der langzeitlichen Haftung bzw. Adhäsion und infolgedessen Veränderungen der Permeabilität in der Kontaktzone einer Asphaltdichtung auftreten. Diese neu festgestellte Problemstellung muss weiter grundlegend untersucht werden, da hiervon der Nachweis der dauerhaften Funktionstüchtigkeit von Bitumen- und Asphaltdichtungen im Salinar abhängt.

4.2.2 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz

Der großtechnische Test eines Asphaltelementes erfolgte im Rahmen des Großversuches GV3. Einzelheiten zum Versuchsaufbau und zur Ausführung des GV3 sind im TB 7 enthalten. Bei dem Versuch sollte eine Scheibe (Durchmesser 1,2 m, Dicke 0,2 m) aus vorgefertigten Asphaltformsteinen mittels einer mit temperiertem Silikonöl gefüllten Gummiblase monolithisiert und dicht an die Kontur angeschlossen werden. Anschließend sollte ein Permeabilitätstest mit Flüssigkeit erfolgen. Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von Asphaltbaustoffen in Abdichtungsbauwerken werden im Zusammenhang mit den Ergebnissen des GV3 dargestellt (Abschnitt 6.4.2).

5. Kontaktfuge (Kontaktzone) zwischen Dammbauwerk und Gebirge

5.1 Grundlagen und Konventionen

Als Kontaktfuge (KF) wird die Fläche bezeichnet, die durch die stoffliche Inhomogenität an der Grenze zwischen Bauwerk (Dammkörper) und Gebirge (i.d.R. ALZ) gebildet wird. Sie kann sich als teilweise oder vollständig offener Spalt darstellen, sie kann durch teilweisen oder vollständigen adhäsiven Kontakt oder im Extremfall durch Reibungskontakt zwischen Gebirge und Baustoff (ohne Kohäsion) gebildet werden. Sie kann auch durch einen

injizierten oder anderweitig zwischen Bauwerk und Gebirge aufgebrachten weiteren Stoff ausgefüllt sein.

Diese Beschreibung ist phänomenologisch geprägt und hat ihre besondere Bedeutung im Falle einer notwendigen technischen Sonderbehandlung in Form einer Vergütung (z.B. eines Schutzanstriches vor Feuchtigkeitsbeeinflussung der Gebirgsoberfläche oder z.B. zur Verbesserung der Benetzbarkeit den angrenzenden Stoffe gegenüber Asphalt) oder in Form einer Injektion zur Reduzierung der Permeabilität der KF.

Bei gebirgsmechanischen Berechnungen wird in der Regel von einem festen Verbund zwischen Dammkörper und Gebirge ausgegangen und die besonderen Festigkeits- und Verformungseigenschaften der KF werden durch entsprechende Parameter in den angrenzenden Stoffen (z.B. im Baustoff, in der Regel aber in der ALZ des Gebirges) berücksichtigt (Abschnitt 8).

Im Folgenden wird die KF in technisch-technologischer Hinsicht behandelt, indem Maßnahmen zur Vergütung (Injektion) bzw. zum Feuchtigkeitsschutz (Schutzanstrich) sowie deren Einfluss auf die direkten Permeabilitätseigenschaften der KF und ihrer unmittelbaren Umgebung im Vordergrund stehen (s. TB 4.1 und 4.2).

5.2 Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktfuge und des unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereiches

5.2.1 Materialien und Technologien

2-K-Injektionsbitumen

In Vorversuchen wurde das Anmischen und Einbringen des 2K-Bitumens mittels handelsüblichen Injektionsschläuchen und einer für die Injektionsarbeit geeigneten Schneckenpumpe mit Anmischbehälter getestet (s. TB 4.1). Anschließend wurde der komplette Verpressvorgang (Injektionsschläuche Intec-Cem, Schneckenpumpe) beim Verpressen der Kontaktfuge zwischen Gebirge und einem Oberflächenpacker (3,5 m x 2,7 m) aus MgO-Beton erprobt. Bei Verpressdrücken von 6 bis 8 MPa wurden ca. 3 Liter 2K-Bitumen injiziert. Für die Bewertung der Ausbreitung des Injektionsmittels in der Kontaktfuge und im angrenzenden Gebirge wurden aus der Kontaktfuge Bohrkerne gewonnen. Dabei ist ersichtlich, dass das 2K-Injektionsbitumen in die Kontaktfuge und in die konturnahen Bereiche des anliegenden Gebirges eingedrungen ist und Wegsamkeiten ausgefüllt hat (siehe Abbildung 26).

Durch Permeabilitätsmessungen im Ausgangszustand (>10^{-14} bis $5 \cdot 10^{-16}$ m²) und ca. 2,5 Monate nach der Injektion wurde eine Verringerung der Permeabilität der Kontaktfuge auf Werte bis 10^{-17} bis 10^{-18} m² nachgewiesen. Weitere Messungen nach weiteren 4 Monaten zeigten keine Verschlechterung der Dichteigenschaften der Injektion im Zentrum des Oberflächenpackers. Im Randbereich wurde eine Abnahme der Dichtwirkung (auf $5 \cdot 10^{-15}$ m² festgestellt. Es wird vermutet, dass dieser Effekt auf Wechselwirkungen zwischen der äußeren Atmosphäre (seitlicher Zutritt der Luftfeuchtigkeit) und dem Gebirge zurückzuführen ist.

Epoxidharz

Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die in [15] dargestellten Untersuchungen. Für vollständig vernetzte Kunstharze kann man nach Herstellerangaben von einer Langzeitbeständigkeit im Zeitraum von 100 bis 150 Jahren ausgehen. Nach dieser Zeit werden Wegsamkeiten aufgrund des rheologischen Verhaltens des Salzgesteins weitgehend verschlossen haben. Dabei wird das Injektionsmittel vollständig im Gebirge eingeschlossen.

Von den bekannten Kunststoffinjektionsmitteln sind Acryl-Gele und Einkomponenten Polyurethane nicht geeignet, da die Polymerisation unter den gegebenen Bedingungen gestört sein kann oder sie nur eine geringe Haftfestigkeit am Salzgestein aufweisen, die zum Aufreißen der Wegsamkeiten unter Belastung führen kann. Vorteilhaft sind niedrigviskose

Epoxidharze. Als Vorzugsmaterial wurde im Ergebnis umfangreicher Eignungstests und In-situ-Versuche das Material Denepox 40 von der Firma De Neef ausgewählt [15]. Dieses Material zeichnet sich durch eine niedrige Anfangsviskosität (ca. 25 mPas), eine hohe Adhäsion zum Gebirge und eine hohe Zugfestigkeit (ca. 60 MPa) aus.

Untersuchungen zur Wirksamkeit von Injektionen mit Denepox 40 im Carnallitit wurden mit Bohrlochversuchen (D = 150 mm) und mit Oberflächenpackertests (0,5 m x 0,5 m) durchgeführt. Der Injektionsdruck betrug meist 10 bis 15 bar, maximal 30 bis 40 bar. Dabei kam es vorrangig auf eine gleichmäßige Verteilung des Materials an. Ein Hydrofrac des Gebirges war zu vermeiden.

Im Ergebnis der Injektion mit Denepox 40 wurden Permeabilitäten der Kontaktfuge der Oberflächenpacker von < $8 \cdot 10^{-17}$ m² erreicht (Ausgangswerte $4 \cdot 10^{-14}$ m² bis $7 \cdot 10^{-16}$ m²). Die Ergebnisse der Bohrlochversuche bestätigen diesen Effekt (s. TB 4.1 und 4.2).

Abbildung 26: Injektion von 2K-Injektionsbitumen im konturnahen Gebirge (nachträglich erbohrte Kerne aus der KF; oben Salzgestein, unten MgO-Beton)

MgO-Injektionsmörtel (IM3-mod)

Im Zusammenhang mit der Option einer nachträglichen Vergütung eines Verschlussbauwerkes aus MgO-Beton im Carnallitit wurde von K-UTEC ein MgO-Injektionsmörtel auf die vorliegenden Bedingungen angepasst. Basis war der Injektionsmörtel IM 3, der aus dem Bindemittel MgO, Schiefermehl als Zuschlag und aus konzentrierter $MgCl_2$-Lösung als Anmachflüssigkeit besteht. Bei Bedarf wurde ein Fließmittel und ein Verzögerer zugegeben. Dieser Injektionsmörtel basiert auf neu entwickelten Magnesiabindersystemen [13,14].

Für die vorliegenden Bedingungen wurde der Mörtel durch eine ta-gesättigte $CaCl_2$-Lösung als Anmachlösung modifiziert. Die Verarbeitbarkeit war über die Reaktivität des MgO einstellbar. Mit diesem Material wurden Versuche zur Injektion in Bohrlöchern (konventionelle Injektion) und Injektion mittels Manschettenrohr durchgeführt (s. TB 4.1). Für das Manschettenrohrverfahren wurde weiterhin von K-UTEC ein spezieller MgO-Bettungsmörtel entwickelt.

Materialien zur Oberflächenbeschichtung

Nach den im Teil 1 [17] durchgeführten Vorversuchen zur Beschichtung der Carnallititoberfläche mit handelsüblichem Bitumen-Bautenschutzanstrich wurden nochmals Vergleichsuntersuchungen mit einer lösungsmittelfreien Bitumenemulsion (Fa. Köster), einer

hochelastischen Abdichtungsmasse auf Kautschuk/Bitumenbasis (Köster KBE-Flüssigfolie) und eines lösungsmittelhaltigen Bitumenvoranstrichs (Fa. Köster) durchgeführt.

Die Bitumenemulsion und die Flüssigfolie erwiesen sich hinsichtlich Verarbeitbarkeit auf der nachgeschnittenen Carnallititoberfläche und Beständigkeit unter Grubenbedingungen als nicht geeignet. Der lösungsmittelhaltige Bitumenvoranstrich zeichnete sich durch eine sehr gute Verarbeitbarkeit aus, drang schnell in die Gebirgsoberfläche ein und trocknete schnell ab. Allerdings war der Schutz des beschichteten Gebirges vor Verwitterung unzureichend. Weitere Tests wurden mit einer Bitumen-Spachtelmasse (Fa. Köster) und einem lösungsmittelhaltigen Bitumen-Isolieranstrich durchgeführt. Die Verarbeitbarkeit der Spachtelmasse war schlecht – die Beständigkeit über eine Dauer von 30 Tagen gut. Die Verarbeitbarkeit des Isolieranstriches war sehr gut – die Beständigkeit über eine Dauer von 30 Tagen ausreichend (leichte Verwitterung nach 7 Tagen). Keine weitere Verbesserung der Beständigkeit brachte die Kombination des Bitumenvoranstriches mit dem Isolieranstrich.

Dem gegenüber erwies sich die Kombination aus Voranstrich mit KBE-Flüssigfolie in der Verarbeitbarkeit und Beständigkeit als sehr gut. Aus diesen Ergebnissen kann man schlussfolgern, dass eine praktikable Verarbeitbarkeit und eine zufriedenstellende Versiegelung (Verwitterungsschutz) der frisch geschnittenen Carnallititoberfläche bei Verwendung einer zweistufigen Beschichtung aus Bitumenvoranstrich und nachfolgendem Auftragen der KBE-Flüssigfolie möglich ist. Allerdings ist der Bitumenvoranstrich aufgrund seines Benzolgehaltes und seiner unteren Explosionsgrenze für den untertägigen Bergbau unter den gegebenen Bedingungen nicht zulassungsfähig. In dieser Situation wurde beschlossen, als Vorzugsvariante die Reinigung der nachgeschnittenen Gebirgskontur durch Sandstrahlen und der unmittelbar danach folgende Einbau von MgO-Spritzbeton zu favorisieren. Dabei ist die Zeitspanne der möglichen Verwitterungsdauer bis zum Auftragen einer Oberflächenbeschichtung oder des Spritzbetons als größenordnungsmäßig gleich angesehen worden.

Gleichzeitig wurde ein Bitumenanstrich entwickelt, der frei von Wasser und leichtflüchtigen Lösungsmitteln ist, so dass er im untertägigen Bergbau, insbesondere im Salz- und Kalibergbau genehmigungsfähig ist. Die ursprüngliche Zielstellung dieses Anstriches, war allerdings die Verbesserung der Dichtwirkung von Asphaltelementen im Salzgestein durch eine Verbesserung des Haftvermögens von Bitumen bzw. Asphalt an der Gebirgsoberfläche.

Dieser neue Anstrich [11] besteht aus dem Bindemittel des Asphaltes des Dichtelementes (dies kann ein Destillationsbitumen oder ein Oxidationsbitumen sein) und einem flüssigen Kohlenwasserstoff. Als flüssige Komponente wird ein entaromatisierter aliphatischer Kohlenwasserstoff verwendet, dessen Flammpunkt so hoch ist, dass er im Salzbergbau zugelassen werden kann. Dieser Anstrich wird nicht generell, sondern nur in den Bereichen eingesetzt, in denen Asphaltdichtelemente positioniert werden sollen.

5.2.2 Untersuchungsergebnisse

Im Teil 1 des Vorhabens [16] wurde vor allem die Vergütung von Wegsamkeiten im Kontaktbereich mit Öffnungsweiten von 30 µm bis 100 µm untersucht. Für diese Spaltweiten wurde als Injektionsmaterial 2K-Bitumen [17] und Epoxidharz [15] ausgewählt und untersucht.

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse aus Vorversuchen zu den getesteten Injektionsmitteln aufgeführt.

Die in [17] durchgeführten Voruntersuchungen waren im Kleinversuch und in mittelmaßstäblichen Untersuchungen in situ (z.B. Oberflächenpacker) erfolgreich. Deswegen wurde 2K-Bitumen und Epoxidharz bei den anschließend durchgeführten Großversuchen GV1 und GV2 verpresst (Abschnitt 6).

Tabelle 5: Zusammenfassende Versuchergebnisse zu den Injektionsmitteln

Injektionsmittel	**Methode der Injektion**	**zu verschließende Wegsamkeiten**	**Reduzierung der Permeabilität in Vorversuchen**
2K-Bitumen	Injektionsschlauch	30-100 µm und größer	von $9 \cdot 10^{-15}$ m^2 auf $2 \cdot 10^{-18}$ m^2
Denepox 40	Injektionsschlauch	<30-100 µm	von $4 \cdot 10^{-14}$ m^2 auf $2 \cdot 10^{-19}$ m^2
Injektionsmörtel auf MgO-Basis	die zu verpressende Wegsamkeit schneidendes Bohrloch	100 µm – 5 mm	nicht bestimmt

Die Verpressung erfolgte über perforierte Verpressschläuche, die als Ringleitungen um den Querschnitt in mehreren Verpressebenen im GV1 und GV2 verlegt wurden. Dazu wird auf Abbildungen 31 und 32 bzw. 35 verwiesen, die einen Längsschnitt durch die Großversuche mit den Verpressebenen zeigen. Bei einem Verpressen über perforierte Schläuche besteht jedoch der Nachteil, dass das Injektionsgut immer nur an einer oder 2 Stellen austritt. Dies sind die Stellen, bei denen der Verpressdruck am leichtesten „abgebaut" werden kann, also die Stelle, an der z.B die Spaltweite im Kontaktbereich am größten ist. Bei einer Injektion über Verpressschläuche kann somit nicht der gesamte Querschnitt verpresst werden, sondern immer nur ein kleiner Bereich des Querschnittes, nämlich der Bereich im Querschnitt mit der größten Spaltweite, also mit der größten Permeabilität. Damit wird zwar eine Verringerung der Gesamtpermeabilität des Querschnittes erreicht. Ob diese Verringerung jedoch ausreichend ist, kann nicht vorausgesagt werden.

Bei der Verpressung von Klüften/Spalten/Porenräumen muss zudem – wie in der Injektionstechnik seit über 50 Jahren bekannt – zwischen

- der „Erstverpressung" und
- „Nachverpressungen"

unterschieden werden. Eine Erstverpressung hat immer den Zweck, eine Kluft / Spalt / Poren möglichst vollständig zu verfüllen. Durch eine Erstverpressung kann jedoch keine Verspannung der beiden sich berührenden Teile (hier: Gebirge und MgO-Beton im Kontaktbereich) erzielt werden, da kein „Widerlager" für das Injektionsmittel vorhanden ist. Eine Verspannung des Gebirges, die zu einer Normalspannung im Kontaktbereich führt, kann nur durch Nachverpressungen erreicht werden. Bei diesen Nachverpressungen wird durch hohen Druck des Injektionsmaterial der Kontaktbereich wieder „aufgesprengt", es bilden sich neue Wegsamkeiten, die sofort wieder durch das Injektionsmaterial geschlossen werden. Dieser Vorgang ist unter den Begriffen „rock-fracturing" und „soil-fracturing" bekannt. Voraussetzung für Nachverpressungen ist, dass

(1) die Verpressung mit Manschettenrohren erfolgt (da erst durch das gezielte Anfahren jeder einzelnen Manschette im 0,5 m oder 1 m Abstand, jeder Bereich um die Manschette verpresst werden kann),

(2) das Injektionsmittel aus den Manschettenrohren nach jedem Verpressvorgang wieder ausgespült werden kann, damit einige Tage nach dem Erhärten des Verpressmittels eine neue Verpressung („Nachverpressung") erfolgen kann.

In besonderen Maße war der Einsatz von Injektionen beim Großversuch GV1 angezeigt, weil wegen der nicht vermeidbaren Schädigung der KF durch hohe Temperaturen bei Einbau des MgO-Ortbetons (5-1-8-Phase) und der physikalisch unvermeidbaren Kontraktion des MgO-Betonkörpers beim Abkühlen mit erhöhten Permeabilitäten im Bereich der KF gerechnet werden musste. Im Ergebnis des MgO-Ortbetoneinbaus wurden Wegsamkeiten im mm-Bereich in der Kontaktzone festgestellt, die sich in erhöhten Permeabilitäten der Kontaktzone äußerten (s. TB 4.2). Beim GV1 wurde versucht, diese Wegsamkeiten mittels 2K-Bitumeninjektionen abzudichten. Dies ist jedoch auf Grund der für das Injektionsmittel großen Spaltweite und auf Grund der des nur einmaligen Verpressens über perforierte Schläuche nicht gelungen. Das Injektionsmittel hat nur einen geringen Teil des Querschnittsumfanges verpresst. Dies ist daran zu erkennen gewesen, da das Injektionsmittel an der Vorderseite der jeweils betonierten Scheibe nicht längs des Umfangs der gesamten Querschnittsfläche, sondern meist nur ist in einem Bereich von ca. 3 bis 5 % des Umfanges der Querschnittsfläche austrat. Die Wirksamkeit der Injektion von 2K-Bitumen beim GV1 war deshalb sehr eingeschränkt.

Beim Großversuch GV2 wurden Injektionen mit 2K-Bitumen und mit Denepox-40 kombiniert. Dazu wurde in mehreren Messebenen 2k-Bitumen injiziert. Nach dem Abkühlen des 2K-Bitumens wurde in dazwischen liegenden Messebenen Denepox-40 injiziert. Das Dichtelement beim Großversuch 2 wurde aus Spritzbeton erstellt. Bei der Spritzbetonbauweise sind die Temperaturen an der Kontur wesentlich geringer als bei der Ortbetonbauweise.. Die Temperaturen an der Kontur bei Spritzbetonbauweise lagen unter 50°C. Deshalb wurde die Kontur nicht geschädigt. Während und nach Fertigstellung des GV2 bzw. vor und nach dem Verpressen von 2K-Bitumen und Denepox-40 erfolgten Permeabilitätstests mit Inertgas über die Druckkammer (siehe Teilbericht 4.2). Durch die kombinierte Verpressung von 2-K-Bitumen und Denepox in alternierenden Messebenen konnte eine Verringerung der Permeabilität um 3 Zehnerpotenzen nachgewiesen werden. Bei den Permeabilitätstests wurden relativ niedrige Drücke von 1 bar bis 3 bar aufgebracht (TB 4.2).

Trotz dieser erheblichen Verringerung der Permeabilität des Gesamtsystems musste von einem Permeabilitätstest mit Lösung und einem Permeabilitätstest mit höheren Drücken (Gas oder Lösung) abgesehen werden, da das Gebirge noch nicht ausreichend aus das Spritzbetonelement aufgekrochen war und damit die Normalspannung im Kontaktbereich noch zu gering war. Damit hätte das Normalspannungskriterium (Gas- bzw. Lösungsdruck p kleiner Normalspannung σ auf Kontaktfläche) nicht eingehalten werden können.

Die Injektionen mit 2-K-Bitumen und mit Denepox wurden bei den Versuchen GV1 und GV2 jeweils baubegleitend durchgeführt. Wegen des begrenzten Injektionserfolges wurde beim GV1 erwogen, die offenbar im mm-Bereich liegenden Wegsamkeiten in der KF durch nachträgliche Injektionsmaßnahmen abzudichten. Dazu wurden Vorversuche am Kleinversuch KV1 mit konventionellen Bohrlochpackern und alternativ dazu mit Manschettenrohren getestet (siehe TB 4.1 und TB 3.2). Als Ergebnis wurde festgestellt, dass die wirksame Reichweite der Injektion bei Bohrlochpackern wesentlich kleiner als 30 cm ist. Um eine wirksame Abdichtung um die Bauwerkskontur zu erreichen, müsste bei einer Injektion mit Bohrlochpackern der Abstand der Injektionsbohrlöcher deutlich geringer als 30 cm sein. Das ist bei einem Bohrlochkranz in der KF am GV1-Versuchskörper bei den gegebenen Dimensionen technisch nicht realisierbar.

Im Kleinversuch KV1 wurde noch die Anwendung von Manschettenrohren im Salzgebirge getestet. Jedoch hatte der bei den Versuchen eingesetzte Mörtel auf MgO-Basis zur Ringraumverfüllung zwischen Manschettenrohr und Gebirge eine so große Festigkeit, so dass der Mörtel beim Einpressen des eigentlichen Injektionsmittels (ebenfalls auf MgO-Basis) nicht mehr ausgesprengt werden konnte. Für die Anwendung von Manschettenrohrinjektionen muss deshalb noch ein geeigneter MgO-Ringraummörtel entwickelt werden.

Zudem müssen noch geeignete, im Verarbeitungszustand niedrigvioskose Injektionsmaterialien entwickelt werden, die aus dem Manschettenrohr wieder gespült werden können, damit Nachverpressungen (= Mehrfachinjektionen) möglich sind. Denepox 40 ist zwar niedrigviskos im Verarbeitungszustand, kann aber nicht wieder aus dem Manschettenrohr gespült werden.

Zusammenfassend wird festgestellt:

(1) Die Anwendung von 2K-Bitumen und Denepox 40 als Injektionsmittel bei einer Erstverpressung hat sich bewährt. Dies gilt vor allem wenn 2K-Bitumen in verschiedenen Injektionsebenen und in dazwischen liegenden Injektionsebenen Denepox 40 verpresst wird.

(2) Mit 2K-Bitumen und Denepox 40 kann bisher habe nur eine Erstverpressung über perforierte Injektionsschläuche vorgenommen werden.

(3) Bei einer Erstverpressung über Injektionsschläuche kann jedoch systembedingt nur „die schwächste Stelle“ hinsichtlich der Durchlässigkeit, aber nicht die gesamte Umfangsstrecke, längs der ein Injektionsschlauch eingelegt ist, verpresst werden.

(4) Eine Abdichtung des gesamten Querschnittsumfanges bei einem Dichtelement, kann nur mit

- Manschettenrohren/Manschettenschläuchen durch Mehrfachver-pressungen erfolgen (da dabei jede Stelle des Querschnittsumfanges abgedichtet werden kann),
- mit einem geeigneten, wieder aufsprengbaren Ringraummörtel erfolgen,
- mit einem wieder aus dem Manschettenrohr/Manschettenschlauch spülbaren Injektionsmittel erfolgen.

(5) Zur Erfüllung der unter (4) genannten drei Bedingung müssen

- noch ein geeigneter Ringraummörtel entwickelt werden (Forschungsbedarf)
- neue, im Verarbeitungszustand wieder ausspülbare, langzeitstabile Injektionsmittel entwickelt werden (Forschungsbedarf)
- Verpressarbeiten mit Manschettenrohren/Manschetten-schläuchen im Salzgebirge großtechnisch getestet werden (Forschungsbedarf).

5.3 In situ-Tests zur Eignungsprüfung der entwickelten Behandlungs-konzepte

5.3.1 Allgemeine Zielstellungen

Im Rahmen der hydraulischen messtechnischen Begleitung wurde die Permeabilität unterschiedlicher Komponenten des Dichtsystems und ggf. des Gesamtbauwerkes gemessen. Hierzu wurden in-situ-Permeabilitätstests mit verschiedenem Versuchsaufbau, entsprechend der Vorgaben der Versuchsdurchführenden, durchzuführen. Die zu begleitenden Versuche hatten unterschiedliche Maßstäbe vom Bohrlochversuch bis hin zum Bauwerkstest (s. TB 4.2).

Als Strömungsfluid wurde überwiegend mit Tracergas dotierte, trockene Druckluft eingesetzt, um somit zusätzlich zu den quantitativen auch qualitative Aussagen (z.B. zur Lage strömungsaktiver Bereiche) aus den Tests abzuleiten. Mit diesem Strömungsfluid sollte

zunächst die chemische Beeinflussung des anstehenden Gebirges durch Lösungen vermieden werden.

Für Messungen mit Lösungen wurde bei den Versuchen $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung verwendet.

5.3.2 Untersuchungsergebnisse mit dem Dichtmaterial Denepox 40

Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dichtmaterial Denepox 40 sind im Einzelnen in TB 4.2 dargestellt. Abbildung 27 zeigt das Schema der Injektionsversuche mit Denepox 40 in Bohrlöchern.
Aus den Injektionsversuchen in Verbindung mit den Permeabilitätstests vor und nach der Epoxidharzinjektion lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Versuche an den Oberflächenpackern ableiten:

- Die Permeabilitätsreduzierung durch die Injektion des Epoxidharzes Denepox 40 lag in der Größenordnung von 1 bis 5 Zehnerpotenzen.
- Je höher das Anfangsniveau der Permeabilität ist, desto größer war i.d.R. die Permeabilitätsreduzierung.
- Die Versuche mit Epoxidharzvoranstrich wiesen ein um 1 bis 2 Zehnerpotenzen höheres Anfangsniveau der Permeabilität auf als die Versuche ohne Epoxidharzvoranstrich.

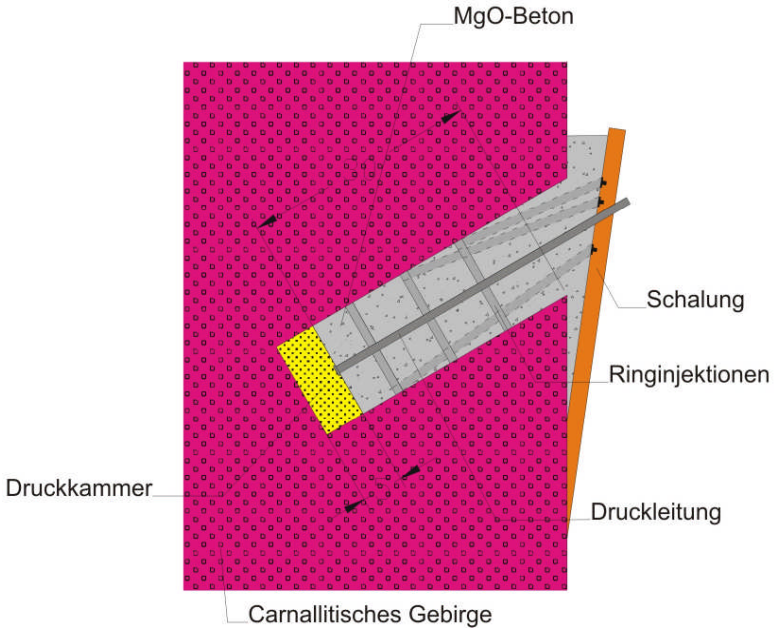

Abbildung 27: Schematischer Versuchsaufbau der Injektionsversuche in Bohrungen

Für die Injektionsversuche in kurzen Bohrungen leiten sich ähnliche Schlussfolgerungen ab. Allerdings wird die erhöhte Anfangspermeabilität des Versuches B1-KAL (TB 4.2) auf Grund eines Risses in der Verwitterungszone der Bohrung (Austritt von Epoxidharz im Gebirge) zurückgeführt.

Generell konnte mit den Versuchen nachgewiesen werden, dass durch die Injektion des Epoxidharzes Denepox 40 in den Kontaktbereich zwischen MgO-Baustoff und Carnallititgebirge eine Permeabilitätsreduzierung des Gesamtsystems erreicht werden kann.

5.3.3 Untersuchungsergebnisse mit dem Baustoff MgO-Beton

Prinzipiell wurden zwei Gruppen von in situ durchgeführten Permeabilitätsuntersuchungen für den MgO-Beton realisiert:

- Ermittlung der Permeabilitätsverhältnisse im MgO-Beton,
- Ermittlung der Permeabilität von MgO-Beton im Kontakt zum Carnallititgebirge.

Für die in-situ-Permeabilitätsversuche im MgO-Beton wurden Bohrlochpackertests angewendet, wogegen die Anbindung des MgO-Betons an das Gebirge mittels Oberflächenpackern aus Baustoff bzw. direkt an einzelnen Betonierabschnitten des Versuchsbauwerkes untersucht wurde.

Die zugehörigen Versuchsschemen sind in den Abbildungen 28, 29 und 30 dargestellt.

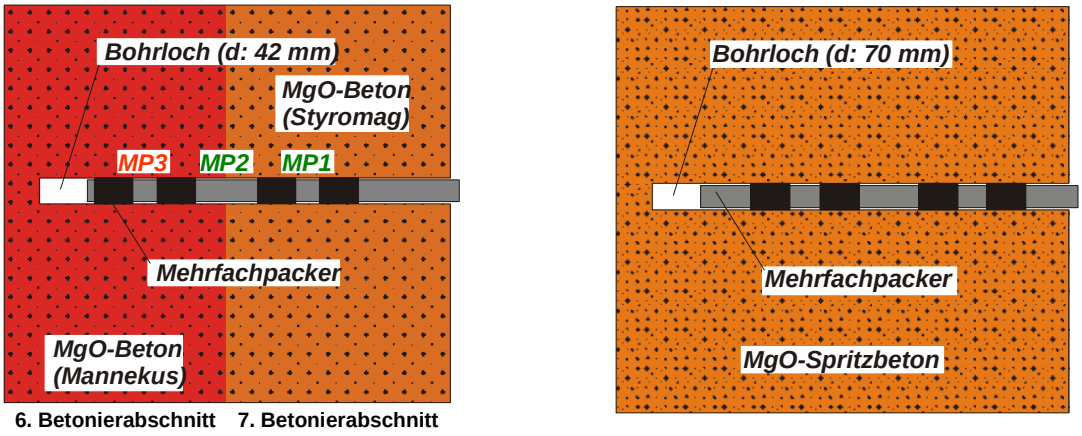

Abbildung 28: Schematischer Versuchsaufbau für Bohrlochpackertests im MgO-Beton (TB 4.2)

Basierend auf den Ergebnissen der in situ-Permeabilitätsuntersuchungen im MgO-Beton ergeben sich folgende Schlussfolgerungen (TB 4.2):

1) MgO-Ortbeton (GV1, Abschnitt 6):
   - In situ ermittelte Gaspermeabilität von $1{,}7*10^{-18}$ m² für die Rezeptur St-MB10.2 korreliert mit an Rückstellproben gemessenen Laborwerten von $5*10^{-19}$ m² bis $1*10^{-17}$ m².
   - Lokal stark erhöhte Permeabilitäten in der Größenordnung > $1+10^{-13}$ m² entlang von Betonierfugen.
2) MgO-Spritzbeton (GV2, Abschnitt 6):
   - Die Gaspermeabilität des Spritzbetons wurde im Bereich $2{,}2*10^{-19}$ m² bis $2{,}1*10^{-18}$ m² ermittelt.
   - Der Spritzbeton hat eine mittlere Porosität von 6,5 Vol.-%.
   - Ca. 500 d nach der Herstellung des Spritzbetons liegt der mittlere Lösungsgehalt in der Größenordnung von ca. 0,2 Ma.-%; dies entspricht einer mittleren Porenraumsättigung mit Flüssigkeit von ca. 4 Vol.-%.
   - für die geringe mittlere Lösungssättigung kann die in B35 ermittelte Gaspermeabilität ($2{,}2*10^{-19}$ m²) als durchaus repräsentativ für die Permeabilität des MgO-Spritzbetons im untersuchten Einbauzustand angesehen werden.
   - Für die in der Kernansprache identifizierten Bereiche mit Spritzfugen wurden durch die Permeabilitätsmessung mit Gas keine erhöhten Permeabilitäten nachgewiesen.

- In Wiederholungsmessungen an zwei Messpunkten (MP2 und MP3) wurde nach ca. 15 d eine Reduzierung der Gaspermeabilität um max. eine halbe Zehnerpotenz festgestellt.
- Im Messpunkt 1 wurde die integrale Lösungspermeabilität des Spritzbetons zeitabhängig in der Größenordnung von $2{,}5*10^{-19}$ m² bis $6{,}2*10^{-16}$ m² ermittelt.
- Bei Permeabilitätstests mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung kommt es zu Sekundärreaktionen des Magnesiabinders, die den für die Permeabilitätsermittlung erfassten Druckverlauf eines Strömungsprozesses beeinflussen; eine Quantifizierung dieses Einflusses ist aus den vorliegenden Messungen nicht möglich.
- Die Permeabilitätstests mit Lösung lassen darauf schließen, dass sich die Lösungspermeabilität im Baustoff im Kontakt zu der $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung verringert.
- In MgO Spritzbeton reduziert sich das integral in einer 1 bis 2 m langen Bohrung ermittelte Permeabilitätsniveau bei einem Versuch mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung innerhalb von ca. 480 d von $6{,}2*10^{-17}$ m² auf $2{,}5*10^{-19}$ m², was mit einer Nachreaktion des Betons im Kontakt mit der Versuchslösung in Verbindung stehen könnte.
- Das Permeabilitätsniveau (integral) für MgO-Spritzbeton erreicht nach ca. 1 a Werte um $2*10^{-19}$ m² für Gas und Lösung.

Die Permeabilitätsuntersuchungen im Kontaktbereich MgO-Beton ⇔ Gebirge wurden sowohl an freien Gebirgsoberflächen mit Hilfe von Oberflächenpackern (Abbildung 29) als auch an den Kontaktflächen der Versuchskörpern der Großversuche mit dem umgebenden Gebirge (Abbildung 30) durchgeführt.

Aus den auswertbaren und technisch gelungenen Permeabilitätstests können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Im Kontaktbereich zwischen MgO-Ortbeton (GV1) und Carnallititgebirge beträgt die Permeabilität > $1*10^{-13}$ m² direkt nach Fertigstellung des Bauwerkes bei noch nicht aufgekrochenem Gebirge.
- Das Konzept der in-situ-Permeabilitätstests über die Beaufschlagung von einbetonierten Druckleitungen besitzt zwei wesentliche Nachteile:
  (1) es ist sicherzustellen, dass kein Baustoff in die Messröhrchen eindringt und
  (2) es ist sicherzustellen, dass keine Undichtheiten entlang des Kontaktes zwischen Baustoff und Messröhrchen existieren.
- Das Messkonzept ist im Ortbeton besser einsetzbar als im Oberflächenpacker aus Spritzbeton. Im Ortbeton bestehen z.T. Unsicherheiten über den Testbereich (z.B. Kontaktbereich, MgO-Suspension bzw. Betonschlempe oder konturnahes Carnallititgebirge). Im Oberflächenpacker aus MgO-Spritzbeton war es in der Form nicht einsetzbar.

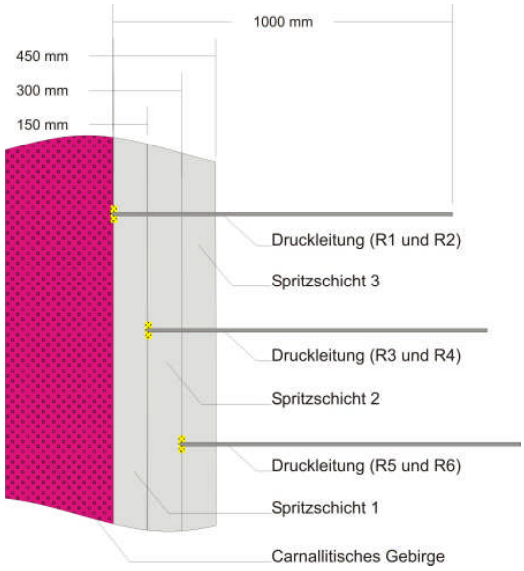

Abbildung 29: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung des Kontaktbereiches am Oberflächenpacker aus MgO-Spritzbeton

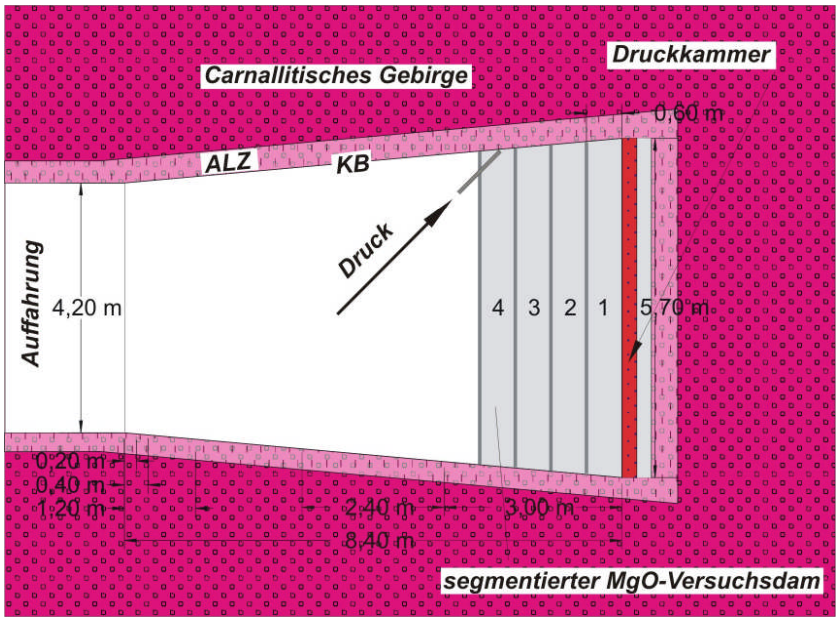

Abbildung 30: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kontaktfuge am GV1

5.3.4 Pneumatische Vortests am Dichtbauwerks-Element

Die pneumatischen Vortests (Druckluft-Beaufschlagung des Bauwerks vor der Lösungsdruck-Beaufschlagung) an den Versuchsbauwerken GV1 und GV2 ermöglichten Aussagen zu folgenden Sachverhalten (TB 4.2 und TB 7):

- Effektive integrale Systempermeabilität gegenüber Gas: Mit dem Einbau des Magnesiabinders liegt Feuchtigkeit im Verschlussbauwerk und dem umgebenden Salinargebirge vor. Dieser Lösungsgehalt bzw. die daraus resultierende Flüssigkeitssättigung des Porenraumes im Bauwerk und des umgebenden Gebirges bestimmen die effektive Gasströmung. Trotz dieser Beeinflussung zeigen Messungen an

vergleichbaren Bauwerken, dass aus den pneumatischen Vortests wichtige Schlussfolgerungen über das Permeabilitätsniveau des Gesamtsystems abgeleitet werden können.

- Die Beurteilung lokaler Wegsamkeiten im Verschlussbauwerk ist durch den Einsatz eines Tracergases möglich.
- Die Auswirkungen von Vergütungsmaßnahmen im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge lassen sich qualitativ beurteilen, indem vergleichende pneumatische Vortests vor und nach einer Vergütungsmaßnahme (Injektion) des Kontaktbereiches durchgeführt werden.

Aus den pneumatischen ***Vortests am GV1*** lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Das Versuchsbauwerk GV1 besitzt trotz Vergütung des Kontaktbereiches (2K-Bitumen) ein hohe Gesamtpermeabilität:
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $4*10^{-11}$ m² bis $6*10^{-11}$ m²,
  - integral für das Versuchsbauwerk: Größenordnung von ca. $1*10^{-12}$ m² bis $2*^{-12}$ m²

  Bei einer integralen Gaspermeabilität im Kontaktbereich in der Größenordnung von $4*10^{-11}$ m² bis $6*10^{-11}$ m² und einer Bauwerkslänge von bis zu 8,4 m ist davon auszugehen, dass der gesamte Bauwerksabschnitt getestet wurde. Dies wird durch die Leckagen bestätigt, welche durch die unmittelbare, umläufige Detektion von Tracergas auf der Luftseite festgestellt wurden.
- Das Permeabilitätsniveau integral über einen 0,04 m breiten, umläufigen Kontaktbereich (ca. $4*^{-11}$ m² bis $6*10^{-11}$ m²) ist wesentlich größer als das des konturnahen Carnallititgebirges (Größenordnung um $1*10^{-15}$ m²).
- Über einen Zeitraum von ca. 653 d konnte keine Veränderung im Permeabilitätsniveau des Versuchsbauwerkes festgestellt werden.

Basierend auf den Ergebnissen und den Beobachtungen der pneumatischen Vortests können für das ***Versuchsbauwerk GV2***, ein aus MgO-Spritzbeton im Carnallititgebirge errichtetes Abdichtbauwerk, folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden (TB 4.2):

- Bei einem ersten Test (PV1) nachdem nur 2, 5 m des Bauwerkes erstellt waren wurden folgende Permeabilität festgestellt.:
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $2*10^{-12}$ m²
  - integral für das Bauwerk: Größenordnung von ca. $2,1*10^{-14}$ m²

  Verglichen mit dem Permeabilitätsniveau des Versuchsbauwerks GV1 (s.o.) ergibt sich ein um ca. zwei Zehnerpotenzen niedrigeres Permeabilitätsniveau für den unvergüteten Spritzbeton im Vergleich zum vergüteten Ortbetonbauwerk.
- Durch eine einzelne Injektion von 2K-Bitumen konnte das Permeabilitätsniveau nur geringfügig reduziert werden (2,5 m Bauwerkslänge, PV2).
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $1,5*10^{-12}$ m²
  - integral für das Bauwerk: Größenordnung von ca. $1,6*10^{-14}$ m²

  Bei einer integralen Gaspermeabilität im Kontaktbereich in der Größenordnung von $1,5*10^{-12}$ m² bis $2*10^{-12}$ m² und einer Bauwerkslänge von bis zu 2,5 m ist davon auszugehen, dass der gesamte Bauwerksabschnitt getestet wurde. Dies wird durch die Leckagen bestätigt, welche durch die unmittelbare, umläufige Detektion von Tracergas auf der Luftseite festgestellt wurden.
- Durch eine einzelne Injektion von Epoxidharz Denepox 40 konnte das Permeabilitätsniveau um ca. 2,5 Zehnerpotenzen (Faktor ca. $2*10E^{-3}$) reduziert werden (3,6 m Bauwerkslänge, PV4).
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $3*10^{-15}$ m²

- integral für das Bauwerk: Größenordnung von ca. $4*10^{-17}$ m²

- Ca. 36 d (PV3) nach der Bitumen- und ca. 49 d (PV5) nach der Epoxidharzinjektion kam es zur Erhöhung des Permeabilitätsniveaus. Diese wurde nicht durch ein abruptes Ereignis hervorgerufen. Ob als Ursache für diese Permeabilitätserhöhung ein Fortschreiten von Verwitterungs- bzw. Korrosionsprozessen im Kontaktbereich bei einem noch relativ kurzen Bauwerksabschnitt verantwortlich ist, kann aus dem pneumatischen Vortest nicht abschließend beantwortet werden.
- Durch die wiederholte Injektion von Epoxidharz Denepox 40 konnte das in PV4 erreichte Permeabilitätsniveau bis zum Ende der Bauwerkserstellung wieder erreicht werden (PV6-8).
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $1*10^{-15}$ m²
  - integral für das Dichtungssystem: Größenordnung von ca. $3*10^{-17}$ m²

  Dieses Permeabilitätsniveau konnte auch bis zu 50 d (PV9 und PV10) nach der letzten Vergütungsmaßnahme (4. und 5. Injektion von Denepox 40) nachgewiesen werden.

  Bei einer integralen Gaspermeabilität im Kontaktbereich in der Größenordnung von $1*10^{-15}$ m² bis $3*10^{-15}$ m² und einer Bauwerkslänge von bis zu 10,25 m ist davon auszugehen, dass das ermittelte Permeabilitätsniveau lediglich für einen druckkammerseitigen Teilbereich des Bauwerkes gilt. Diese Schlussfolgerung wird dadurch bestätigt, dass über den Messzeitraum keine Leckagen durch luftseitige Detektion von Tracergas festgestellt wurden.
- Durch die Erhöhung des Prüfdruckes auf ca. das Doppelte des maximal am Bauwerk gemessenen Kontaktdruckes (PV11) kam es zu einer Erhöhung des integralen Permeabilitätsniveaus um den Faktor ca. 5.
  - integral für den Kontaktbereich: Größenordnung von ca. $2*10^{-14}$ m²
  - integral für das Dichtungssystem: Größenordnung von ca. $2*10^{-16}$ m²

  Durch diese Erhöhung des Prüfdruckes wurde bewusst das Normalspannungskriterium verletzt.

  Bei einer integralen Gaspermeabilität im Kontaktbereich in der Größenordnung von $2*10^{-14}$ m², einer Bauwerkslänge von bis zu 10,25 m und der lokal begrenzten, luftseitigen Detektion von Tracergas ist davon auszugehen, dass die strömungstechnische Wirkung über die gesamte Bauwerkslänge durch lokal vorhandene Permeabilitäten > $2*10^{-14}$ m² bestimmt wird.

  Basierend auf der durch Messung des Kontaktdruckes dokumentierten, geomechanischen Einspannung des Versuchsbauwerkes muss von einem lokal begrenzten Versagen im vergüteten Kontaktbereich durch Verletzung des Normalspannungskriteriums ausgegangen werden.
- An dem im PV11 erreichten integralen Permeabilitätsniveau gab es innerhalb eines Zeitraumes von ca. 97 d kaum Veränderungen, so dass davon ausgegangen werden muss, dass ohne Veränderung der geomechanischen Einspannung des Bauwerkes derzeit keine weitere Permeabilitätsreduzierung zu erwarten ist.

6. Großmaßstäbliche Untersuchungen von Funktionselementen

6.1 Zielstellung

Die geplanten großmaßstäblichen Untersuchungen stellen einen wesentlichen Bestandteil des Forschungsvorhabens dar, da sie einen Beitrag liefern sollen, das Zusammenwirken und die gegenseitige Wechselwirkung einzelner Funktionen und Materialien unter in situ Bedingungen und in großen, einem späteren komplexen Bauwerk vergleichbaren Dimensionen zu zeigen. Dabei ist nicht allein die Erweiterung der Dimension von Bedeutung,

mit dem Übergang auf sehr große Dimensionen können z.T. prinzipiell neuartige Verhaltensweisen auftreten, die von wesentlicher Bedeutung für die Funktionsweise eines Abdichtbauwerkes sein können.

Die Großversuche wurden zunächst auf der Basis der Ergebnisse des Teils 1 des Vorhabens [17] geplant (TB 1) und danach den eigentlichen Tests unterworfen (TB 7).

Im Arbeitspaket AP1 (s. TB 1) wurden Konzepte für 3 Großversuche an Funktionselementen dargelegt. Die Konzepte dieser 3 Großversuche haben zum Ziel:

- Errichtung und Test von MgO-Beton-Pfropfen
- Möglichkeiten und Nachweis einer Kontaktbereichsabdichtung (und Vergütung des konturnahen Gebirgsbereiches)
- Test eines Asphaltelementes

In die Planung und Realisierung der Großversuche flossen die im TB 4 beschriebenen Ergebnisse der Voruntersuchungen zur Abdichtung der Kontaktzone und des unmittelbar daran anschließenden Gebirgsbereiches (ALZ) in der Einbauzone und die im TB 5 beschriebenen Ergebnisse der Voruntersuchungen der Hauptbaumaterialien MgO-Beton und Asphalt (TB 5.1 und 5.2) ein.

Das entwickelte Grundkonzept (s. Abschnitt 10) basiert auf einzelnen Funktionselementen. Diese sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Funktionselemente langzeitstabiler Streckenverschlüsse im Carnallitit

Element	**Funktion**	**Untersuchungsziele**
3-Zonen-Vorschüttung	Einstellung der Lösungszusammensetzung (tachyhydritgesättigte $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung	- Zusammensetzung der austretenden Lösung
Schotter-Gel-Vorbau-Element	Depot für tachyhydritgesättigte $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung	- Zusammensetzung der austretenden Lösung
	Stützelement; Widerlager	- Lagerungsdichte - Winkel der inneren Reibung - Böschungswinkel
Hauptelement MgO-Beton	Lastabtrag	- Festigkeitsparameter - Haftfestigkeit am Gebirge
	Dichtheit (Querschnitt)	- Permeabilität (Lösung, Gas) - Fehlen hydraulisch wirksamer Risse
	Kontaktfugenabdichtung	- Kontaktdruck - Permeabilität (Lösung, Gas)
Injektion	Kontaktfugenabdichtung	- Permeabilität (Lösung, Gas)
	Vergütung des konturnahen Gebirges	- Permeabilität (Lösung, Gas)
Asphaltelement	Dichtheit (Querschnitt)	- Permeabilität (Lösung, Gas)
	Kontaktfugenabdichtung	- Permeabilität (Lösung, Gas) - Kontaktdruck
Widerlagerelemente (ggf. auf Hartgesteinsschotterbasis)	Stützwirkung	- Lagerungsdichte - Winkel der inneren Reibung - Böschungswinkel

Kernstück der Untersuchungsziele ist der prinzipielle Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der Bauwerksintegrität. Die Bauwerksintegrität beinhaltet folgende Nachweise [4, 17]:

- Nachweis der Tragfähigkeit,
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (Rissbeschränkung, Verformungsbeschränkung, Erosions- und Suffosionssicherheit)

Betrachtet man die Untersuchungsziele für die einzelnen Funktionselemente, so resultieren daraus folgende Hauptanforderungen an in situ Großversuche:

1. Errichtung und Untersuchung der exemplarischen Hauptelemente aus MgO-Beton,
2. Untersuchung der Wirksamkeit der vorgesehenen Injektionsverfahren zur Abdichtung der Kontaktfuge und des konturnahen Gebirgsbereiches,
3. Errichtung und Untersuchung eines redundanten und diversitären Asphaltelementes

Die Untersuchung der Wirksamkeit der Vorbauelemente (3-Zonen-Vorschüttung, Tachyhydritdepot auf Gelbasis) erfolgt durch Labor- und mittelmaßstäbliche Untersuchungen an wesentlichen funktionsbestimmenden Teilen und durch in situ Kleinversuche. Einzelheiten der technischen Ausführung dieser Elemente sind Inhalt einer zukünftigen Ausführungsplanung.

Die Zielstellungen der im Rahmen von Großversuchen durchzuführenden in situ Tests von Funktionselementen werden nachfolgend erläutert.

Hauptelemente aus MgO-Beton

Als Grundmaterial für die Hauptelemente des zukünftigen Verschlusses wurde MgO-Beton ausgewählt [17, 18, 23]. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen sind Rezepturen für MgO-Ortbeton weiter entwickelt worden (Abschnitt 4). Eine zusammenfassende Erprobung der Realisierbarkeit der MgO-Ortbetontechnologie unter technischen Bedingungen erfolgt im Rahmen des Großversuches GV1. Den prinzipiellen Aufbau des GV1 zeigt Abbildung 31.

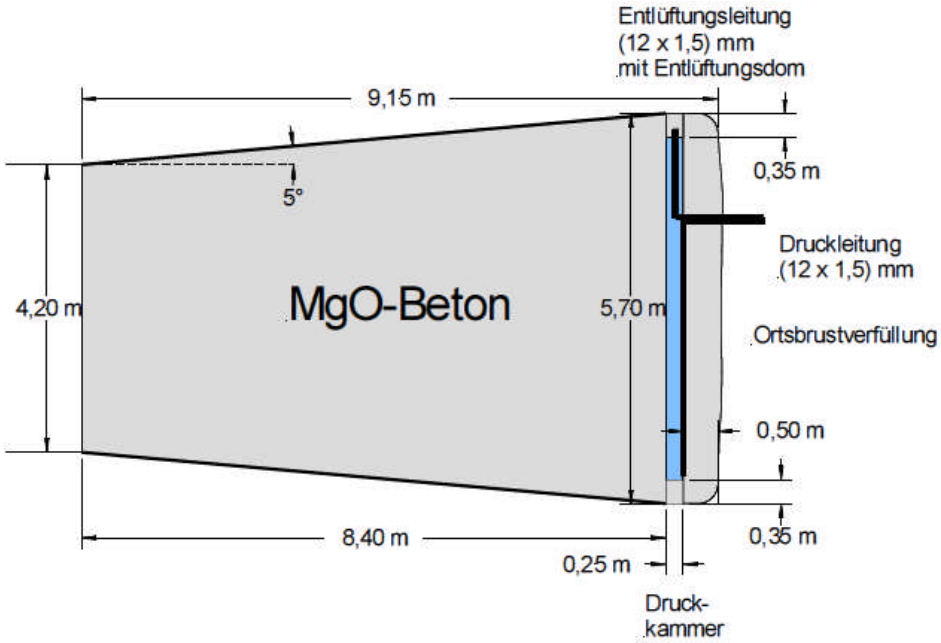

Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV1

Eine Alternative zur MgO-Ortbetontechnologie ist die MgO-Spritzbetontechnologie. Die Umsetzung der Spritzbetontechnologie für MgO-Beton und die Errichtung eines kompletten Dammkörpers nach diesem Verfahren ist ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Qualität

des vorgesehenen Hauptelementes zukünftiger Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Gebirge. Eine zusammenfassende Erprobung der Realisierbarkeit der MgO-Spritzbetontechnologie unter technischen Bedingungen erfolgt im Rahmen des Großversuches GV2. Einzelheiten der Planung und Ausführung des GV2 sind in den Teilberichten TB 1 und TB 7 aufgeführt. Den prinzipiellen Aufbau des GV2 zeigt Abbildung 32.

Neben der Herstellungstechnologie unterscheiden sich beide Großversuche auch in der Dammkörpergeometrie. Der Dammkörper des GV1 entspricht einem kegelstumpfförmigen Element mit einem Anstellwinkel von 5°, der Dammkörper des GV2 enthält ein um 60° verzahntes Widerlagerelement.

Beide Dammkörper sind gebirgsverbunden eingebaut.

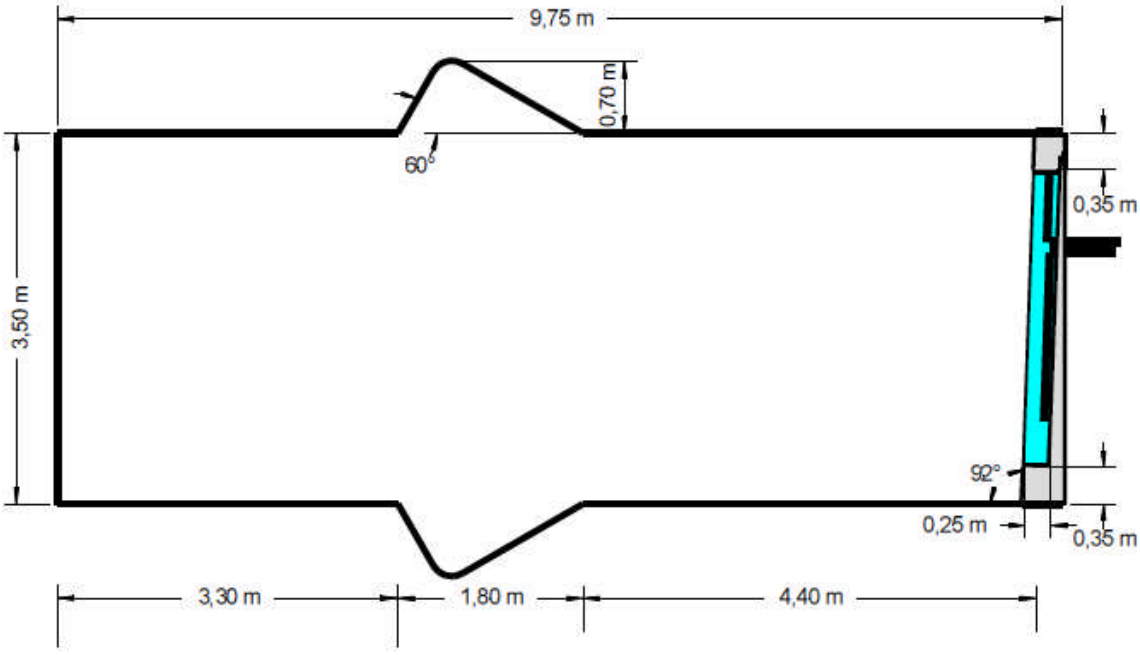

Abbildung 32: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV2

Injektionsverfahren

Ziel der Injektionsmaßnahmen ist die Abdichtung des Kontaktbereiches zwischen Verschlusselement (Dammkörper) und Gebirge sowie die Vergütung des konturnahen Gebirges (ALZ). Im Ergebnis umfangreicher Materialuntersuchungen (s. Abschnitt 5 sowie TB 4.1 und 4.2) wurden für die besonderen Bedingungen des leichtlöslichen Gebirges (CaT) neue Injektionsmaterialien vorgeschlagen. Bereits im Teil 1 des FuE-Vorhabens CARLA [17] wurde ein Zweikomponenten-Injektionsbitumen neu entwickelt [16].

Weiterhin wurden am Institut für Bergbau und Spezialtiefbau die in [15] dokumentierten Untersuchungen zur Auswahl von für die Bedingungen im Carnallitit geeigneten Kunststoffinjektionsmitteln durchgeführt. Als Vorzugsmaterial wurde im Ergebnis umfangreicher Eignungstests und In-situ-Versuche das Material Denepox 40 ausgewählt.

Aufgrund der positiven Ergebnisse sind beide Materialien und die dazu gehörigen Verpressverfahren in den Großversuchen GV1 (abschnittsweise Verpressung des Konturbereiches mit 2K-Injektionsbitumen) und GV2 (abschnittsweise Verpressung von Denepox 40 in Kombination mit 2K-Injektionsbitumen) eingesetzt worden.

Asphaltdichtelement

Im Rahmen des FuE Vorhabens 02C1124 "Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke" [21] wurde eine neuartige Asphaltmischung für Dichtelemente und ein Einbauverfahren für die Bedingungen eines wärmeempfindlichen Gebirges (z. B. Carnallitit) entwickelt. Im Vorhaben CARLA erfolgte die praktische

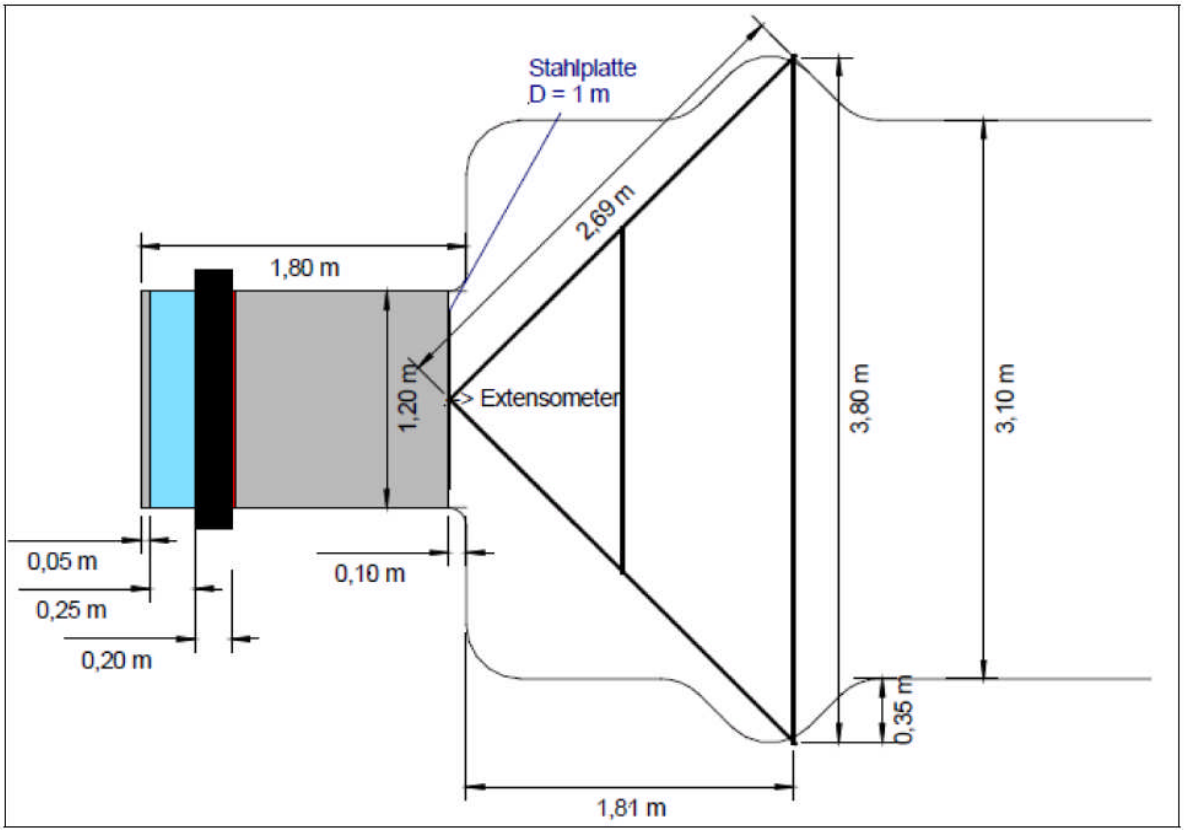

Abbildung 33: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV3; blau: Druckkammer (Korundsteine), schwarz: Asphaltelement, grau: MgO-Beton, rot: Druckkissen (beheizbar)

Umsetzung des neu entwickelten Verfahrens. Der Test des Asphalt-Elementes erfolgte im GV3.

Ziele des GV3 waren die Ermittlung der unter den vorliegenden Bedingungen erreichbaren Qualität des Asphaltdichtelementes und dessen Funktionstüchtigkeit. Einzelheiten der Planung und Ausführung des GV3 sind im TB 7 aufgeführt. Den prinzipiellen Aufbau des GV3 zeigt Abbildung 33.

Die Anordnung der Großversuche im Versuchsort VO3 ist in Abbildung 34 dargestellt.

6.2 Großversuch 1 (GV1)

6.2.1 Zielstellung

Im Großversuch 1 wurde erstmals im Maßstab 1:1 ein Pfropfen aus MgO-Beton als Ortbeton in situ hergestellt. In TB 5.1 und 7 wird über die Erprobung der Einbautechnologie und die Untersuchung des Abbindeverhaltens des MgO-Ortbetons im Einzelnen berichtet. Dazu gehört die logistische Absicherung für die Lieferung der Betonkomponenten (wesentliches Element des Qualitätsmanagements), einschließlich der Aufstellung eines Qualitätssicherungssystems für diese Baustoffe. Weiterhin werden die Anmischtechnologie,

die Einbautechnologie und die Temperaturentwicklung im Baukörper während des Abbindens betrachtet.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Versuchsgestaltung waren Maßnahmen zur Begrenzung der Temperaturentwicklung im Baukörper in situ durch die Hydratation, um der begrenzten Temperaturbeständigkeit des CaT (s. TB 9.2) so weit wie technologisch möglich Rechnung zu tragen. Die Temperaturbegrenzung wurde durch schrittweisen Aufbau des Betonkörpers in einzelnen vertikal stehenden Scheiben realisiert. Je nach den Ergebnissen der baubegleitenden Temperaturmessungen wurde die Scheibendicke variiert. Die Scheibendicke lag meist bei etwa 60 cm.

Eine schematische Zeichnung der inneren Struktur des Bauwerkskörpers des GV1 zeigt Abbildung 35.

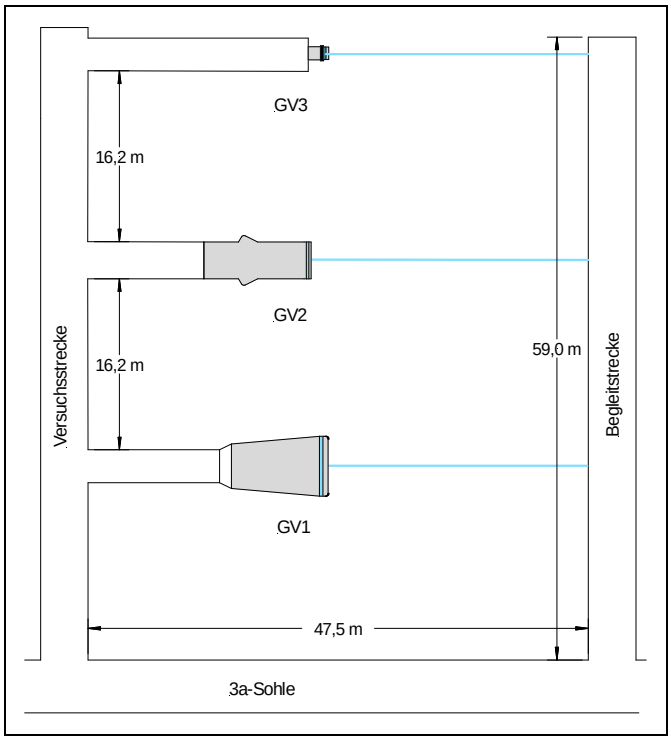

Abbildung 34: Lage und Anordnung der in situ Großversuche GV1, GV2 und GV3 im Versuchsort VO3 (Grundriss)

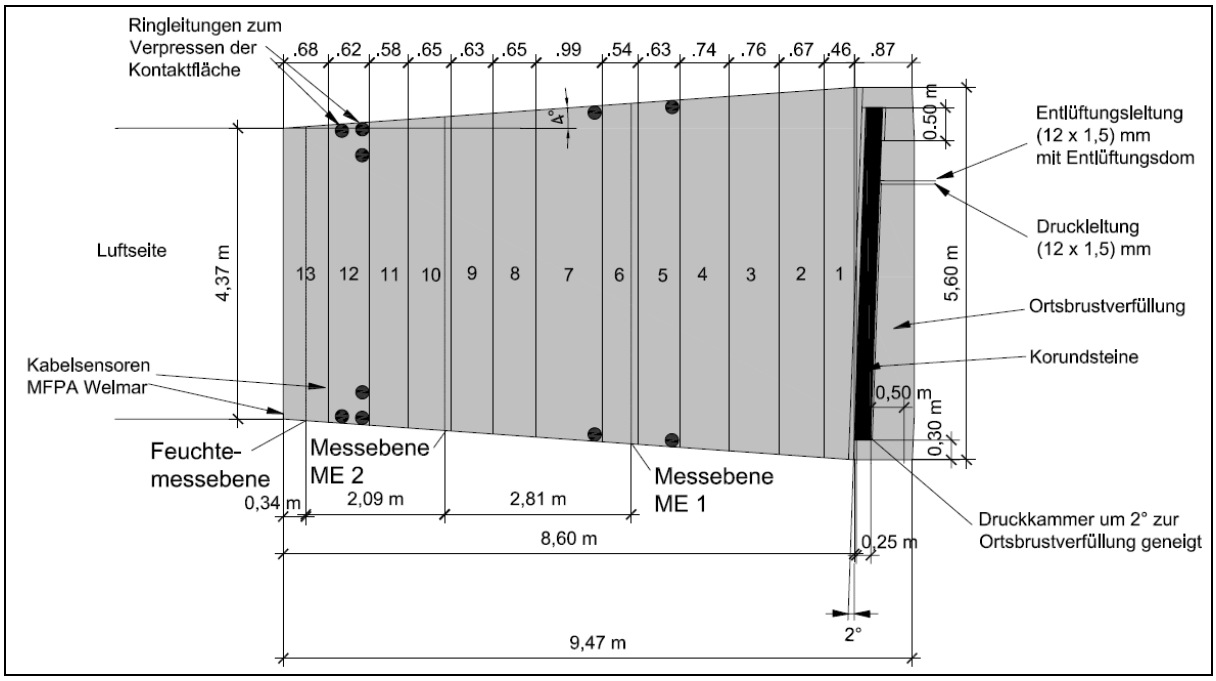

Abbildung 35: Schematische Darstellung eines Vertikalschnittes durch den Bauwerkskörper des GV1, einschließlich der Druckkammer in Längsrichtung

Über den Ausbruch der Einbaustelle des GV1 wurde ausführlich in [18] berichtet; Einzelheiten der Errichtung des Dammkörpers und der zugehörigen Bauelemente (z.B. Druckkammer inkl. der Druckleitungen, der Messeinrichtungen u.a.) sind im TB 7 dargelegt.

Zur Beherrschung der im CaT sensiblen Größe Temperaturentwicklung im Baukörper und in der KF wurden Variationen der Betonagenscheibendicke, der Mischungsbestandteile und der Varietäten des Mg-Grundstoffes durchgeführt. Ein typischer Temperaturverlauf ist in Abbildung 36 dargestellt.

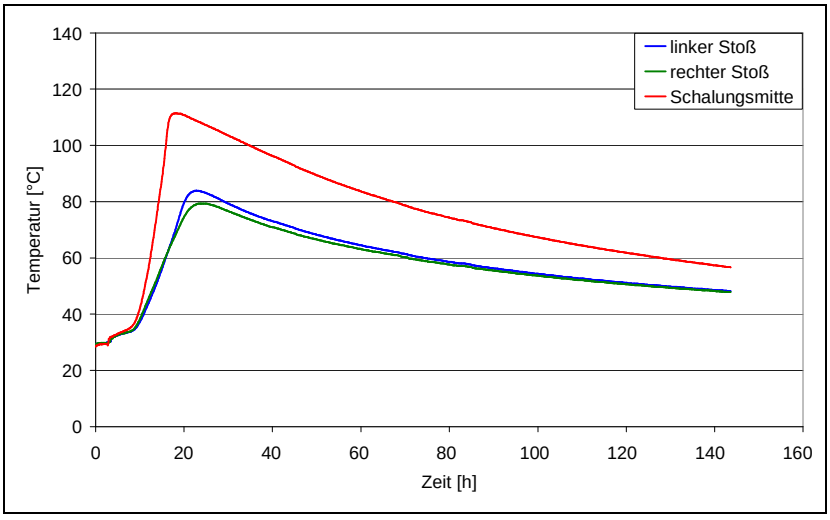

Abbildung 36: Temperaturmesswerte im 12. Betonierabschnitt

6.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des GV1

Wie sich durch die Probleme bei der Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei der Errichtung der ersten Betonierabschnitte gezeigt hat, war die anfangs erfolgte Qualitätssicherung des MgO zunächst noch nicht ausreichend. Daraufhin wurde ein zusätzliches

Qualitätssicherungsprogramm eingeführt, was sowohl auf MgO-Herstellerseite (Fa. Styromag) als auch im Rahmen der Wareneingangsprüfung durch das IfBuS angewendet wurde. Zusätzlich wurde eine MgO-Sorte eines anderen MgO-Herstellers (Firma Mannekus) eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass auf Lieferengpässe und Qualitätsschwankungen einzelner Hersteller kurzfristig reagiert werden kann. Allerdings können beim Einsatz von MgO-Sorten anderer Hersteller ebenfalls Qualitätsschwankungen auftreten, die sich bei bisher eingesetzten Produkten jedoch nicht zeigten.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt war die Schädigung der Kontaktfuge zwischen MgO-Beton und Gebirge durch die relativ hohe Abbindetemperatur des MgO-Ortbetons. Es wurde bei jedem Betonierabschnitt die Temperatur während des Abbindens im Konturbereich aufgezeichnet. Dabei wurde der direkte Einfluss des Bindemittelgehaltes auf die maximale Konturtemperatur bestätigt.

Weiterhin wurden numerische Berechnungen zur Klärung des Einflusses der Betonierabschnittsgröße auf die maximale Konturtemperatur durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass erst eine Reduzierung der Betonierabschnittsmächtigkeit auf etwa 0,20 m ... 0,40 m eine Temperaturerhöhung auf mehr als 60°C an der Kontur ausschließt. Bereits bei einer Abschnittsmächtigkeit von >0,60 m herrschen während der Erwärmungsphase annähernd adiabatische Verhältnisse, so dass eine wirtschaftlich vertretbare Reduzierung der Betonierabschnittsmächtigkeit zur völligen Vermeidung von temperaturinduzierten Gebirgsstoßschädigungen bei der verwendeten Technologie nicht möglich ist.

Durch die Temperaturerhöhung während des Abbindens konnten bei wenigen Betonierabschnitten Rissbildungen beobachtet werden. Alle Rissbildungen, die den Charakter eines Kernsprunges aufwiesen und nicht nur im Bereich von Betonierfugen auftraten, konnten unmittelbar nach dem Ausschalen der jeweiligen Betonierabschnitte nicht beobachtet werden. Die Risse traten erst etwa 24 h nach dem Ausschalen auf. Erst bei einer Ausschalzeit von mehr als etwa 3 Wochen konnte eine Rissbildung ausgeschlossen werden.

Die Abkühlung des Betonkörpers führt zu einer Rückdehnung bzw. zu einem Schrumpfen des Betonkörpers. Je nach Zugfestigkeit kann es zu einer Rissbildung im Betonkörper oder zu einem Abriss des Betonkörpers von der Gebirgskontur kommen. In horizontal positionierten Betonkörpern ist der Abriss von der Gebirgskontur besonders im Firstbereich wahrscheinlich.

Für die Bewertung der thermo-mechanischen Effekte sind numerische Berechnungen erforderlich. Diese sind mit MgO-Beton noch nicht durchgeführt worden. In einer groben Abschätzung lässt sich aus der Temperaturdifferenz von 90 K (bei einem thermischen Ausdehnungskoeffizient von ca. 10^{-5} K^{-1}) eine Rückdehnung von ca. 0,9 mm/m bestimmen. Daraus lässt sich ein Firstspalt mit 3-5 mm abschätzen.

Ein weiterer wesentlicher Punkt für die erfolgreiche Errichtung eines Streckenverschlussbauwerkes aus MgO-Beton im leichtlöslichen Salzgebirge ist die nachträgliche Vergütung der Kontaktfuge. Im Rahmen der Errichtung des Großversuches GV1 wurde die Kontaktfuge zum großen Teil mit 2K-Bitumen injiziert. Dabei wurde eine Gesamtmenge von 140 kg injiziert (s. TB 4.1). Bei dem nachfolgenden Großversuch GV2 wurden die Injektion mit dem relativ hochviskosen 2K-Bitumen mit niedrigviskoseren Injektionsmaterialien ergänzt, um neben den Wegsamkeiten mit größeren Spaltweiten auch geringmächtigere Wegsamkeiten in der Kontaktfuge abzudichten (TB 4.1).

Im Rahmen der Errichtung des Versuchsbauwerkes des GV1 konnte die Eignung der in [18] entwickelten MgO-Grundrezeptur MB10 für die technische Anwendung untertage bestätigt werden.

6.3 Großversuch 2 (GV2)

6.3.1 Zielstellung

Der GV2 hatte das hauptsächliche Ziel, die im Vorhaben entwickelte MgO-Spritzbetontechnologie in situ und im großen Maßstab zu prüfen. Obwohl eine rechnerische Überprüfung ergab, dass die Lagesicherheit des MgO-Spritzbetonkörpers auch bei zylindrischer bzw. prismatischer Ausführung gegeben gewesen wäre, wurde der Dammkörper sicherheitshalber mit einer Verzahnung hergestellt (s. Abbildung 33). Der dafür erforderliche Gebirgsausbruch konnte aus dem mittels Teilschnittmaschine aufgefahrenen Streckenstumpfes (Abbildung 34) mit Hilfe eines Minibaggers, der mit einem Fräskopf ausgestattet war, auf einen annähernd quadratischen Querschnitt von ca. 3,55 m Breite und 3,55 m Höhe nachgeschnitten werden, so dass die seit der Auffahrung des Streckenstummels gebildete Verwitterungsschicht abgetragen wurde. Die Zahnkontur wurde mittels Seilsägeverfahren hergestellt (TB 7). Abbildung 37 zeigt das Aufmaß des Gebirgsausbruchs vor dem Einbau des Spritzbetonkörpers.

Im Rahmen der Bauwerkserrichtung konnten wesentliche Daten für die Spritztechnologie, die Anpassung der Spritzmittelkonsistenz, der Qualitätssicherung, der Spritzleistungen etc. gewonnen werden (TB 7).

Im Vergleich zum MgO-Ortbeton des GV1 konnte die Temperatur am Gebirgskontakt bedeutend verringert werden. Ein typisches Messergebnis zeigt Abbildung 38.

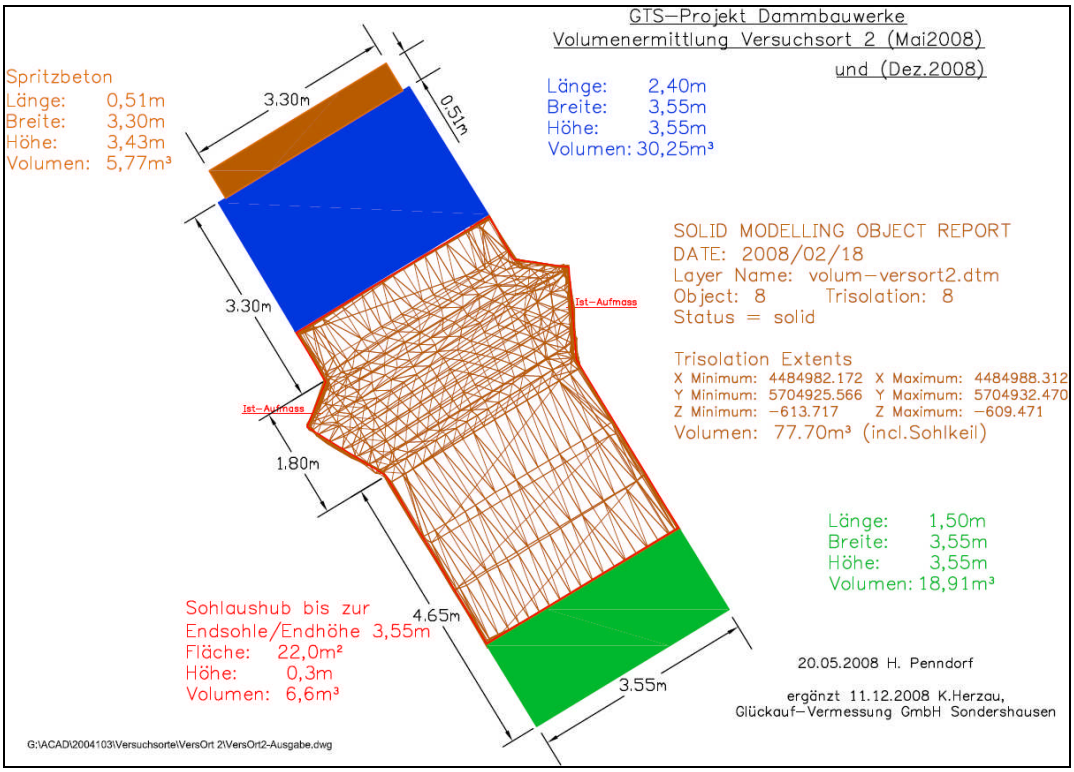

Abbildung 37: Markscheiderisches Aufmaß des Gebirgsausbruchs für den GV2 vor dem Einbau des Spritzbetonkörpers

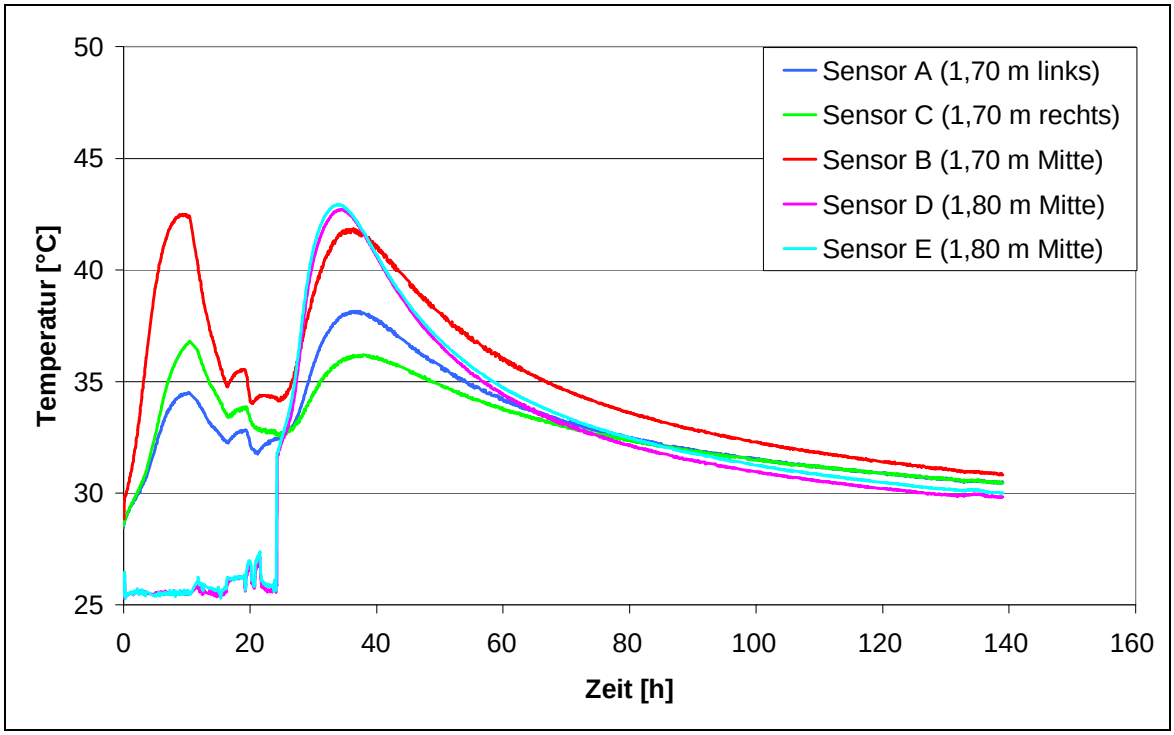

Abbildung 38: Ergebnisse Temperaturmessung vom 18.02.2008 bei einer Bauwerkslänge von 1,64 bis 1,83m

6.3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse des GV2

Bei der Errichtung des GV2 kam die Trockenspritzbetonbauweise zum Einsatz. Dabei wird vorab eine Rezeptur festgelegt. Da jedoch die tatsächlich verspritzte Rezeptur von der Zumischung der R-Lösung durch den Spritzdüsenführer abhängt, stimmt die tatsächlich verspritzte Rezeptur nicht immer exakt mit der vorab festgelegten Rezeptur überein. Dies ist bei Spritzbeton unvermeidbar.

Die deswegen anfänglich befürchteten erheblichen Rezepturschwankungen traten jedoch nicht ein. Die Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Auswahl des eingesetzten MgO und die Erfahrung der eingesetzten Spritzdüsenführer führten zu einer Minimierung der Schwankungsbreite der resultierenden MgO-Spritzbetonrezeptur.

Damit Ortbeton als Frischbeton förderfähig ist, muss ein ausreichend geringes Masseverhältnis zwischen Hartgesteinsszuschlag und Bindemittelsupsension gewählt werden. Bei den Ortbetonrezepturen zur Errichtung des Versuchsbauwerkes GV1 lag die förderfähige Konsistenz bei einem Masseverhältnis Zuschlag/MgO von < 3,5. Bei diesem Masseverhältnis Zuschlag/MgO werden beim Abbinden Temperaturen erreicht, die eine Schädigung des temperaturempfindlichen carnallit- und tachyhydrithaltigen Gebirges bewirken. Eine Möglichkeit, ein Massenverhältnis Zuschlag/MgO > 3,5 einzusetzen und dadurch die maximale Abbindetemperatur erheblich zu senken, hat sich die Verwendung von Spitzbeton an Stelle von Ortbeton als zielführend erwiesen.

6.4 Großversuch 3 (GV3)

6.4.1 Zielstellung

Mit dem Großversuch GV3 wurde das vorgesehne Asphalt-Element unter in situ Bedingungen erprobt und die positiven Ergebnisse der Labor-, Bohrloch- und mittelmaßstäblichen Vorversuche sollten verifiziert werden.

Die Asphaltscheibe wurde - wie in [21, 22] beschrieben – aus einer Mauer aus Asphaltsteinen und anschließender Monolithisierung der Einzel-Formsteine zu einer kompakten und lösungsdichten Asphalt-Scheibe unter gleichzeitiger Temperatur- und Druckeinwirkung erstellt. Die Aspahltscheibe war in einen gefrästen Schlitz in das Gebirge eingebunden (siehe Abbildung 39).

Um den erforderlichen Druck (4 bar) und die erforderliche Temperatur (60°C) auf die Asphalt-Mauerung aufbringen zu können, wurde auf der Luftseite der Asphalt-Mauerung ein Gummi-Druckkissen aufgebracht. Als Widerlager für die Gummiblase diente ein MgO-Ortbetonpfropfen. Die Gummiblase wurde mit erwärmtem Silikonöl befüllt. Das in Abbildung 33 dargestellte Stahl-Sicherungswiderlager zur Stützung des MgO-Ortbetonwiderlagers war ursprünglich vorgesehen, wurde jedoch nach weitergehenden Berechnungen der Lagesicherheit des MgO-Ortbetonwiderlagers als nicht erforderlich.

Mit dem Gebirgsschlitz für die Asphaltbetonmauerung machte sich eine für CaT relativ komplizierte Ausbruchskontur erforderlich, die jedoch ohne größere Probleme mit guter Genauigkeit aufgefahren werden konnte. Abbildung 39 zeigt den Gebirgsschlitz nach Fertigstellung.

In Abbildung 40 ist links die teilweise errichtete Asphaltmauerung vor der Druckkammer und rechts die fertig gestellte Asphaltmauerung vor der Monolithisierung zu sehen.

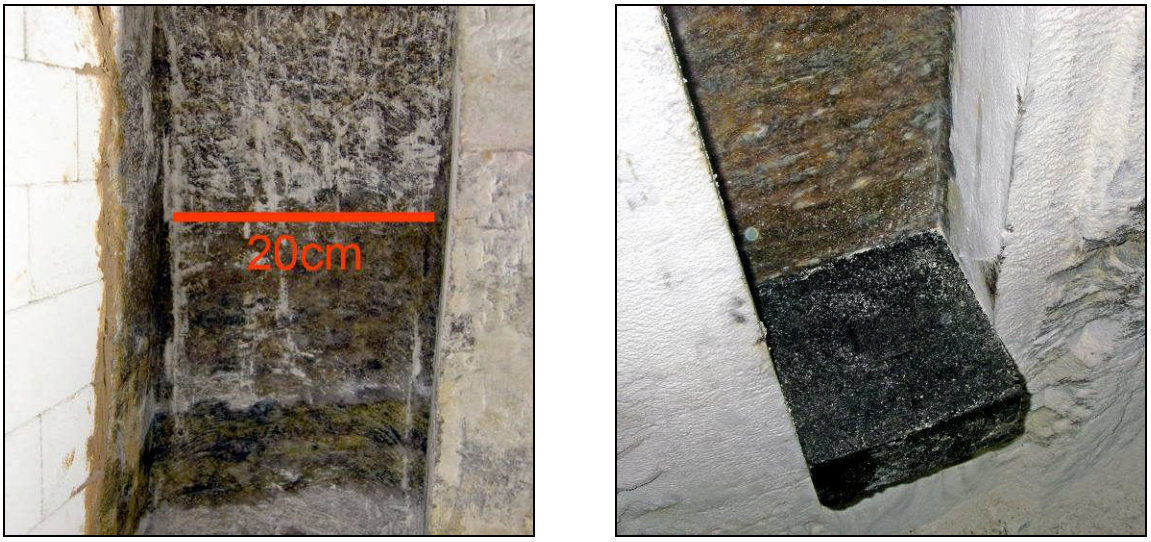

Abbildung 39: Fertiggestellter Gebirgsschlitz (links) und in den Gebirgsschlitz eingelegter Asphalt-Baustein (rechts)

Abbildung 40: Einbau der Asphaltsteine in den vorbereiteten Versuchshohlraum (links) und fertig gestellte Asphaltmauerung vor dem Einbau des Druckkissens (rechts).

Zur Überwachung der Entwicklung von Temperatur und Druck in der Asphaltmauerung wurden entsprechende Sensoren eingebaut (TB 7).

Das MgO-Ortbetonwiderlager sollte lediglich die Lasten aufnehmen, die bei der Monolithisierung durch die Druckblase entstehen und sollte die Asphaltscheibe lagestabil halten, wenn in der Druckkammer die Lösungsdruckbeaufschlagung erfolgt. Dichtheitsanforderungen wurden an das MgO-Widerlager nicht gestellt. Aus diesem Grunde erfolgte auch keine besondere Behandlung der KF.

Somit ergab sich die in Abbildung 41 dargestellte abschließende Konstruktion des Versuchskörpers des GV3.

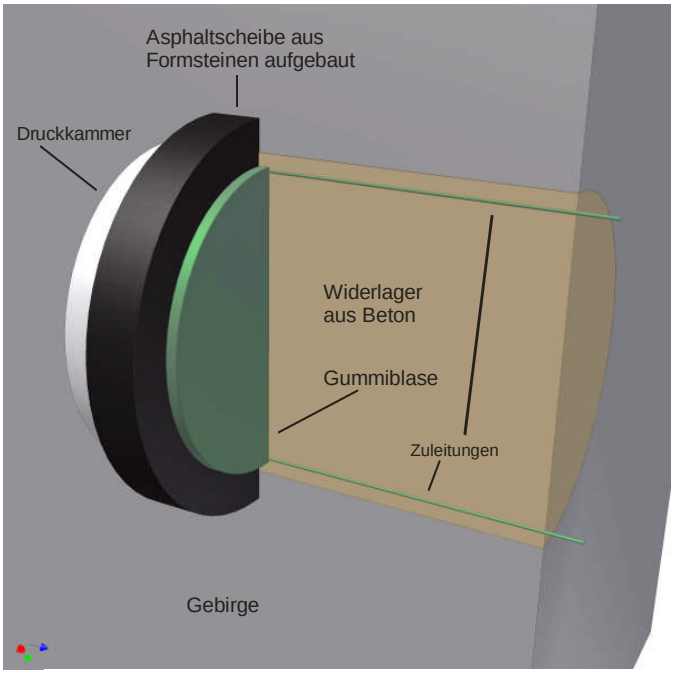

Abbildung 41: Aufbau des GV3

6.4.2 Ergebnisse des GV3

Der Großversuch GV3 konnte nicht bis zum geplanten Ende durchgeführt werden, da die zur Monolithisierung verwendete Gummidruckzelle nach ca. 7 Stunden Monolithisierung ein Leck aufwies und das Druckmedium (Silikonöl) unkontrolliert austrat. In diesem Zustand war die weitere Monolithisierung nicht mehr möglich. Um in dieser Situation noch ein Maximum an Informationen zu gewinnen, wurden noch zusätzlich die folgenden Operationen durchgeführt:

- Austausch der Druckflüssigkeit Silikonöl durch MgO-Betonsuspension und Abbinden der MgO-Betonsuspension im Druckkissen und – durch das Leck - in seiner Umgebung;
- Lösungs-Druckaufbau in der Druckzelle nach Abbinden der MgO-Suspension,
- Rückbau der Versuchsanordnung.

Die Einzelschritte und die dabei durchgeführten Beobachtungen wurden ausführlich im TB 7 dargelegt.

Hinsichtlich der eigentlichen Versuchsziele (Monolithisierung der Asphalt-Steinmauerung und Prüfung der erreichten Dichtheit) wurden die folgenden Ergebnisse erzielt (TB 7):

- Zur Monolithisierung der Asphaltdichtung wurde wie geplant durch die Gummiblase temperiertes Silikonöl (Vorlauftemperatur 55 bis 60 °C) unter einem Druck von 3,15 bar geleitet. Nach 405 min Betriebszeit trat durch das oben genannte Leck in der Gummiblase ein Druckabfall und ein Verlust von Silikonöl ein. Der Versuch musste abgebrochen werden.
- Im Bereich, in dem die Druckblase direkt an der Asphaltmauer angelegen hatte, war die Oberfläche auch nach der sehr kurzen Monolithisierungszeit sichtbar monolithisiert. Da durch den aufgebrachten Druck der Gummiblase die verbleibenden, minimalen Restfugen beidseits der Scheibe erst geschlossen werden mussten, kam es zu unterschiedlich starker Deformation in der Monolithisierungsphase, was sich als Muster in der Asphaltscheibe erhalten hat.
- Durch die Injektion der Blase und des vorhandenen Hohlraumes in der Umgebung der Blase mit MgO-Mörtel wurden die geometrischen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Injektion innerhalb der Übergangszone Beton/Asphalt dauerhaft im Mörtel fixiert. Es hat sich gezeigt, dass die Blase vollständig gefüllt bzw. entfaltet war. Technologisch betrachtet, hat die Blase wie geplant die Asphaltscheibe vollständig mit Druck und Wärme belastet. Die Form der rekonstruierten Blasenfüllung gab auch Aufschluss über die Deformationsvorgänge der Asphaltscheibe, da mit zunehmender Monolithisierung der Asphaltsteine das Volumen der Blasenfüllung zunahm. Die Mörtelscheibe in der Blase hatte an der Sohle eine Mächtigkeit von ca. 1 cm und im Firstbereich ca. 4 cm. Dies ist auf den Dichteunterschied zwischen Silikonöl (ca. 1 g/cm³) und Asphalt (ca. 2,1 g/cm³) zurückzuführen.
- Durch die Havarie der Gummiblase in der Monolithisierungsphase konnte der vollständige Nachweis der Machbarkeit dieser in situ Technologie der Monolithisierung im Großmaßstab nicht erbracht werden. Lediglich der Randbereich der Asphaltsteine, an welchem die Blase über die zu kurze Monolithisierungszeit anlag, war verschmolzen. In den vorausgegangenen klein- und mittelmaßstäblichen Laborversuchen war jedoch die Monolithisierung vollständig gelungen.
- Der Verbund des Ortbeton-Widerlagers mit dem Gebirge war ausreichend, um dem für die Fixierung der Druckblase nachfolgenden Druck in der Druckkammer von 60 bar mit minimalen und tolerierbaren Verschiebungen standzuhalten.
- Die Druckblase versagte in der Firste; die Ursache ist unbekannt. Die Versagensstelle scheint aber eher auf eine Punktion im Vorfeld oder beim Einbau im GV3 hinzudeuten,

als auf eine Materialermüdung infolge zu starker Dehnung bei der Aufgabe des Monolithisierungsdruckes.

Schlussfolgerungen für die grundsätzliche Realisierbarkeit von Asphaltdichtungen

Die prinzipielle Realisierbarkeit eines monolithisierten Asphaltelementes wurde in Bohrlochversuchen nachgewiesen.

Im Großversuch GV3 sollte ein Kompromiss zwischen der Nachbildung einer späteren Bauausführung und einer einfachen Versuchsausführung gefunden werden. Die im Versuch eingesetzte und mit Silikonöl beaufschlagte Gummiblase stellt einen derartigen Kompromiss dar.

Durch einen Defekt dieser Gummiblase konnten das Endziel der vollständigen Monolithisierung der Asphaltdichtung nicht vollständig erreicht werden. Allerdings wurde für folgende Etappen der Nachweis der Realisierbarkeit erbracht:

- Entwicklung einer Asphaltrezeptur für formstabile Blöcke,
- Serienmäßige Herstellung der Asphaltformsteine (Kantenlänge 195±3,0 mm x 200±0,5 mm x 100±0,5 mm, Gewicht ca. 8,3 kg),
- Aufbau eines Dichtelementes aus Asphaltblöcken in Mauerwerksausführung bei maximaler Fugenbreite von 1 mm,
- Maßhaltiger Anschluss der Asphaltblöcke an die Gebirgskontur, einschließlich der umlaufenden Dichtungsschlitze.

Auf Grund des ungünstigen Verlaufes des Großversuches GV3 liegt kein gesamtheitlicher Nachweis der Realisierbarkeit der Asphaltdichtung im Maßstab 1:1 vor. Andererseits ist die Realisierung der Monolithisierung einer Asphaltdichtung eines zukünftigen Streckenverschlusses eine technische Fragestellung. Deshalb wurden neben der im Versuch bevorzugten Variante einer mit Silikonöl beaufschlagten Gummiblase weitere Möglichkeiten betrachtet, die sich aus dem Stand der Technik ableiten lassen. Diese Ausführungsvarianten sind:

1. Einsatz beheizbarer Schilde,
2. Etappenweiser Aufbau mit Widerlagern aus MgO-Beton und beheizbaren Schilden (Teilflächenmonolithisierung mit Druckstempeln und Heizelementen),
3. Nutzung der Hydratationswärme und des Expansionsdruckes des MgO-Betons.

Im Vorhaben konnten die Varianten 1 und 2 als Großversuche nicht weiter verfolgt. Variante 3 hat den Nachteil, dass der Vorgang der Monolithisierung nicht direkt steuerbar ist und dass das Ergebnis (monolithisierte Dichtung) nicht überprüft werden kann.

Es wird eingeschätzt, dass Variante 2 die höchste Erfolgswahrscheinlichkeit besitzt und im Maßstab 1:1 umgesetzt werden kann. Wird die Asphaltdichtung nicht als Volldichtung über den ganzen Querschnitt errichtet, sondern als Ringdichtung gebaut, ist eine Realisierung der Ringdichtung nach Variante 2 evtl. noch einfacher möglich (Schema: s. Abbildung 42).

Weitere Möglichkeiten der Realisierung einer Asphaltdichtung für Streckenverschlüsse ergeben sich durch die Ergebnisse des Bohrlochversuches GLAU-9 (s. Abschnitt 4.2). Durch den Einsatz des neu entwickelten Bitumenanstriches können beim Heißeinbau die resultierende Oberflächentemperatur an der Gebirgskontur verringert werden und ein quasi geschlossenes System ohne Zufuhr zusätzlicher Feuchte geschaffen werden. Deshalb kann bei Verwendung des neu entwickelten Bitumenanstriches das klassische Heißeinbau-verfahren evtl. auch im CaT eingesetzt werden. Nachteilig ist jedoch der untertägige Einsatz beheizbarer Behälter in größerer Entfernung zum Schacht. Weiterhin muss der Asphalt bis zum Abkühlen unter Druck gehalten werden, um der Bildung eines Firstspaltes infolge der thermischen Rückdehnung entgegenzuwirken. Dies erfordert den Einsatz beheizbarer Asphaltpumpen.

Vorteilhaft ist die Kombination des kalten Einbaus einer Schalung aus Asphaltblöcken und der Verfüllung des Zwischenraumes durch heiß eingebauten Asphalt der gleichen Zusammensetzung. Die Monolithisierung erfolgt durch die Temperatur der heiß eingebauten Kerndichtung.

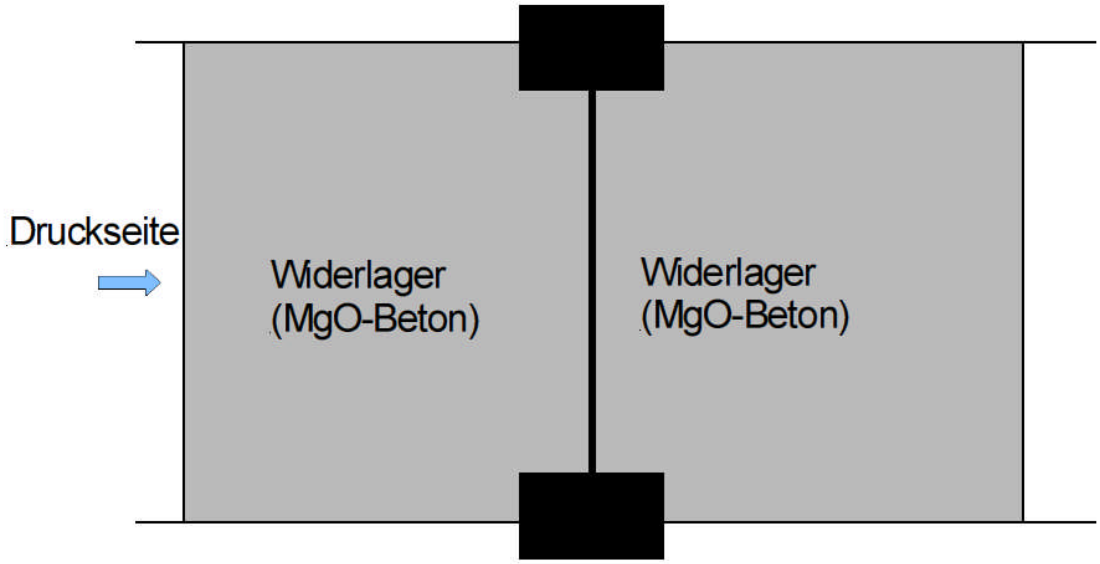

Abbildung 42: Teil eines Streckenverschlusses mit einer Ringdichtung aus Asphalt in Kombination mit einer Innendichtung aus einem Bitumenanstrich (Längsschnitt) [21]

Insgesamt stellt der Einbau einer Asphaltscheibe als redundantes und diversitäres Dichtelement in einem komplexen Abdichtbauwerk eine realisierbare Variante dar; die Technologie der in situ Monolithisierung muss jedoch weiterentwickelt werden.

6.5 Untersuchungsergebnisse und Bewertung der Funktionalität der Funktionselemente

6.5.1 Hauptelemente aus MgO-Beton

Der MgO-Beton als Baustoff für die Hauptelemente eines zukünftigen Verschlussbauwerkes im Carnallitit wurde mit Rezepturen entwickelt, die zur Primärbildung der 5-1-8-Bindemittelphase führen. Dieser Baustoff kann als Ortbeton (siehe Abschnitt 4.1.1) oder als Spritzbeton eingesetzt werden (siehe Abschnitt 4.1.2). Beide Baustoffvarianten sind unter technischen Bedingungen erfolgreich realisiert worden (siehe Abschnitte 6.2 und 6.3). Vorzugsvariante der technischen Ausführung ist der Einbau der Hauptelemente in der Spritzbetonbauweise im Trockenspritzverfahren. Referenzbaustoff ist der im Großversuch GV2 eingesetzte Spritzbeton. Die Funktionstüchtigkeit der Hauptelemente aus MgO-Beton kann aus folgenden Ergebnissen zur Untersuchung des Spritzbetons aus dem GV2 abgeleitet werden.

- Die unter In-situ-Bedingungen erreichten Werte der einaxialen Druckfestigkeit von Zylinderproben liegen bei 37 ± 10 MPa. Die Zylinderproben sind aus Spritzkästen ausgebohrt worden. Die Festigkeitswerte sind geringer, als die am Spritzbetonkörper OFP8 ermittelten Einzelwerte (siehe Abbildung 18). Eine Abhängigkeit vom Betonalter zum Zeitpunkt der Prüfung ist nicht zu erkennen (siehe Abbildung 43). Die ermittelten Festigkeiten sind für die statische Funktion des Hauptelementes ausreichend.
- Die in Triaxialversuchen ermittelten Festigkeitsparameter sind für die aus dem Baukörper nachträglich entnommenen Bohrkerne günstiger als für die Bohrkerne aus

den Spritzkästen (siehe Abbildung 44). Für den Spritzbeton aus dem GV2 wurden als Parameter c = 20 MPa und Φ = 32 ° bestimmt. Dabei zeigte sich, dass die Festigkeiten des Spritzbetons aus dem Dammkörper des GV2 zwischen den höheren Festigkeiten des MgO-Ortbeton (GV1) und den bisher an Spritzbeton aus den Spritzkästen ermittelten Festigkeiten liegen.

- Die Zugfestigkeit des Spritzbetons beträgt 2 MPa. Für den Schubmodul und den Kompaktionsmodul gelten (für den Anfangsbereich der Kompaktion) G = 0,48 GPa und K = 0,8 GPa.
- Durch isostatische Kompaktionsversuche mit einer Belastungsrate von 0,1 MPa/s wurde das Tragverhalten des 5-1-8-MgO-Spritzbetons ermittelt. Dieser Spritzbeton zeigt im Vergleich mit den bisher untersuchten anderen Varianten des MgO-Betons insbesondere im Bereich höherer Einspannungen eine größere Nachgiebigkeit. Die Volumenverformung des 5-1-8-Spritzbetons ist bei gleicher Einspannung und Belastungsrate gegenüber Ortbeton ca. 25% höher (siehe Abbildung 44)
- Im Unterschied zur Ortbetonbauweise wurde bei der Spritzbetonbauweise keine Rissbildung beobachtet. Der Spritzbeton hat eine mittlere Porosität von 6,5 Vol.-%.
- Die Permeabilität des MgO-Spritzbetons wurde an Bohrkernen und direkt in Bohrlöchern an der Luftseite des Baukörpers gemessen. Für Gas wurden Werte zwischen $2{,}2 \cdot 10^{-19}$ m² und $2{,}1 \cdot 10^{-18}$ m² ermittelt. In Bohrlöchern wurden für $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung integrale Werte zwischen $2{,}5 \cdot 10^{-19}$ m² und $6{,}2 \cdot 10^{-16}$ m² bestimmt. Durch Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem MgO-Beton trat mit der Zeit eine Verringerung der Lösungspermeabilität auf ca. $2 \cdot 10^{-19}$ m² ein (s. TB 4.2, Abschnitt 4.4).
- Schwachpunkt des Hauptelementes ist die Kontaktfuge zum Gebirge. Allerdings ist Im Vergleich zum MgO-Ortbeton die Permeabilität der Kontaktfuge beim MgO-Spritzbeton geringer ($7 \cdot 10^{-13}$ m² bei Spritzbeton und $4 \cdot 10^{-11}$ m² bei Ortbeton). Die Ausdehnung der geschädigten Gebirgszone beträgt ca. 1 cm (im Vergleich zu etwa 4 cm bei Ortbeton).

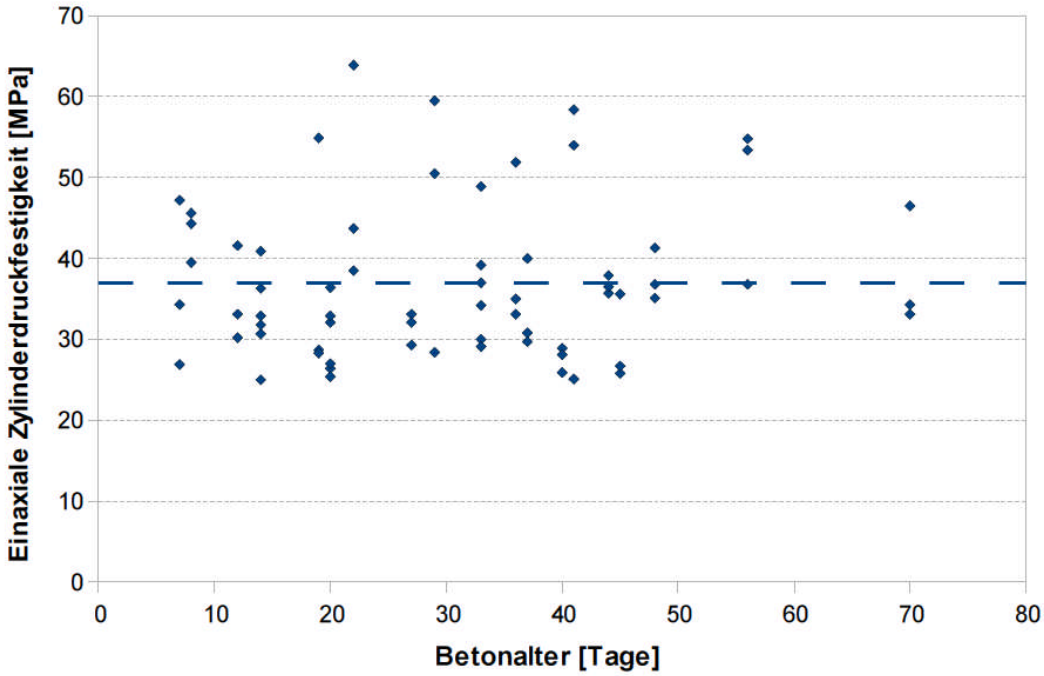

Abbildung 43: Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzbetonkästen des GV2 (Mittelwert 37 MPa) in Abhängigkeit vom Betonalter

Hinsichtlich des Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie der nachgewiesenen Permeabilität des Bauwerkes kann die Funktionstüchtigkeit des MgO-Hauptelementes in Spritzbetonbauweise (Referenz GV2) als positiv eingeschätzt werden.

Die Scherfestigkeit des Kontaktes zwischen Carnallitit und MgO-Beton ist niedriger als am kompakten Carnallitit, liegt aber deutlich höher, als dessen Restscherfestigkeit (s. TB 6 und Tabelle 7). Die in Tabelle 7 angegebenen Scherparameter wurden an Laborproben bestimmt, bei denen der MgO-Beton quasi als “MgO-Ortbeton” direkt auf eine Caranallititprobe aufgebracht wurde. Laborversuche ergeben jedoch hier hinsichtlich der Kohäsion keine zutreffenden Werte, da in situ die thermische Rückdehnung eines MgO-Pfropfens beim Abkühlen zu einem Abreißen von der Kontur führt. Zudem ist die Schädigung der Kontur in situ durch die hohe Temperatur des MgO-Ortbetons wesentlich größer als die Schädigung der Probenoberfläche durch die wesentlich niedrigere Temperatur beim Aufbringen einer kleinen Menge MgO-Beton auf die Carnallititprobe im Labor. Für Berechnung in situ muss deshalb für die Kohäsion in der Kontaktfläche 0 MPa angesetzt werden.

Tabelle 7: MOHR-COULOMB-Festigkeitsparameter der Trennfläche zwischen MgO-Beton und Gebirge im Vergleich mit dessen Festigkeitsparametern

	Kompakter Carnallitit	Restscherfestigkeit Carnallitit	Trennfläche
c	3,66 MPa	0,68 MPa	1,56 MPa
Φ	24,5 °	23,6 °	50 °

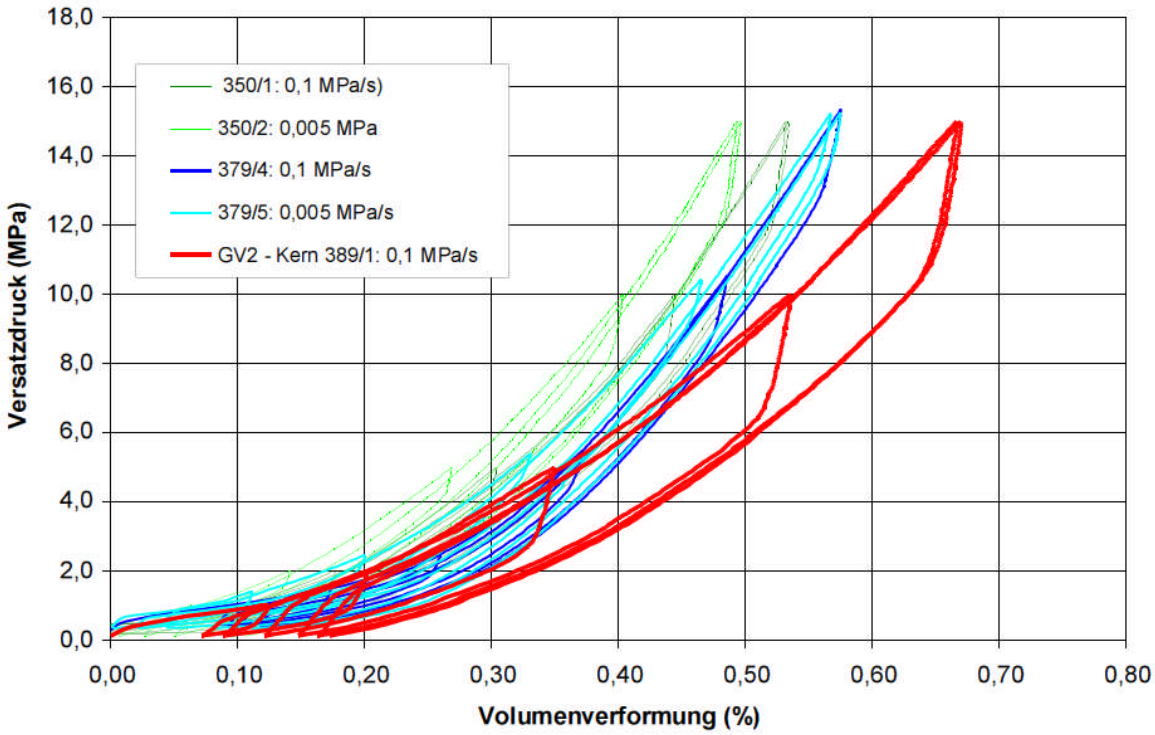

Abbildung 44: Kompaktionsverhalten von Spritzbeton im Vergleich zu Ortbeton

Problematisch war zum Zeitpunkt der Großversuche das praktische Fehlen eines Kontaktdruckes in einer Größenordnung, die zur Abdichtung der Kontaktfuge zum Gebirge führt (erforderlich sind ca. 1MPa). Im Beobachtungszeitraum wurden sowohl beim GV2 als auch beim GV1 nur sehr geringe resultierende Kontaktdrücke gemessen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der MgO-Beton unter in situ-Bedingungen keinen Expansionsdruck entwickelt, der zu einer sofort wirksamen Abdichtung der Kontaktfläche führt.

Ein weiteres Problem sind der metastabile Charakter der 5-1-8-Bindemittelphase und die daraus resultierenden Wechselwirkungen des MgO-Betons mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung, die zu einer Volumenvergrößerung des Materials und damit in situ immer zur Entfestigung führt (siehe Abschnitt 4.1.3). Eine Expansion des Baustoffes könnte allenfalls dann zu einer Abdichtung führen, wenn die Expansion allseitig behindert/verhindert wird, und damit sich zwangsläufig ein Kontaktdruck allseitig aufbaut. Damit die Expansion eines Baustoffes in einer Strecke behindert/verhindert wird, sind jedoch beidseits steife Widerlager erforderlich.

Für den neu entwickelten 3-1-8-MgO-Beton kann zum derzeitigen Entwicklungsstand der Nachweis der Funktionstüchtigkeit als Baumaterial für den Dammkörper nicht erbracht werden. Die zeitunabhängigen Festigkeitsparameter können als genügend bezeichnet werden. Im Vergleich mit dem 5-1-8-MgO-Beton ist die Kohäsion und die einaxiale Druckfestigkeit jedoch geringer.

Ein gravierendes Problem ist das ungünstige zeitabhängige Verformungsverhalten des 3-1-8-MgO-Betons, das sich in hohen Kriechverformungen und in einem ungünstigen Relaxationsverhalten äußert (siehe Abschnitt 4.1.6). Der 3-1-8-MgO-Beton ist als Material mit statischen Aufgaben nicht einsetzbar. Da ebenso Wechselwirkungen mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung beobachtet wurden, die zu einer Gefügezerstörung führen, kann dieser Baustoff derzeit für das Hauptelement nicht eingesetzt werden. Der Nachweis der Funktionstüchtigkeit ist zum derzeitigen Stand nicht möglich.

6.5.2 Injektionsverfahren

Die Ergebnisse zu getesteten Injektionsmitteln und den eingesetzten Verfahren sind in Tabelle 5 aufgeführt; Ergebnisse zu den Permeabilitätsmessungen beim GV1 sind bereits im Abschnitt 5.2.2 dargestellt.

Die Entwicklung der in den pneumatischen Tests ermittelten Permeabilitäten des Gesamtsystems im GV2 zeigt Abbildung 45. Der Zeitpunkt t = 0 entspricht dem Moment des ersten pneumatischen Vortests PV1 (s. TB 4.2).

Die entscheidende Permeabilitätsverringerung auf $3 \cdot 10^{-17}$ m² wurde nach der zweiten Injektion mit Denepox 40 erreicht. Die 3. bis 5. Injektion von Denepox 40 führten zu keiner weiteren, messbaren Reduzierung des Permeabilitätsniveaus. Eine Erhöhung des Permeabilitätsniveaus von $3 \cdot 10^{-17}$ m² auf $2 \cdot 10^{-16}$ m² wurde bei Überschreitung des Prüfdruckes (3 bar) über den vorliegenden Kontaktdruck (ca. 1,5 bar) nach 290 Tagen Standzeit (s. Abbildung 45) festgestellt.

Die im letzten pneumatischen Test (PV15, s. TB 4.2) gemessene integrale Systempermeabilität von $3 \cdot 10^{-16}$ m² entspricht einer effektiven Permeabilität des Kontaktbereiches von $3 \cdot 10^{-14}$ m². Dabei wird davon ausgegangen, dass die strömungstechnische Wirkung über die gesamte Bauwerkslänge durch lokal vorhandene Permeabilitäten > $2 \cdot 10^{-14}$ m² bestimmt wird.

Basierend auf der durch Messung des Kontaktdruckes dokumentierten, geomechanischen Einspannung des Versuchsbauwerkes (Kontaktdruck ca. 1,5 bar) muss von einem lokal begrenzten Versagen im vergüteten Kontaktbereich durch Verletzung des Normalspannungskriteriums ausgegangen werden. Es wird davon ausgegangen, dass ohne eine Veränderung der geomechanischen Einspannung des Bauwerkes (Erhöhung des

Kontaktdruckes durch Aufkriechen des Gebirges) derzeit keine weitere Permeabilitätsreduzierung zu erwarten ist.

Hinsichtlich der Schlussfolgerungen zu Injektionsschläuchen, Manschettenrohren, geeigneten Injektionsmaterialien usw. wird vollständig auf Abschnitt 5.2.2 verwiesen.

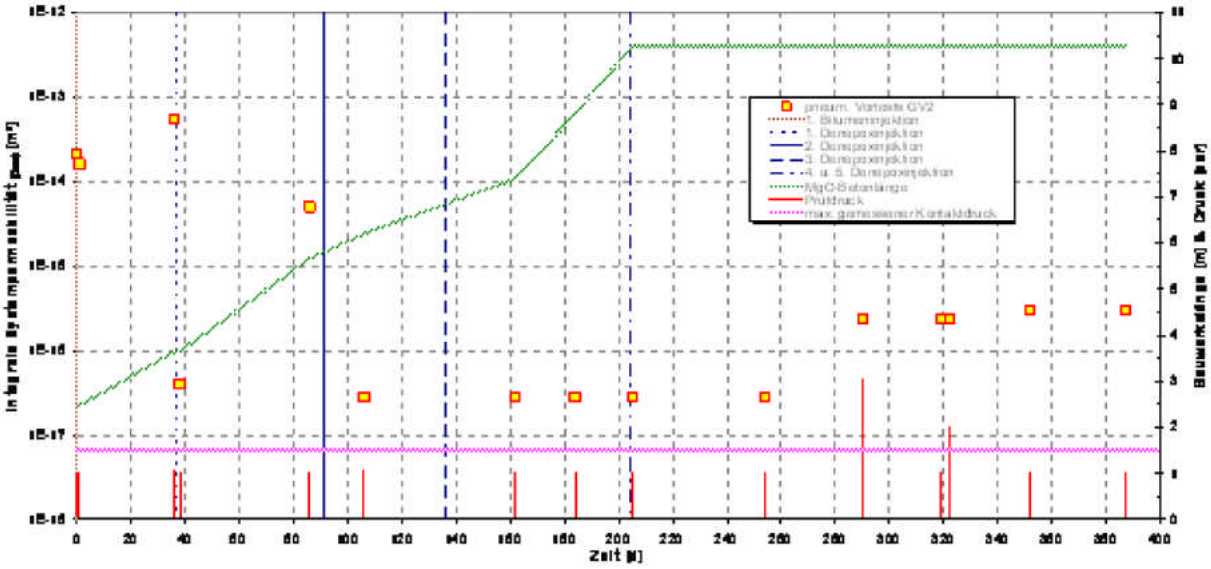

Abbildung 45: Permeabilitätsentwicklung für den Großversuch GV2

6.5.3 Asphalt-Element

Ein den Großversuchen GV1 und GV2 vergleichbarer Nachweis der Funktionstüchtigkeit eines Asphaltelementes ist nicht gelungen, da der zu diesem Zweck durchgeführte Großversuch GV3 infolge eines technischen Defektes nicht bis zu einem Funktionstest geführt werden konnte.

Die Funktionstüchtigkeit einer Asphaltdichtung kann somit nur auf der Basis der Ergebnisse der durchgeführten Bohrlochversuche belegt werden. Die Ergebnisse der Bohrlochversuche sind im Abschnitt 4.2 beschrieben.

Dabei wurden die Funktionstüchtigkeit eines Bohrlochverschlusses aus monolithisierten Asphaltblöcken im Versuch GLAU-2 gezeigt. Die Systempermeabilität betrug unter der Bedingung Prüfdruck < Anpressdruck an der Kontur: $8 \cdot 10^{-20}$ m².

Im Versuch GLAU-10 wurde bei gleichzeitiger Verwendung des neu entwickelten Bitumenvoranstrichs die Funktionstüchtigkeit eines Bohrlochverschlusses aus monolithisierten Asphaltblöcken mit einem Widerlager aus MgO-Beton gezeigt. Die Systempermeabilität betrug $2 \cdot 10^{-20}$ m².

Im Bohrlochversuch GLAU-9 wurde die Funktionstüchtigkeit eines Bohrlochverschlusses aus dem neu entwickelten Bitumenvoranstrich, heiß eingebauten Asphaltmastix mit Haftmittel und einem Widerlager aus MgO-Beton im Carnallitit belegt. Die Systempermeabilität betrug dafür $5 \cdot 10^{-20}$ m².

Das Bitumen bzw. der Asphalt einer Dichtung muss die umliegende Kontur dauerhaft benetzen. Die Benetzung der Kontur erfolgt gleichzeitig mit der Monolithisierung der Asphaltsteine. Durch die Benetzung entsteht eine Adhäsion zwischen dem Bitumen (bzw. dem Asphalt) und dem umgebenden Gebirge. Die Benetzung muss dauerhaft erhalten bleiben. Die Benetzung ist umso besser, je länger die Temperatureinwirkung und je größer der aufgebrachte Druck bei der Monolithisierung ist. Als Richtwerte für Druck und Temperatur können hierfür die in TB 4 genannten Werte aus den Bohrlochversuchen verwendet werden. Derzeit existieren noch keine systematischen Untersuchungen, aus

denen für eine Monolithisierung ein mindestens erforderlicher Druck bei einer bestimmten Temperatur in Abhängigkeit von der Geometrie der Asphaltscheibe angegeben werden kann. Hierfür besteht weiterer Forschungsbedarf.

Ein “Abreißen” des Asphaltes von der Kontur ist nicht zu befürchten, solange die Adhäsion (Benetzung) ausreichend ist. Diese Aussage gilt auch dann, wenn geringe Mengen des Asphaltes in einen Riss unter Druck “abfließen” sollten. Technikumsversuche zeigen, dass die Asphaltabdichtung sich dabei plastisch verformt, ohne von der Kontur abzureißen – eine (wie auch immer definierte) “ausreichende” Benetzung/Adhäsion an der Kontur vorausgesetzt.

6.6 Ausblick - Funktionstest der Großversuche

Der ebenfalls geplante Funktionstest durch eine Beaufschlagung der Bauwerke GV1 und GV2 mit Versuchslösung ($MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung (s. TB 1) erfolgte im Berichtszeitraum nicht, da die Normalspannungen zwischen Gebirge und Bauwerk noch nicht ausreichend waren. Es wären somit nur geringe Flüssigkeitsdrücke unter Einhaltung des Minimalspannungskriteriums zugelassen gewesen. Deshalb wurde beschlossen, dass die Versuchsorte unter Fortführung der Normalspannungsmessungen in der KF von GTS zugänglich gehalten werden, so dass eine spätere Flüssigkeitsbeaufschlagung möglich ist.

Alternativ erfolgten die pneumatischen Vortests während und nach Abschluss der Errichtung der Versuchsbauwerke, um zumindest einen wesentlichen Teil der erforderlichen Informationen über die Funktionsfähigkeit der Abdichtelemente zu erhalten. Die Ergebnisse der pneumatischen Vortests sind ausführlich im TB 4 und Abschnitt 5.3.5 dargestellt und diskutiert worden.

6.7 Schlussfolgerungen für den technischen Einsatz von MgO-Beton

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Funktionselemente von Verschlussbauwerken in 2 Großversuchen GV1 und GV2 getestet. Details sind in TB 7 beschrieben. Beim Großversuch GV1 (Längsschnitt siehe Abbildungen 31 und 35) wurden 365 m³ Ortbeton in 13 Scheiben (=Betonierabschnitten) bei einem Kegelstumpf mit bis zu 5,6 m Durchmesser eingebracht. Beim Großversuch GV2 (Längsschnitt siehe Abbildung 32) wurde ein nahezu 10 m langes Verschlusselement in Spritzbeton mit einer Lagenstärke von etwa 10 cm erstellt.

Bei der Realisierung des Großversuches GV1 (s. TB 7) in Ortbetonbauweise sind folgende Probleme aufgetreten

- Schwankungen in der Verarbeitbarkeit des MgO-Ortbetons
- Schädigung des konturnahen Gebirgsbereiches durch hohe Abbindetemperaturen
- Vereinzelte oberflächliche Rissbildungen in den hergestellten 60 cm breiten Scheiben

Wie sich durch die Probleme bei der Verarbeitbarkeit des Frischbetons bei der Errichtung der ersten Betonierabschnitte gezeigt hat, war die bis dahin erfolgte Qualitätssicherung des MgO noch nicht ausreichend. Daraufhin wurde ein zusätzliches Qualitätssicherungsprogramm eingeführt, sowohl auf MgO-Herstellerseite (Fa. Styromag) als auch im Rahmen der Wareneingangsprüfung eingeführt (Datails s. TB 7). Zusätzlich wurde zum MgO der Fa. Styromag auch MgO- der Firma Mannekus eingesetzt und in das Qualitätssicherungs-programm eingebunden. Es konnte gezeigt werden, dass auf Lieferengpässe und Qualitätsschwankungen einzelner Hersteller kurzfristig reagiert werden kann.

Eine Alternative zur Ortbetontechnologie ist die Spritzbetontechnologie. Die Umsetzung der Spritzbetontechnologie für MgO-Beton und die Errichtung eines kompletten Dammkörpers nach diesem Verfahren ist ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Qualität des vorgesehenen Hauptelementes zukünftiger Streckenverschlüsse im leichtlöslichen Gebirge.

Eine zusammenfassende Erprobung der Realisierbarkeit der MgO-Spritzbetontechnologie unter großtechnischen Bedingungen erfolgte im Rahmen des Großversuches GV2 (s. TB 7).

Bei der Errichtung des GV2 kam die Trockenspritzbetonbauweise zum Einsatz. Dabei kann die Rezeptur im Vorfeld nicht starr festgelegt werden. Durch den Spritzdüsenführer wird versucht, eine flexible Anpassung an die Grundrezeptur zu erreichen. Diese Anpassung erfolgt durch die Regelung der Anmachflüssigkeitszufuhr zu der vorgemischten Trockenmischung aus MgO und der Gesteinskörnung. Die Referenzrezeptur für den MgO-Spritzbeton des Großversuches GV2 ist in Tabelle 4 angegeben.

Die bei Spritzbeton anfänglich befürchteten erheblichen Rezepturschwankungen traten jedoch nicht ein. Die Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Auswahl des eingesetzten MgO (s. TB 5.1) und die Erfahrung der eingesetzten Spritzdüsenführer führte zu einer Minimierung der Schwankungsbreite der resultierenden MgO-Spritzbetonrezeptur. In Abbildung 46 ist dazu das Verhältnis R-Lösung / MgO für jede gespritzte Lage aufgetragen. Wie aus der Abbildung ersichtlich, schwankte das Verhältnis nach einer “Lernphase” nur wenig um 0,7..

Abbildung 47 zeigt das Ausbreitmaß und die maximale Konturtemperatur in Abhängigkeit des Verhältnisses Zuschlag / Masse MgO. Damit Ortbeton als Frischbeton förderfähig ist, muss ein ausreichend geringes Masseverhältnis zwischen Hartgesteinsszuschlag und Bindemittelsupsension gewählt werden. Bei den Ortbetonrezepturen zur Errichtung des Versuchsbauwerkes GV1 lag die förderfähige Konsistenz bei einem Masseverhältnis Zuschlag/MgO von < 3,5 (Abbildung 47). Bei diesem Masseverhältnis Zuschlag/MgO werden beim Abbinden Temperaturen erreicht, die eine Schädigung des temperaturempfindlichen carnallit- und tachyhydrithaltigen Gebirges bewirken. Eine Möglichkeit, ein Massenverhältnis Zuschlag/MgO >3,5 einzusetzen und dadurch die maximale Abbindetemperatur erheblich zu senken, ist die Verwendung von Spitzbeton an Stelle von Ortbeton. Im Großversuch GV2 lag die an der Kontur gemessene Temperatur < 40 °C. Da die im Kern der jeweiligen Spritzschicht gemessene Temperatur bei < 45°C lag, waren die Temperaturgradienten so niedrig, dass die Wahrscheinlichkeit für eine thermisch induzierte Rissbildung sehr gering ist.

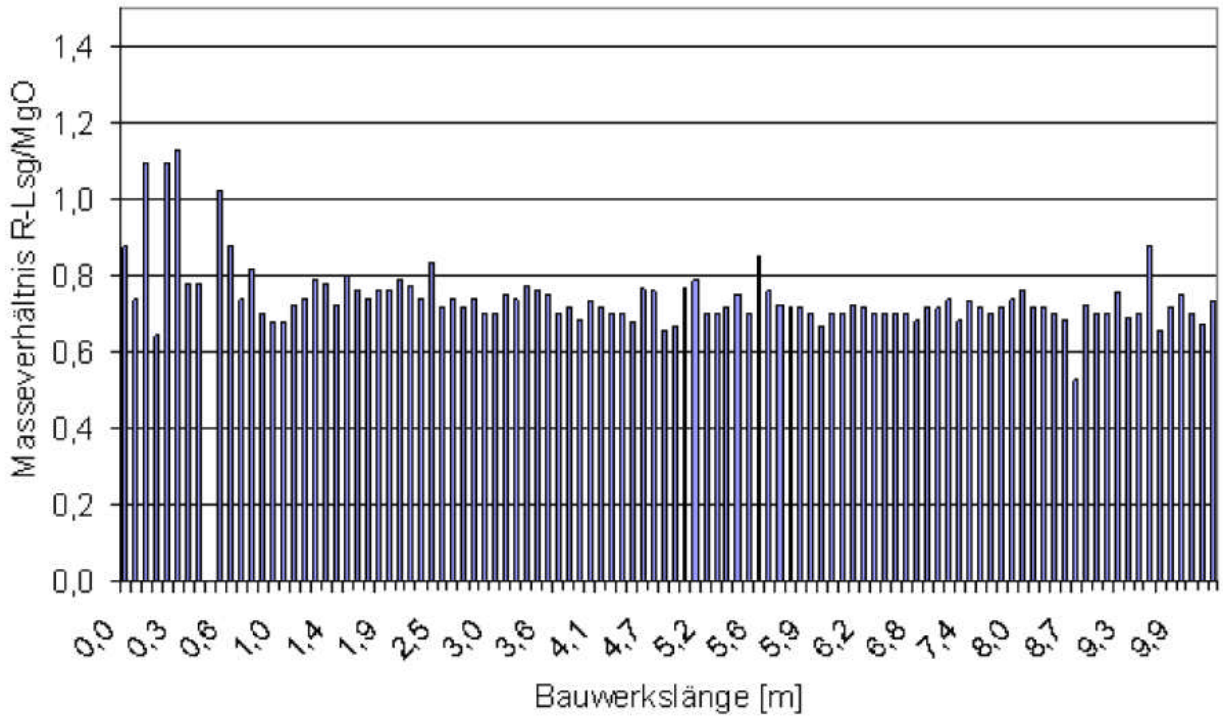

Abbildung 46: Massenverhältnis R-Lösung / MgO bei jeder Spritzbetonlage beim Großversuch GV2

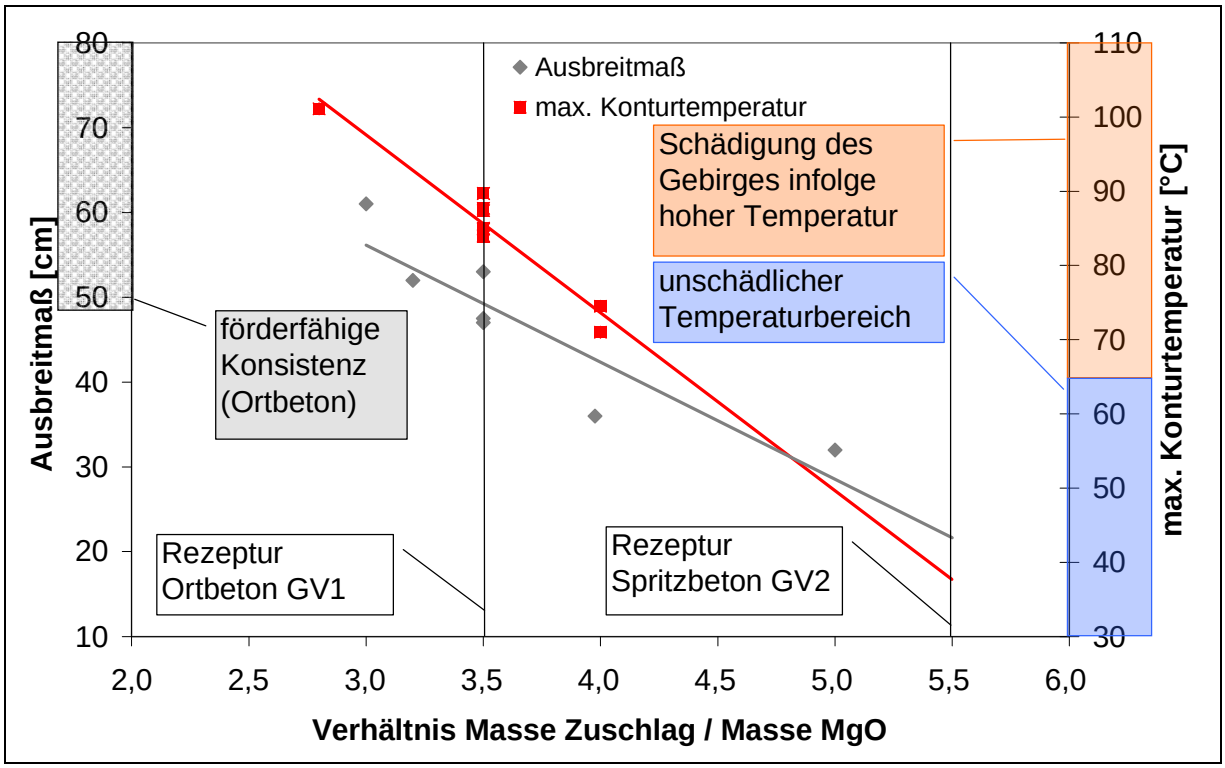

Abbildung 47: Abhängigkeit der maximalen Konturtemperatur und des Ausbreitmaßes vom Verhältnis Masse Zuschlag /Masse MgO [31]

Tabelle 8: Rezeptur St-MB-GV2 für MgO-Spritzbeton (Trockenspritzverfahren)

MgO-Sorte	G75 der Fa. STYROMAG mit 75 % MgO
Gesteinskörnung (Quarz 0 – 8 mm)	72,9 Masse-%
MgO (G75 der Fa. Styromag)	15,6 Masse-%
R-Lösung (Anmachflüssigkeit)	11,5 Masse-%
Masseverhältnis Zuschlag / MgO (G75)	4,7
Masseverhältnis R-Lösung / MgO (G75)	0,74
Dichte	2,26 g/cm³

7. Maßnahmen zur Beeinflussung des Lösungsangriffs

7.1 3-Zonen-Vorbauelement

7.1.1 Zielstellung

Das Ziel des Vorbauelementes besteht darin, dass bei einem Lösungsangriff durch an Tachyhydrit ungesättigte Lösungen eine Schädigung der Abdicht- und Lastabtragelemente und die nachteilige Beeinflussung der ALZ verhindert werden [17]. Zusätzlich wird angestrebt, neben der Erzeugung einer gegen das Salzgestein stabilen Lösungszusammensetzung eine lösungsinduzierte Kristallisation mit einer Wirkung in Richtung Selbstabdichtung zu erzeugen. Die Wirksamkeit eines Verschlussbauwerkes im leichlöslichen Carnallitit, welcher Tachyhydrit und Kieserit nebeneinander enthält, soll durch die 3-Zonen-Vorschüttung somit unterstützt bzw. gesichert werden.

Durch klein- und mittelmaßstäbliche Laboruntersuchungen wurden zunächst die Materialkomponenten (entsprechende Salze) und deren Mischungen für die einzelnen Zonen der Vorschüttung in Wechselwirkung mit relevanten, möglichen angreifenden Lösungszusammensetzungen hinsichtlich der Wirkungsweise getestet und optimiert. Die zu erwartenden Phasen- und Lösungsumwandlungen wurden mit dem Pitzer-Modell berechnet und anschließend mit experimentellen Ergebnissen bestätigt.

Mittels in situ Bohrloch-Versuchen wird das Wirkprinzip im CaT getestet.

Die Untersuchungen und ihre Ergebnisse sind ausführlich in TB 7 dargelegt.

7.1.2 Grundsätzlicher Aufbau der 3-Zonen-Vorschüttung und Ergebnisse der Laborversuche

Den vorgesehenen Aufbau und die Zusammensetzung der 3-Zonen-Vorschüttung zeigt Abbildung 48. Die Zone I besteht zu 50% aus Carnallit und zu 50% aus Calciumsulfalt-Halbhydrat (HH). Zone II wird aus 30% HH, 50% Carnallit und 20% Kieserit gemischt. Alternativ kann auch kieseritischer Carnallitit, welcher mind. 16% Kieserit enthalten sollte, verwendet werden. Ein Zumischen von K2SO4 erweist sich förderlich für die u.a. nach Lösungszutritt einsetzende Sekundärkristallisation von Polyhalit unter Volumenzunahmen. Für die letztendliche Erzeugung einer tachyhydritstabilen Lösung wird Zone III anfänglich aus einer CaCl2·2.75H2O-„Phase“ aufgebaut (durch Mischen von CaCl2 -Hydraten), an welche sich wasserfreies CaCl2 anschließt. Diese Basismischungen wurden nach grundsätzlichen Untersuchungen, über die in [17, 18] berichtet wurde, ermittelt.

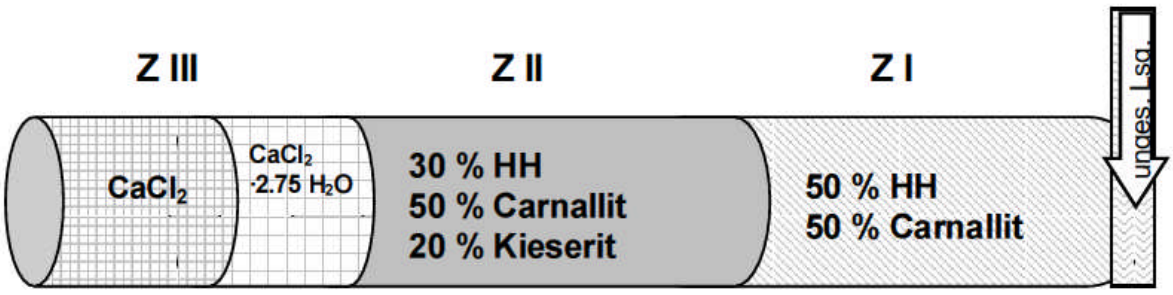

Abbildung: 48: Schematischer Aufbau und Zusammensetzung des Vorbauelements Schüttung

Im Labormaßstab wurden fünf Rohrversuche (D = 9 cm oder 13 cm) unter Beaufschlagung einer Ausgangslösung der Zusammensetzung zwischen NaCl und Q-Lösung sowie einer Q-Lösung durchgeführt [17]. Generell wurde nachgewiesen, dass die ausgetretene Lösung tagesättigt ist. Probleme ergaben sich durch Zusammensacken der Schüttungen infolge der unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Volumenänderungen der Reaktionen bzw. der

Verzögerung der Sekundärkristallisation und auch bodenmechanisch auf Grund des Wegfalls der scheinbaren Kohäsion bei Lösungszutritt.. Um ein Überfließen der zutretenden Lösung im “Firstbereich” zu verhindern, müssen zwischen den einzelnen Zonen Gipsplatten eingebaut werden, die die durchtretende Lösung zwingen, die gesamte Salzschüttung zu durchdringen. Diese Gipstrennwände zwischen den Zonen sind notwendig und fester Bestandteil des 3-Zonenkonzepts, um die bei schnellem Lösungszufluss verzögert einsetzenden Kristallisationsprozesse bzw. Mineralneubildungen und folglich den Setzungserscheinungen des Schüttgutes entgegenzuwirken. Die Kristallisationsprozesse in den Zonen führen zur Verringerung der Permeabilität. Unabhängig vom Sättigungsgrad der Zutrittslösung erfolgt die Umwandlung in eine tachyhydritstabile Lösungszusammensetzung nach dem Durchgang durch das Zonenmaterial (s. TB 8.1).

7.1.3 In situ Versuche zur 3-Zonen-Vorschüttung

Die Umsetzung der Laborversuche für den in-situ Nachweis des Wirkprinzips der 3-Zonen-Vorschüttung erfolgte in der Grube Teutschenthal in der Begleitstrecke am Versuchsort VO3. Für die mittelmaßstäblichen Versuche wurden Bohrlöcher von 1,20 – 1,30 m Länge und 20 cm Durchmesser mit einer Neigung von 10° (abfallend vom Bohrlochmund) angelegt. Mit der Neigung soll das Eindringen und die Fließrichtung der später den Schüttsalzen zugeführten Lösung vorgegeben werden. Der Abstand der Bohrlöcher voneinander betrug etwa 4 m (Abbildung 49).

Bei den in situ Versuchen wurde nicht die gesamte Vorschüttung nachgebildet, sondern nur die Zonen II und III, um den unter praktischen Bedingungen am wahrscheinlichsten Fall – die Umwandlung von R-Lösung in ta-gesättigte Lösung nachzuweisen.

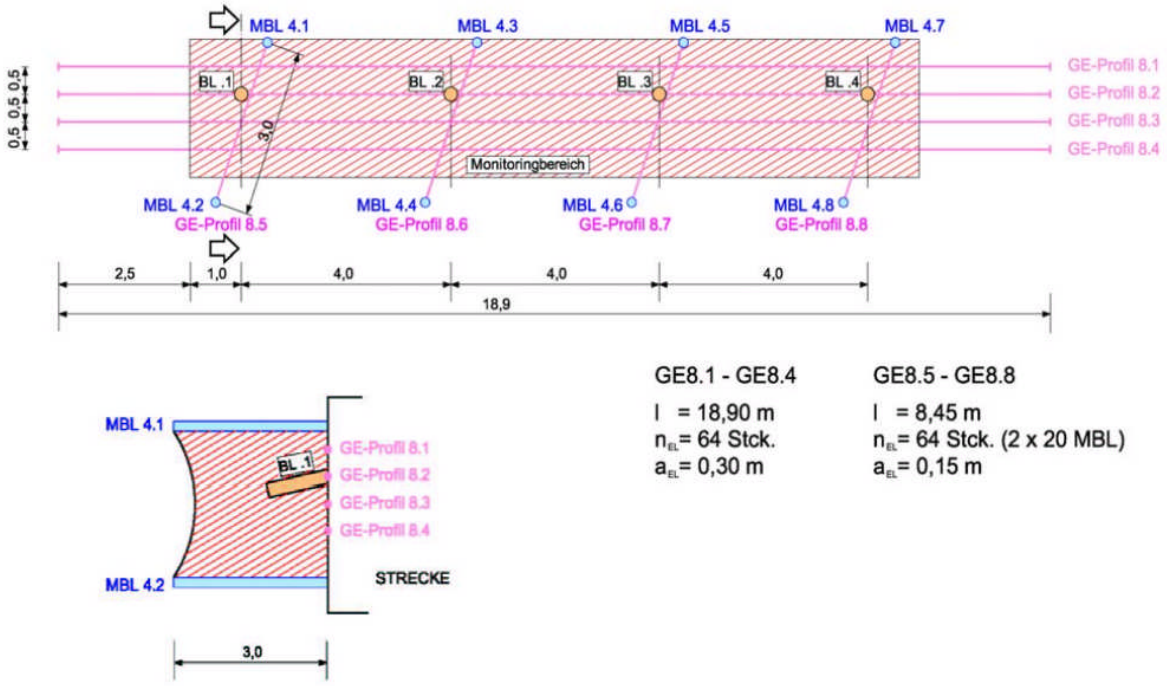

Abbildung 49: Schematische Darstellung der Anordnung der Bohrlochversuche und der Geoelektrik-Profile

Bevor die Schüttsalze in die Bohrlöcher BL1 und BL2 eingebracht wurden, wurden am Streckenstoß Multielektroden-Geoelektrikprofile angebracht. Mit den versuchsbegleitenden geoelektrischen Messungen sollten während der Lösungsbeaufschlagung der Versuchsbohrlöcher Änderungen der Gebirgsfeuchtigkeit in der Bohrlochumgebung

detektiert werden. Die schematische Anordnung der Bohrlöcher und der Geoelektrikprofile ist in Abbildung 49 dargestellt. Nach Versuchsende wurden die Bohrlöcher zu stofflichen Untersuchungen der Reaktionsvorgänge zurückgebaut.

Folgende Ergebnisse wurden bei den in situ Versuchen erzielt (TB 8.1):

- Durch chemisch-analytische Untersuchungen wurde mit dem Rückbau des Bohrlochversuches BL1 nach einem Jahr die zielführende Wirkungsweise der Vorschüttung hinsichtlich Selbstabdichtung und Lösungswandlung analog den Laborvoruntersuchungen nachgewiesen.
- Die alternierend geöffneten Gipstrennwände sind ein wesentlicher Bestandteil des Wirkungsprinzips. Setzungs- und Sackungserscheinungen der eingebauten Salze werden so vermieden und konnten auch nicht beobachtet werden.
- Der Rekristallisationsprozess des Zone III–Materials mit Lösung führt zu einem hohen Volumenzuwachs an Feststoff. Es ist anzunehmen, dass die Bildung des hoch verfestigten Kristallgefüges aus $CaCl_2$ bzw. dessen Hydraten mit einer Quelldruckentwicklung einhergeht.
- Die Lösungswandlung und Phasenumbildung der in BL1 eingebrachten Schüttsalze bei Zutritt von R-Lösung wurde mit Hilfe des Pitzer-Modells berechnet und mit den Rückbauergebnissen verglichen. Die Berechnungsergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen der stofflichen Analysen an den Reaktionsprodukten, die nach Rückbau des Bohrlochs BL1 erhalten wurden, überein.
- Die versuchsbegleitenden geoelektrischen Messungen stehen nicht im Widerspruch zu den beobachteten Versuchsergebnissen; sie sind jedoch in ihrer räumlichen Auflösung nicht ausreichend, um Details der Flüssigkeitsausbreitung in der unmittelbaren Bohrlochumgebung auszuweisen.
- Mit den nachgewiesen Kristallisationsprozessen, welche in der Vorschüttung bei Lösungszutritt, Lösungswandlung und Lösungsverbrauch erfolgen, ist die Funktionalität des Vorbauelements im Carnallititgebirge nachgewiesen. Im in situ-Versuch konnten die vorangegangenen Laborversuche reproduziert werden.

7.1.4 Schlussfolgerungen für die Dimensionierung des Vorbauelementes

Für die Schüttsalze der einzelnen Zonen wurden die Proctordichten bestimmt und beispielhaft für einen Einbauquerschnitt von 3 m für die Gesamtzonenlänge von 14 m und alleinig für Zone III mit 10 m Länge die Lösungswandlungskapazität verbunden mit den zugehörigen Phasenumwandlungen (Kristallisation) in Anlehnung an die experimentelle Befunde mit Hilfe des Pitzer-Modells berechnet.

Für die tachyhydritstabile Gleichgewichtslösung (Ca-Mg-Cl-Lösung = $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung) wurde die Wechselwirkung mit einem MgO-Dammbauwerk, entsprechend der im Rahmen des Projektes entwickelten MB10-Rezeptur, welche aus 5-1-8 Phase und überschüssigem MgO besteht, exemplarisch berechnet und durch Laborbefunde bestätigt. Die Umsetzung des MgO mit Ca-Mg-Cl-Lösung verläuft unter erheblicher Volumenzunahme durch Bildung der 3-1-8-Sorelphase, zum Teil auch Tachyhydrit und der $CaCl_2$-Hydrate, was positiv auf das Verheilen von Rissen im Dammbauwerk und auf die Kontaktfuge zum angrenzenden Salzgebirge wirkt (Expansionsdruckentwicklung). Eine Verringerung des Porenvolumens sollte die Folge sein.

Die Wirksamkeit eines Verschlussbauwerkes im leichlöslichen Carnallitit, welcher Tachyhydrit und Kieserit nebeneinander enthält, wird durch die 3-Zonen-Vorschüttung unterstützt bzw. gesichert. Ohne die Gewährleistung des Zutritts von tachyhydtitstabiler Lösung stellt die Auflösung des Tachyhydrits ein Risiko für die ALZ, speziell im Dammbereich dar. Nach einer Grobdimensionierung beträgt die Länge der Vorschüttung bei einem angenommenen Streckenquerschnitt von ca. 7 m² (entspricht Streckendurchmesser

von ca. 3 m) ca. 14 m. In den In-situ-Versuchen wurde beim Einbau 85 – 90% der Proctordichte der jeweiligen Materialien erreicht (Tabelle 9).

Tabelle 9: Dimensionierung des Materials im Vorbauelement auf 3m Streckenquerschnitt

	Proctor-Dichte [g/cm³]	RV 5		Dimensionierung auf Streckenquerschnitt von 3m		
		Fülllänge [cm] bei Ø 13 cm	Fülldichte [g/cm³]	Länge **[m]**	nach 90% der Proctor-Dichte **[t]**	nach Fülldichte für RV 5 [t]
Zone I	1.56	14	1.33	**3.28**	**32.56**	30.85
Zone II						
feucht	1.81	12	1.33	2.81	32.39	26.44
trocken	1.69	12.5	1.24	**2.93**	**31.50**	25.68
Zone III						
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	1.15	21	1	**4.92**	**36.32**	34.79
$CaCl_2$	0.86					

Im vorliegenden Fall (angenommener Zutritt von Q- oder R-Lösung) kann die Zone 1, welche bei Zutritt einer gesättigten NaCl-Lösung zur Erzeugung einer Q-Lösung als Bestandteil des Vorbauelementes konzipiert wurde, entfallen. Im Falle eines Zutritts von Q-Lösung beträgt die Umwandlungskapazität der Zone II in R-Lösung ca. 37 m³ Zutrittslösung. Unter den vorgegebenen Bedingungen (7 m² Querschnitt) ergibt das für einen hydraulischen Gradienten von 1 (für H = L) und eine hydraulische Leitfähigkeit des Gesamtsystems $5 \cdot 10^{-10}$ m/s eine Wirkzeit von ca. 335 Jahren.

Die Zusammensetzung der Zone II wurde dabei wie folgt optimiert: 30% Halbhydrat + 55% Carnallitit mit 5% NaCl + 15% Kieserit mit 5% $K_2 SO_4$. Das K_2SO_4 fördert stärker die Bildung von Polyhalit anstelle von Anhydrit, was einen höheren Volumenzuwachs und Verfestigungseffekte in der Zone II bewirkt.

Ist mit einer Zutrittslösung nahe R zu rechnen, kann dem Zone II-Material bereits etwas $CaCl_2 \cdot 2\ H_2O$ (analog in situ Versuch) zugesetzt werden und entsprechend verkürzt vor dem $CaCl_2$ der Zone III verfüllt werden. Damit setzt die Umwandlung in Richtung tachyhydritstabile Ca/Mg-Cl-Lösung bereits ein. Die Umwandlung der R-Lösung in die Ca/Mg-Cl-Lösung erfolgt in der Zone III mit der Kristallisation von $CaCl_2$-Hydraten und Tachyhydrit, wobei ein kompletter Verschluss des Porenraum bzw. der Wegsamkeiten möglich ist.

Für die Umsetzung von 36 t $CaCl_2$ (ohne Dihydratanteil) können ca. 60 m³ R-Lösung in Ca/Mg-Cl-Lösung umgewandelt werden. Entsprechend dem in situ-Versuch (BL1) wäre bereits nach dem Zutritt von 22,5 m³ R-Lösung der Streckenquerschnitt im mittleren Bereich der Zone III (nach Reaktion mit 18 t $CaCl_2$) zukristallisiert. Wenn keine Zirkulation der Zutrittslösung stattfindet (wie bei Vorhandensein von alternierend geöffneten Trennwänden), stellt sich ein Konzentrationsgradient in der Vorschüttung von Q- über R- zu Ca/Mg-Cl Lösung ein. Letztere steht mit $CaCl_2$-Hydraten und Tachyhydrit (ebenso Carnallit) im Gleichgewicht. Löseprozesse können nicht mehr stattfinden.

Für die tachyhydritstabile Gleichgewichtslösung (Ca/Mg-Cl-Lsg.) wurde die Wechselwirkung mit einem MgO-Dammbauwerk entsprechend der im Rahmen des Projektes entwickelten MB10-Rezeptur (Bindemittelphase: 5-1-8 neben MgO) exemplarisch berechnet und durch Laborbefunde sowie die Permabilitätsmessungen am GV 2 bestätigt. Im Ergebnis zeigt sich durch Bildung der 3-1-8 Bindemittelphase im Bauwerksgefüge eine Volumenzunahme bzw. eine Permeabilitätsverringerung.

7.2 Vorbauelement auf der Basis von Gel-Baustoffen

7.2.1 Zielstellung

Die Entwicklung von so genannten dauerplastischen Gelbaustoffen auf der Basis von konzentrierten $MgCl_2$-Lösungen geht auf ein von K-UTEC in Zusammenarbeit mit der Schachtbau Nordhausen GmbH und der Otto von Guericke Universität in Magdeburg bearbeitetes und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördertes Verbundprojektes zurück [13, 14]. Das Grundprinzip des entwickelten Verfahrens basiert auf der Fixierung von in untertägigen ehemaligen Grubenbauen oder Schächten des Kalibergbaus anstehenden konzentrierten $MgCl_2$-Lösungen, die in unterschiedlicher Konzentration die gelösten Mineralsalze $MgSO_4$, NaCl und KCl enthalten, durch die Zugabe kleiner Mengen eines oder mehrerer Bindemittel zu einem ortsstabilen, dauerplastischen Körper zu stabilisieren. Als Bindemittel können Brannt- und Löschkalk, Dolomitbranntkalk und Dolomitkalkhydrat oder auch kaustisch gebranntes Magnesiumoxid unterschiedlicher Reaktivität bzw. Aktivität verwendet werden. Typische Bindemittelzusätze liegen zwischen 20 bis 150 kg je Kubikmeter zu verfestigende Lösung.

Im ersten Bearbeitungsteil des CARLA-Projektes bis 2004 [17] wurde festgestellt, dass für den Spezialfall des Bergwerkes Teutschenthal, in dem neben dem Hauptmineral Carnallit sowohl Kieserit und Tachyhydrit auf engstem Raum nebeneinander vorkommen, keine Salzlösung darstellbar ist, die mit allen in der Grube vorkommenden Mineralsalzen im Gleichgewicht steht.

Die Untersuchungen zu möglichen Wechselwirkungen des Wirtsgesteins mit verschiedenen Lösungstypen (Q-, R-Lösung, $MgCl_2$+$CaCl_2$-Lösung unterschiedlicher Zusammensetzung) zeigten, dass Tachyhydrit das sensitivste Mineral bei einem Lösungsangriff ist und bereits bei geringer Untersättigung der zutretenden Lösung ein nahezu vollständiges Herauslösen dieses Minerals aus dem Wirtsgestein und damit eine deutlichen Erhöhung der Porosität erfolgt. Bei Vorliegen von Tachyhydrit-Bändern können sich im Extremfall entsprechende Fließwege für anströmende Fluide im Wirtsgestein bilden.

Im Rahmen des Vorhabens wurden erste Versuche zur Entwicklung von Gelbaustoffen auf der Basis von bei 25 °C Tachyhydrit gesättigten Lösungen mit unterschiedlichen $MgCl_2$- und $CaCl_2$-Gehalten begonnen. Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass eine Vergelung entsprechender Lösungen mit Bindemitteln des Typs $CaO/Ca(OH)_2$ bzw. MgO prinzipiell möglich ist.

Im Ergebnis umfangreicher Labor- und in situ Untersuchungen, über die in TB 8.2 ausführlich berichtet wird, wurden die nachfolgend kurz zusammengestellten Ergebnisse erzielt:

Untersuchungsziele:

- Entwicklung dauerplastischer und ortsstabiler Gelbaustoffe auf der Basis konzentrierter $MgCl_2$-Lösungen.
- Einsatzgebiet der Baustoffe: Untertage im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) zur Herstellung und Abdichtung langzeitstabiler Abschlussbauwerke (Streckendämme).
- Eignungstest unter in situ-Bedingungen der Grube Teutschenthal (in Kooperation mit TU BAF)
- Die Vergelung der Lösung sollte durch Zugabe relativ kleiner Mengen von Bindemitteln erreicht werden. Sie soll dabei durch chemische Reaktion des Mg^{2+} und Cl^- mit den Bindemitteln erfolgen, wobei etwa gleiche Feststoffphasen (basische Magnesiumcloridhydrate) wie im klassischen Baustoffeinsatz erwartet werden.
- Diese Feststoffphasen können wegen ihrer feinkörnigen Struktur hohe Festigkeiten erreichen.

- Im Falle der Vergelung kann wegen dieser Phasenstruktur ein erheblicher Anteil Lösung in den Poren eingelagert werden. Ziel ist die Herstellung eines dauerplastischen Gelkörpers.
- Durch zu entwickelnde Rezepturen für den Gelbaustoff waren die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Endproduktes so einzustellen, dass eine Vor-Ort-Verbauung unter Beachtung der gegebenen Verhältnisse (Wirtsgestein, anströmende Lösungen, Temperatur usw.) realisierbar ist.

Speziell zu berücksichtigende Bedingungen vor Ort in der Grube Teutschenthal:

- Neben dem Hauptmineral Carnallit stehen auf engstem Raum Tachyhydrit, Kieserit und in kleineren Mengen Steinsalz, Kali sowie weitere Minerale an.
- Umgebungstemperatur zwischen 20 °C und 30 °C.
- Zu verschließende Streckenquerschnitte im Bereich H • B ca. 8 • 2 m^2
- Anströmende Lösung: u. a. ungesättigte Tachyhydritlösung.

Vorgehensweise bei den Untersuchungen:

- Aus früheren Untersuchungen war bekannt, dass bislang keine Salzlösung darstellbar war, die mit allen hier vorkommenden Mineralsalzen im Gleichgewicht steht. Tachyhydrit im Wirtsgestein hatte sich als das sensibelste, anfälligste Mineral erwiesen. Gefolgt von Kieserit.
- Nur tachyhydritgesättigte Lösungen zeigten gegenüber Tachyhydrit und den übrigen im Salzgestein vorhandenen Mineralien (außer Kieserit) ein neutrales Verhalten.
- Aufbauend auf den Ergebnissen der 1. Phase des Projektes CARLA kamen deshalb nur Baustoffe in Betracht, die im Einsatzfall keine oder eine tolerierbare Schädigung des Wirtsgesteins zur Folge haben, hinreichend fest und dauerplastisch sind und anströmende Lösung beherrschbar machen.
- Die zur Erfüllung der zu stellenden und in TB 8.2 im Detail formulierten Anforderungen einzusetzenden mineralischen Systeme auf Basis wässriger Anmischflüssigkeiten müssen sicherstellen, dass im Einsatzfall des fertigen Gelbaustoffes vor Ort das Porenfluid vollständig mit Tachyhydrit gesättigt ist, um Schädigung am Wirtsgestein auszuschließen.
- Hinsichtlich der Langzeitsicherheit ergaben sich bei der Bearbeitung des Vorhabens zusätzlich Notwendigkeiten zur Entwicklung weiterer Baustoffe (Mörtel und Betone auf Tachyhydrit-Basis). Sie wurden unter in-situ-Bedingungen umgesetzt.

Für die Entwicklung der Gelbaustoffe bis zur Ersterprobung vor Ort wurden folgende Arbeitsschritte gewählt:

- o Entwicklung geeigneter tachyhydritgesättigter mineralischer Systeme (Leimmatrix) auf Basis wässriger Anmischflüssigkeiten,
- o Vorversuchsreihen zur Auswahl geeigneter Ausgangsstoffe,
- o Rezepturentwicklung und Beprobung,
- o Rezepturauswahl und Vorschlag für deren in situ-Erprobung.

Nach Rezepturentwicklung und -erprobung unter Laborbedingungen wurden als prinzipiell geeignet die Rezepturen R1/1 bis R1/4 ausgewählt. Als besonders Erfolg versprechend wurden für die in situ-Erprobung vor Ort festgelegt und unter folgender Nr. in den Jahren 2006 und 2008 getestet:

- o Rezeptur R1/1 = GBL – P03 (14.9.2006)

o Rezeptur R1/3 = GBL – P04 (03.9.2008).

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden dauerplastische Gelbaustoffe auf der Basis von an Tachyhydrit gesättigten Lösungen entwickelt und z. T. in der Grube Teutschenthal erprobt. Diese Baustoffe stellen eine Weiterentwicklung der patentierten K-UTEC-Gelsysteme auf der Basis von konzentrierten $MgCl_2$- und $MgSO_4$-haltigen Lösungen dar, die üblicherweise in Salzbergwerken und Schächten mit aufgeschlossenem Carnallitit und ohne Anwesenheit von Tachyhydrit eingesetzt werden.

Diese Gelsysteme wurden so modifiziert, dass sie bei einem weiterhin hohen Porenfluidanteil ein gegenüber dem Tachyhydrit im Gleichgewicht stehendes Porenfluid enthalten. Darüber hinaus ist es gelungen, durch den Einsatz von auf 50 °C erwärmten und dadurch gegenüber der Umgebungstemperatur am Einbauort (ca. 25 °C) an Tachyhydrit übersättigten Lösungen zusätzlich ein Tachyhydritdepot in die Gelbaustoffe einzubauen.

Die Gelbaustoffe geben bei Druckbeanspruchung ein Teil des Porenfluides ab. Im Falle des Durchströmens der Gelbaustoffe mit noch nicht vollständig an Tachyhydrit gesättigter Lösung kann diese bis zur Sättigung das erzeugte Tachyhydritdepot auflösen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft dieser Gelbaustoffe auf Tachyhydritbasis ist die Fähigkeit in feinste Risse und Spalten zu penetrieren, die infolge der Gelbildung und der Rekristallisation von Tachyhydrit (im Bedarfsfall auch Bischofit) aus dem übersättigtem Porenfluid zumindest teilweise verschlossen und abgedichtet werden.

7.2.2 Grundkonzept für ein modular aufgebautes Vorbauelement auf Gel-Basis

Für die in Deutschland anzutreffenden aktiven und ehemaligen Kalibergwerke im Carnallitit, in denen üblicherweise das kaliführende Mineral Carnallit neben Halit, Kieserit und Anhydrit vorliegt, existieren Salzlösungen (Q- und R-Lösung), die mit allen diesen Mineralien im Gleichgewicht stehen. Bei der kontrollierten Flutung werden in der Regel entsprechende Lösungen eingesetzt, so dass eine signifikante Schädigung des Wirtsgesteins ausgeschlossen werden kann. Für die Errichtung langzeitstabiler Streckenverschlüsse mit MgO-Beton oder vergleichbaren Baustoffen müssen keine zusätzlichen Maßnahmen für eine Konditionierung der zum Dammstandort zutretenden Lösung getroffen werden.

Im Falle eines zu erwartenden Absaufens stillgelegter Bergwerke im Carnallitit mit UTD- und/oder UTV-Betrieb ist mit einem Zutritt an Carnallitit ungesättigter Lösung zu rechnen. Unter diesen Bedingungen und für die besonders komplizierte Situation des Vorliegens von Tachyhydrit neben den typischen Begleitmineralen (Halit, Kieserit, Anhydrit) des Carnallitits, wie sie beispielsweise in der Grube Teutschenthal anzutreffen ist, werden zusätzliche Maßnahmen zur Einstellung eines für die langzeitstabile Streckenabdichtung verträglichen Lösungsmilieus notwendig.

Am Beispiel der geologischen Bedingungen in der Grube Teutschenthal, in der im Kalilager Tachyhydrit und Kieserit unmittelbar nebeneinander vorliegen, wurde die Konzeption eines modular aufgebauten Vorbauelements entwickelt, mit der unter thermodynamischen Gesichtspunkten vorhersagbare Bedingungen am Standort des Dichtungselementes geschaffen werden können (TB 8.2).

Unsicherheiten bestehen derzeit hinsichtlich einer akzeptablen Prognose zur chemischen Zusammensetzung der zum Dammstandort strömenden Lösung. Wahrscheinlich ist der Zutritt einer $MgCl_2$-reichen Lösung, die im günstigsten Fall einer R-Lösung entspricht. Niedrigere $MgCl_2$-Gehalte bis hin zu einer NaCl-dominierten Lösung sind jedoch auch möglich. Unwahrscheinlich bzw. auszuschließen ist das Vorliegen einer mit dem Tachyhydrit im Gleichgewicht stehenden Lösung.

An einem potenziellen Standort für eine Streckenabdichtung in der Grube Teutschenthal ist mit aufgeschlossenem Tachyhydrit u. a. neben Kieserit zu rechnen. Es existiert jedoch keine Salzlösung, die mit diesen beiden Mineralen im Gleichgewicht steht. Aufgrund der überragenden Bedeutung des Tachyhydrits bei der Schaffung möglicher Wegsamkeiten im

Gebirge infolge von Löseprozessen wurde das Konzept eines modular aufgebauten Vorbauelementes entwickelt, mit dem der Zutritt an Tachyhydrit ungesättigter Lösung unmittelbar an das Dichtelement verhindert werden soll. Die Untersättigung der anströmenden Lösung und der entwickelten Gelbaustoffe bezüglich des Kieserits ist unvermeidbar und im Unterschied zu einer Untersättigung an Tachyhydrit auch aufgrund der nachgewiesenen Kristallisation von Gips auf den Kieseritoberflächen nach bisherigen Erkenntnisstand als akzeptabel einzuschätzen.

Dieses Konzept eines modular aufgebauten Vorbauelements verfolgt im Wesentlichen folgende Zielstellungen:

- Gewährleistung eines möglichst großen Abstandes von an Tachyhydrit ungesättigter Lösung vom Hautdichtelement
- Gezielte Aufsättigung der zum Standort der Streckenabdichtung strömenden Lösung möglichst bis zur Tachyhydritsättigung
- Vorhaltung eines Tachyhydritlösungsstapels zur Penetration eines Schwerefluids (Tachyhydritlösung) in das Gebirge bei Auftreten konvergenzbedingter Wegsamkeiten vor der Hauptdichtung (Einbau ohne Stützgerüst)
- Abdichtung möglicher Wegsamkeiten im Gebirge vor der Hauptdichtung durch Errichtung von Vorbaumodulen aus Gelbaustoffen mit Tachyhydritdepot, Injektion des Gelbaustoffs in vorhandene Risse durch Einbau unter Druck (Einbau in ein steifes Schottergerüst)
- Einbau eines Tachyhydritdepots in die Gelbaustoffe zur ggf. notwendigen Restaufsättigung von $CaCl_2$ /$MgCl_2$-Lösungen aus der 3-Zonen-Vorschüttung

Mit der am Institut für Anorganische Chemie der Bergakademie Freiberg entwickelten 3-Zonen-Vorschüttung (Abschnitt 7.1) können NaCl- bzw. Q- und R-Lösung oder auch Lösungen, die in ihrer Zusammensetzung zwischen diesen Lösungstypen liegen, gezielt bis zur Einstellung einer Tachyhydritsättigung aufkonzentriert werden. Die Entwicklung geht vom ungünstigsten Fall, also von einer reinen NaCl-Lösung aus, die nach dem Durchlaufen der 3-Zonen-Vorschüttung bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes zum Tachyhydrit umgewandelt wird. In der 1. Zone wird eine Q-Lösung erzeugt, die in der Zone 2 in eine R-Lösung gewandelt und schließlich in der Zone 3 bis zur Tachyhydritsättigung aufkonzentriert wird.

Die in situ-Erprobung der 3-Zonen-Vorschüttung zeigt, dass zumindest im Bohrlochmaßstab eine vollständige Umwandlung einer reinen NaCl-Lösung in eine Tachyhydrit-Gleichgewichtslösung gelingt. Für kleine Querschnitte konnte, vergleichbar mit dem „selbst verheilenden Versatz“ (SVV), sogar eine vollständige Abdichtung erreicht werden.

Das Prinzip der 3-Zonen-Vorschüttung stellt eine geeignete Möglichkeit zur Aufkonzentrierung der zum Abdichtungselement strömenden Lösung dar. Insbesondere die notwendige Erhöhung der $CaCl_2$-Konzentration gelingt nur durch den Einsatz fester Salze (wasserfreies $CaCl_2$ oder $CaCl_2 \cdot 2H_2O$).

Vor allem für größere Streckenquerschnitte und bei unbekannten Zutrittsraten der anströmenden Salzlösung ist eine sichere Vorhersage des Durchströmungsverhaltens einer verdichteten Kornschüttung problematisch. Das Restrisiko eines Durchtritts noch nicht vollständig an Tachyhydrit gesättigter Lösung mit Schädigungspotenzial insbesondere im Bereich der ALZ am Standort kann nicht ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden durch die K-UTEC zwei weitere Module eines Vorbauelements auf der Basis von Gelbaustoffen mit eingebautem Tachyhydrit-Lösungsstapel und einem Depot aus rekristallisiertem Tachyhydrit entwickelt. Hierfür stehen unterschiedliche Qualitäten von Gelbaustoffen zur Verfügung, die in Abhängigkeit von der Standortsituation eingesetzt werden können.

Das erste Element (A) soll in einer „weichen“ Ausführung errichtet werden. In diesem Fall wird der reine, in einem Intensivmischprozess erzeugte Gelbaustoffe zwischen 2 statische,

lösungsdichte Widerlager mit einem Druck von 5 bis 10 bar eingebaut. Die Entlüftung des Bauwerks erfolgt vom höchsten Punkt in der Firste über eine Entlüftungsleitung.

Mit dieser Einbauweise wird der noch fließfähige Baustoff in die in der ALZ möglicherweise vorhandenen Risse bzw. in die VWZ injiziert und dichtet diese ab. Als Feststoffphasen liegen im abgebundenem Entwicklung von Gelbaustoffen für den Einsatz als Vorbauelement in tachyhydrit- und kieserithaltigen Salzformationen Gelbaustoff neben den eingesetzten Füllstoffen basisches Magnesiumchloridhydrat (3:1:8) und aus dem übersättigten Porenfluid rekristallisierter Tachyhydrit vor.

Die nachfolgende Abbildung 50 zeigt den Grundaufbau eines solchen Elementes.

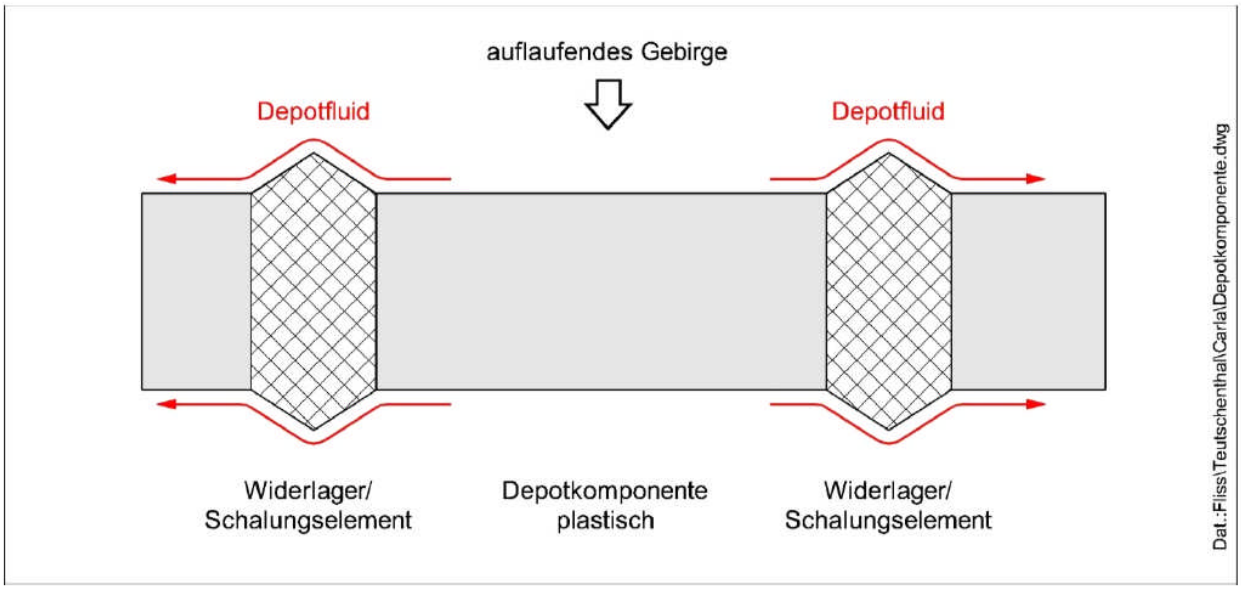

Abbildung 50: Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – weiche Ausführung

Die Wirkungsweise dieses Elements basiert auf der Abpressung von an Tachyhydrit gesättigter Porenlösung bei auflaufender Konvergenz. Diese Lösung dringt als Schwerefluid in vorhandene Wegsamkeiten der ALZ ein und behindert dort die Fließwege möglicher anströmender ungesättigter Fluide. In-situ-Messungen von IBeWa im Bergwerk Teutschenthal zeigen darüber hinaus die zumindest temporär abdichtende Wirkung von Injektionen mit Tachyhydritlösung in der ALZ.

Mit dem eingebauten Tachyhydritdepot ist eine Restaufsättigung der aus der 3-Zonen-Vorschüttung austretenden und ggf. noch nicht zu 100 % an Tachyhydrit gesättigten Lösung möglich. Dieses Tachyhydritdepot ersetzt jedoch nicht die Funktion der 3-Zonen-Schüttung, sondern ist nur als Sicherheitselement wirksam.

Die weiche Auslegung des Vorbauelements schirmt das eigentliche Dichtungselement des Streckenverschlusses gegen einen unkontrollierten Zutritt von an Tachyhydrit ungesättigter Lösung im Versagensfall der 3-Zonen-Vorschüttung ab und verhindert dadurch ein Herauslösen von Tachyhydrit aus dem Wirtsgestein (Schwerpunkt ALZ).

Die steife Auslegung (B) eines Vorbaumoduls mit den von K-UTEC entwickelten Gelbaustoffen auf Tachyhydritbasis sieht den Einbau von verdichtetem, weitgehend setzungsstabilen Schotter vor, dessen Zwickelräume mit Gelbaustoff ausgefüllt werden. Dieses Modul wird analog zur weichen Ausführung zwischen lösungsdichte Widerlager platziert. Der Einbau des Gelbaustoffs erfolgt von der Sohle zur Firste, in deren obersten Punkt die Entlüftungsleitung geführt wird. Der Baustoffeinbau muss so erfolgen, dass die Maßnahme vor der beginnenden Versteifung der Gelsuspension abgeschlossen ist. Der fließfähige Baustoff dringt in aufgelockerte Gebirgsbereiche ein und dichtet diese ab.

Die nachfolgende Abbildung 51 zeigt den prinzipiellen Aufbau der steifen Ausführung eines Vorbauelements auf der Basis von Gelbaustoffen mit Tachyhydritdepot.

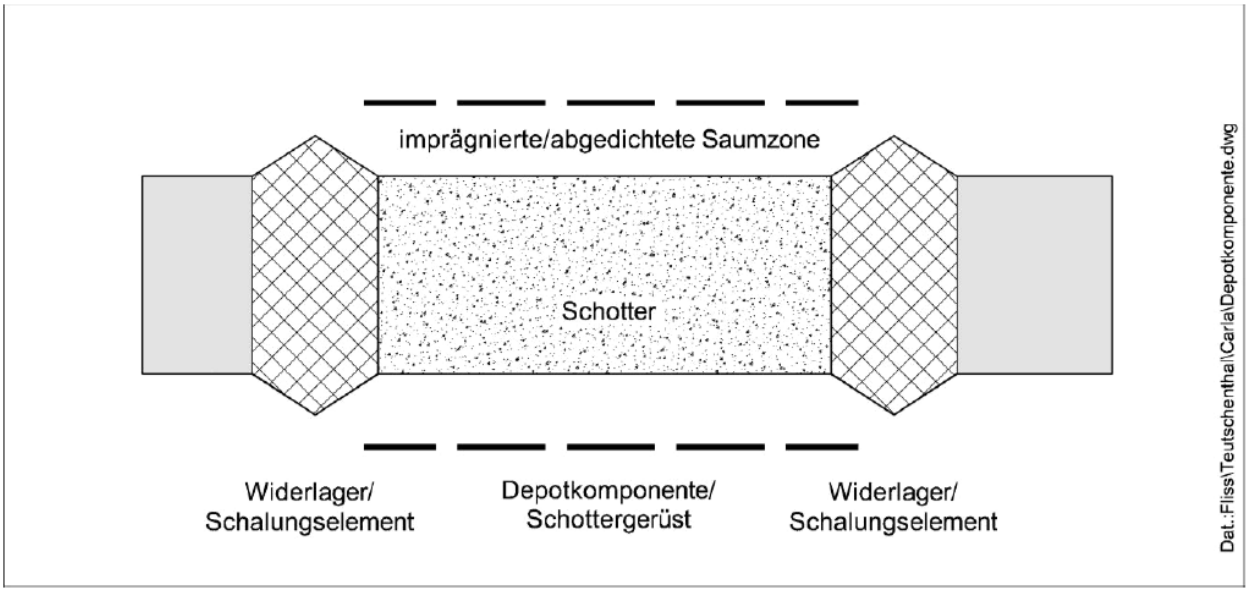

Abbildung 51: Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – steife Ausführung

Die prinzipielle Wirkungsweise dieses Moduls ist mit der weichen Ausführung vergleichbar. Im Unterschied dazu wird jedoch die Konvergenz des Gebirges in diesem Bereich durch den weitgehend setzungsstabilen Schotter auf ein Minimum begrenzt, so dass auch nicht mit einer signifikanten Vergrößerung der ALZ gerechnet werden muss.

Die wichtigsten Funktionen wie:

- Wirksamkeit als intergraler hydraulischer Widerstand,
- Vorhalten eines Tachyhydritlösungsstapels zur Abgabe in mögliche Wegsamkeiten in der ALZ,
- Depot zur Restaufsättigung an Tachyhydrit noch nicht vollständig gesättigter Lösung und
- Schutz der Hauptdichtung gegen einen unkontrollierten Lösungszutritt

entsprechen weitgehend denen der weichen Ausführung. Das verfügbare Lösungsvolumen und das Tachyhydritdepot je verbauter Volumeneinheit fallen jedoch durch den Schotteranteil deutlich geringer aus.

Für einen potenziellen Dammstandort, an dem das kaliführende Mineral Carnallitit neben den für Deutschland typischen Begleitmineralen des Carnallits Halit, Kieserit und Anhydrit zusätzlich noch Tachyhydrit enthält, ist die Errichtung eines modular aufgebauten Vorbauelementes vor die eigentliche Streckenabdichtung eine geeignete und notwendige Maßnahme zur Einstellung eines für den Standort verträglichen Lösungsmilieus. Der Zutritt an Tachyhydrit ungesättigter Lösung an das eigentliche Dichtungselement stellt ein Risiko insbesondere durch Schaffung zusätzlicher Wegsamkeiten (zusätzlich zur vorhandenen ALZ/VWZ) in der Kontaktfuge durch Auflösung von Tachyhydrit dar, das mit dem konzipierten Vorbauelement aus 3-Zonen-Vorschüttung und Gelbaustoffen mit Tachyhydritdepot beherrscht werden kann.

8. Rechnerische Modellierung von Funktionselementen und Funktionsprinzipien

8.1 Grundlagen

Rechnerische Nachweise der Standsicherheit und ggf. der Funktionstüchtigkeit eines Verschlussbauwerkes können grundsätzlich nur standortbezogen durchgeführt werden. Konkrete Standorte sind jedoch nicht der Gegenstand von Vorhaben der Grundlagenforschung. Dennoch müssen die Untersuchungsergebnisse eines Forschungsvorhabens auch durch rechnerische Modellierung verifiziert und verallgemeinerungsfähig gestaltet werden. Im Vorhaben wurden deshalb an dem exemplarischen Standort „Versuchsort VO3 der Grube Teutschenthal“ die untersuchten Funktionselemente modelliert und rechnerisch begleitet, die Berechnungsmodelle durch Messungen an den Funktionselementen geprüft, weiterentwickelt und verifiziert sowie die daraus entwickelten Grundsatzlösungen in Berechnungsstudien bzgl. der Wirkungsweise der Hauptelemente und ihrer Wechselwirkung mit dem umgebenden Gebirge analysiert. Die Verhaltensweisen einzelner Elemente im Zeitverlauf wurden vorausberechnet.

Somit ist es auch möglich, für den Versuchsstandort VO3 in Teutschenthal die messtechnisch (im Rahmen der Bearbeitungszeit) nicht vollständig bestimmbaren Spannungsentwicklungen infolge des Aufkriechens des Gebirges auf die Hauptelemente des langzeitsicheren Dammabschnittes (ED, s. Abschnitte 10 und 11) mittels verifizierter und an den Beispielstandort angepasster Stoffgesetze und Berechnungsverfahren zu bewerten. Dabei werden die Berechnungen mit Hilfe von am Versuchsort VO3 gewonnener in situ Daten durchgeführt. Auf diese Weise kann die grundsätzliche Realisierbarkeit exemplarischer Abdichtbauwerke und deren Langzeitsicherheit belegt werden.

Im Vordergrund der Berechnungen standen gekoppelte mechanisch-hydraulische Berechnungen; das chemische bedingte Verhalten wurde zunächst über gesonderte theoretische und experimentelle chemische Untersuchungen und ggf. daraus abgeleitete mechanisch-hydraulische Parameter beurteilt bzw. es wird später in die Berechnungsmodelle eingebracht. In der weiteren Entwicklung der rechnerischen Modellierungen ist der Übergang zu mechanisch-hydraulisch-chemisch gekoppelten Modellen zu verfolgen.

8.2 Geomechanische Charakterisierung der Modellmaterialien und Modellbereiche

Die für die rechnerischen Modellierungen erforderlichen mechanischen und hydraulischen Parameter wurden für den Standort Teutschenthal über einen längeren Zeitraum bestimmt. Sie ergeben sich aus zahlreichen gutachterlichen Berechnungen für die laufenden Versatzarbeiten, aus dem Langzeitsicherheitsnachweis für das Grubenfeld Teutschenthal [26, 3], aus Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens im Teil 1 [17], aus der Fachliteratur [27] sowie aus speziell für den Versuchsort VO3 durchgeführten Labor- und in situ Untersuchungen. Sie betreffen in erster Linie den unverritzten CaT und die Verwitterungszone VWZ (s. TB2, TB 3 und TB 6) sowie die MgO-Baustoffe (s. TB 5).

Neben den Festigkeitseigenschaften steht wegen der Zielstellung, ein steifes Lastabtrag- und Dichtelemente als Hauptkomponente des Abdichtbauwerkes zu errichten, das Kompressions- und Relaxationsverhalten der verschiedenen MgO-Baustoffvarianten im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Ergänzend zu den Stoffen selbst sind die Modellabschnitte, die im Bereich von Materialgrenzen im komplexen Modell entstehen, von besonderem Interesse. In erster Linie sind das die KF und die komplexe ALZ.

Scherversuche an frischen CaT-Oberflächen mit aufbetoniertem MgO-Beton (Phase 5-1-8) haben ergeben, dass die geomechanischen Kenndaten des Kontaktes etwas niedriger liegen als jene des unverwitterten CaT. Die Restscherfestigkeiten des CaT sind jedoch

niedriger als die Scherfestigkeiten der Kontaktfläche. Dieser Sachverhalt weist bereits darauf hin, dass CaT-Oberflächen, die einer Verwitterung ausgesetzt sind (VWZ, s. TB 2), eine geringere Scherfestigkeit aufweisen als der Kontakt MgO-Beton ⇔ unverwitterter CaT. Erstmalig konnten Zugfestigkeiten der Kontaktfläche CaT (unverwittert) ⇔ MgO-Beton experimentell mit Hilfe einer neuartigen Versucheinrichtung bestimmt werden (s. TB 2). Die resultierenden Zugfestigkeiten „des Kontakts“ erwiesen sich mit ≈ 0,5 MPa als deutlich niedriger als jene zwischen Steinsalz und MgO-Beton; die im Ergebnis einer Scherung entstehende Trennfläche stellte sich aber generell dicht an der Grenzfläche, aber noch innerhalb des CaT ein und nicht an der tatsächlichen Fuge CaT – MgO (ca. 0,5 bis 1 mm Abstand von der Trennfläche). Dieser Umstand macht es möglich, im Modell keine gesonderten geomechanischen Parameter der „Kontaktfuge“ (ähnlich den Eigenschaften von Kluftflächen im Felsgebirge) einzugeben, sondern vom festen Verbund auszugehen und die geomechanischen Schwächeflächen-Eigenschaften der VWZ zuzuweisen.

Eine sehr große Rolle für die Beurteilung der Druckentwicklungen in der KF der Großversuche (Normalspannungen) übernehmen die einbetonierten Druck-Messzellen bei den Großversuchen GV1 und GV2 (s. TB 7). Aus diesem Grunde erfolgten umfangreiche Kalibrierungen der Messelemente und Untersuchungen im eingebauten Zustand, d.h. eingebettet in MgO-Beton. Bestimmend sind die Unterschiede in den Verformungsmoduln von MgO-Beton und Messelement einerseits und die Nähe der bzgl. ihres Deformationsverhaltens nicht exakt charakterisierbaren VWZ im CaT-Kontakt. Eine gewisse Rolle spielt sicher auch die sich im Bereich der KF in der Anfangsphase der GV1 und GV2 verändernde Temperatur infolge Erwärmens und Wiederabkühlens des Betonkörpers.

Im Ergebnis der Untersuchungen zur Kalibrierung zeigte sich, dass die Druckmesselemente im untersten Druckbereich verzögert reagieren und erst ab einer Normalspannung von ca. 1 MPa (=10 bar) ein signifikanter Druckanstieg registriert werden kann, der der Kalibrierung entspricht (s. TB 3). Bei einem Messbereich der installierten Druckmessdosen von 20 MPa entspricht das einer „Ansprechschwelle“ von ca. 5% des Messbereiches. Die an der GV1 und GV2 bis zum Vorhabensende in der KF gemessenen Normaldrücke sind somit unterhalb von 1 MPa nicht korrekt und werden wahrscheinlich messtechnisch unterschätzt. Dieser Sachverhalt ist bei den Vergleichen zwischen Berechnungsergebnissen und Messdaten zu berücksichtigen.

8.3 Modellstudien zu den Großversuchen GV1 bis GV3

Ausgehend von den im Labor bestimmten Materialkennwerten wurden mit dem Programmsystem FLAC mittels sogen. Modellstudien im Rahmen der Planung der Großversuche über einen gekoppelten fluidmechanischen Modellansatz Spannungs- und Verformungszustände im Bauwerk und im Gebirge bei verschiedenen Belastungsfällen untersucht. Dabei kamen je nach Informationsfortschritt bei der Bearbeitung des Vorhabens unterschiedliche Parametergruppen und Modelldetails zur Anwendung.

Insgesamt wurden

- drei größere Modellstudien zum Großversuch GV1 (s. TB 6, Abschnitte 3, 4 und 7),
- eine vergleichende Modellstudie zu den Großversuchen GV1 und GV2 (s. TB 6, Abschnitt 5),
- eine Modellstudie zum Großversuch GV2 (TB 6, Abschnitt 8),
- eine Modellstudie für den Großversuch GV3 (TB 6, Abschnitt 6) sowie
- eine Modellstudie für ein komplexes Abdichtbauwerk (TB 6, Abschnitt 9)

realisiert.

Auf dieser Grundlage waren bereits in frühen Vorhabensphasen erste Bewertungen des untertägigen Dichtsystems mit seinen verschiedenen Komponenten (einschließlich des

MgO-Widerlagers beim GV3) sowie eine Berücksichtigung der hydraulisch-mechanischen Wechselwirkung in und um die Dammelemente, vorzugsweise im Bereich der KF möglich.

Bei den Berechnungen wurden jeweils mit geringen Abweichungen in den einzelnen Studien mehrere Bauzustände (BZ) untersucht:

Bauzustand BZ 1/2: Streckenausbruch und gleichzeitiges Gestalten der Einbaustelle des Elementes mit einer an die Realität angelehnten Auffahrungsgeschwindigkeit (beim GV1 z.B.: 0,5 m/Tag), anschließende Wartezeit: 6 Monate

Bei der Belastung der Streckenoberfläche spielt die Auffahrungsgeschwindigkeit eine große Rolle, je schneller die Auffahrung erfolgt, umso höher sind die Belastungen an der Kontur in der Nähe der Ortsbrust. Beim langsamen Vorgehen mit kleinen Abschlägen sind die Spannungen, die zu plastischen Verformungen führen, geringer und damit ist auch die Entfestigung und Auflockerung in der dilatanzbedingten ALZ kleiner.

Bauzustand BZ 3: Einbau des Dammkörpers und in einigen Fällen der Druckkammer innerhalb eines halben Jahres, weiterhin Kriechen, Dauer 6 Monate. Konservativerweise und aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde eine Bauzeit von 6 Monaten und ein kontinuierlicher Einbau im Berechnungsablauf angenommen.

Bauzustand BZ 4: Druckbeaufschlagung mit 0,01 MPa/d bis 8 MPa (800 Tage). Zwischenstufen des Druckanstiegs wurden abgespeichert und getrennt ausgewertet.

Bauzustand BZ 5: Kriechen bis zu einer Standzeit von 100 Jahren (mindestens weitere 24 Monate) ohne weitere Druckerhöhung.

Verallgemeinerte Ergebnisse:

GV1:

Die Studien wurden an rotationssymmetrischen Modellen unter Verwendung des visko-elastisch-plastischen Stoffmodells nach MINKLEY durchgeführt. In den einzelnen Studien wurden Festigkeits-, Verformungs- und Kriechparameter sowie die Kontaktbedingungen im Bereich der KF entsprechend dem Erkenntnisfortschritt bei der Standortcharakterisierung (s. TB 2) präzisiert und das Verhalten des Funktionselementes bei unterschiedlichen Druckbeaufschlagungen untersucht.

Zusammengefasst konnten die folgenden Ergebnisse festgehalten, in die Steuerung des GV1 einbezogen, für die Interpretation der Versuchsdurchführung des GV1 verwendet und für die Prognose der Verhaltensweise komplexer Dammbauwerke genutzt werden:

- Infolge des Streckausbruchs bildet sich konturnah ein höherpermeabler, aufgelockerter Gebirgsbereich heraus. Vorausgesetzt, dass die Herstellung eines weitgehend rissfreien, monolithischen Dammkörper gelingt, wird das Bauwerk mit Aufbringen der vollständigen Fluidbelastung infolge der höherpermeablen ALZ seitlich umströmt werden, und sich gleichzeitig von der Stirnfläche und von der ALZ ausgehend aufsättigen. Allerdings wurden zunächst nicht die standortspezifisch, am VO3 höheren Carnallititfestigkeiten, sondern jene vom VO1, und die lokale Permeabilitätsverteilung in der ALZ berücksichtigt, so dass einige Berechnungen konservative Prognosen repräsentieren.
- Infolge des durch Messungen zum Berechnungszeitpunkt belegten Kriechverhaltens baut sich innerhalb von 6 Monaten in der Kontaktfuge des Damms ein Normalspannungsniveau von $\sigma_n \approx 0{,}7$ MPa infolge der Gebirgskonvergenz auf.
- Die Berechnungen mit einer Flüssigkeits-Belastungsrate von 1,8 MPa/6 Monate bzw. 0,01 MPa/Tag zeigten, dass bis zum Erreichen eine Fluiddruckes von 1,8 MPa keine Erhöhung der Ausgangspermeabilität zu erwarten ist, da die Kontaktfuge überdrückt bleibt und dort auch keine Scherfestigkeitsüberschreitungen belegt wurden. Lediglich im druckseitigen Randbereich der ALZ wurde eine geringfügige Zunahme der Dilatanz errechnet.

- Im Rahmen einer weiteren Modellanpassung wurde der Einfluss einer VWZ mit stark abgeminderter Steifigkeit auf die Entwicklungen der Normalspannungen in der KF untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass der bis zu diesem Zeitpunkt über 400 Tage gemessene Normalspannungsaufbau mit dem Vorliegen einer Verwitterungszone erklärt werden kann, wobei der Kompressionsmodul der VWZ von ca. 4.000 MPa auf ca. 10 MPa abzumindern ist, um den beobachteten Befund zu reproduzieren.

Damit konnten die Berechnungsergebnissen den Messdaten beim GV1 gut angepasst werden. Einige typische Ergebnisse zeigen die Abbildung 52 und 53.

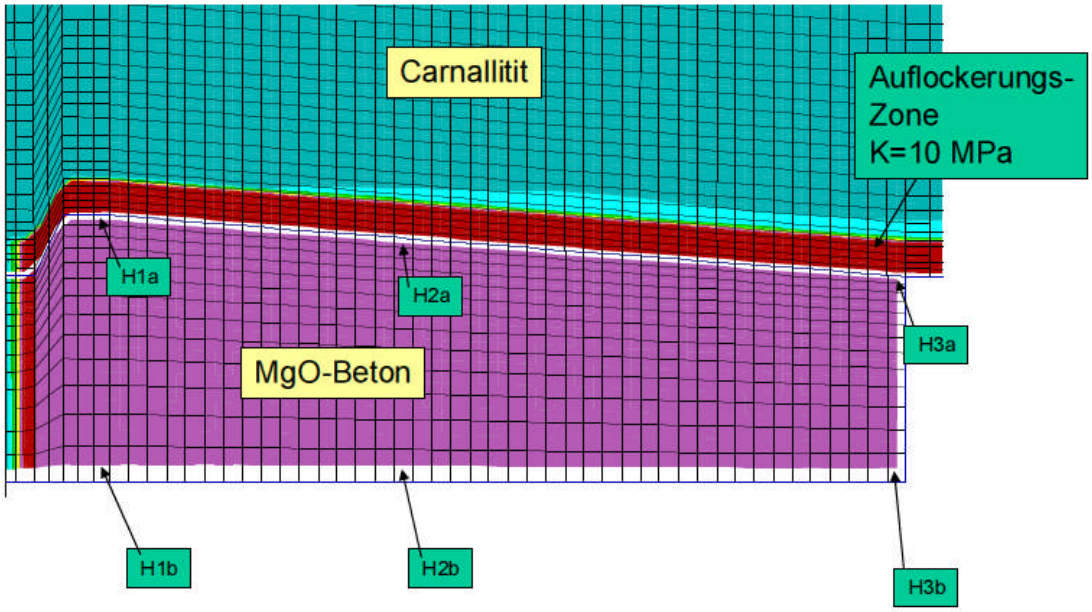

Abbildung 52: Modellierung GV1 mit abgeminderter Steifigkeit in der ALZ: Einfluss einer verringerten Steifigkeit der ALZ im GV1

GV2:

Die Studien wurden an einem 3D-Modell unter Verwendung des viskoelastisch-plastischen Stoffmodells nach MINKLEY durchgeführt. Damit wurde dem rechteckigen Querschnitt des MgO-Spritzbeton-Elementes im GV2 Rechnung getragen. Das Berechnungsmodell und die modellierten Bauzustände sind in Abbildung 53 dargestellt.

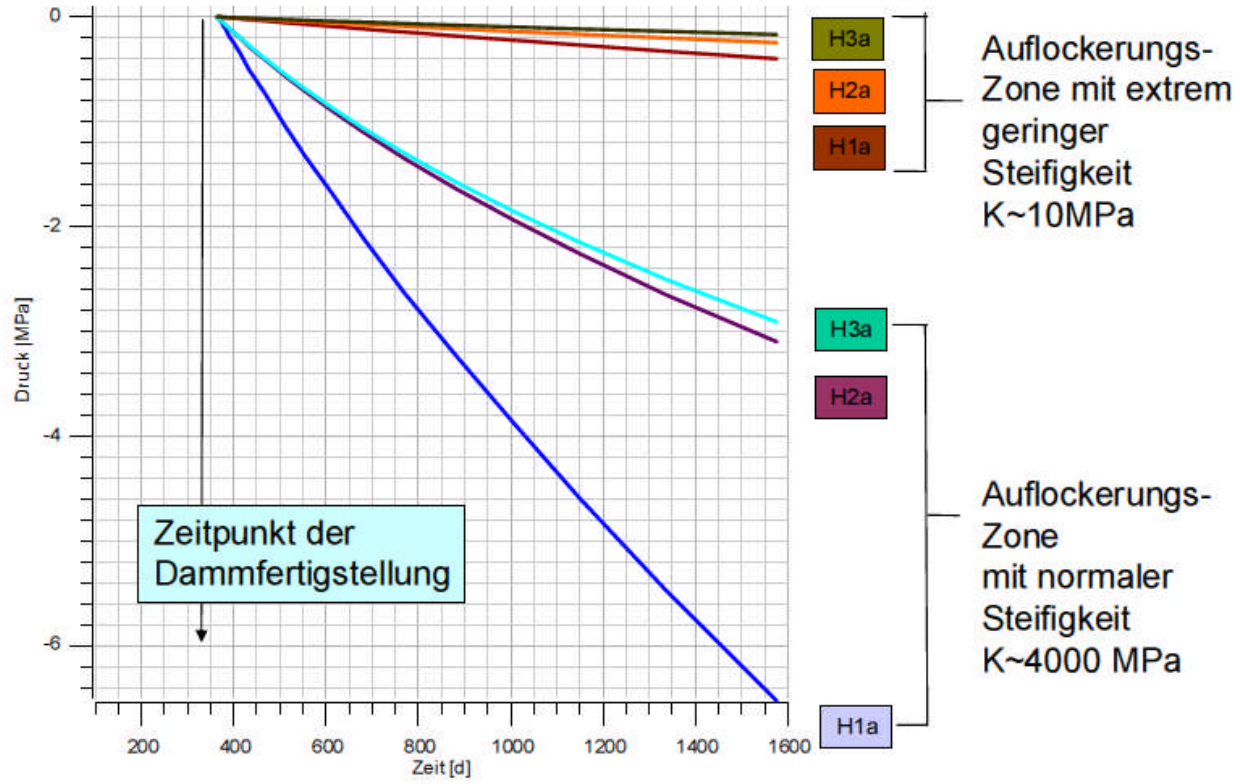

Abbildung 53: Modellierung GV2 mit abgeminderter Steifigkeit in der ALZ: Radialspannungen im Randbereich des Dammkörpers.

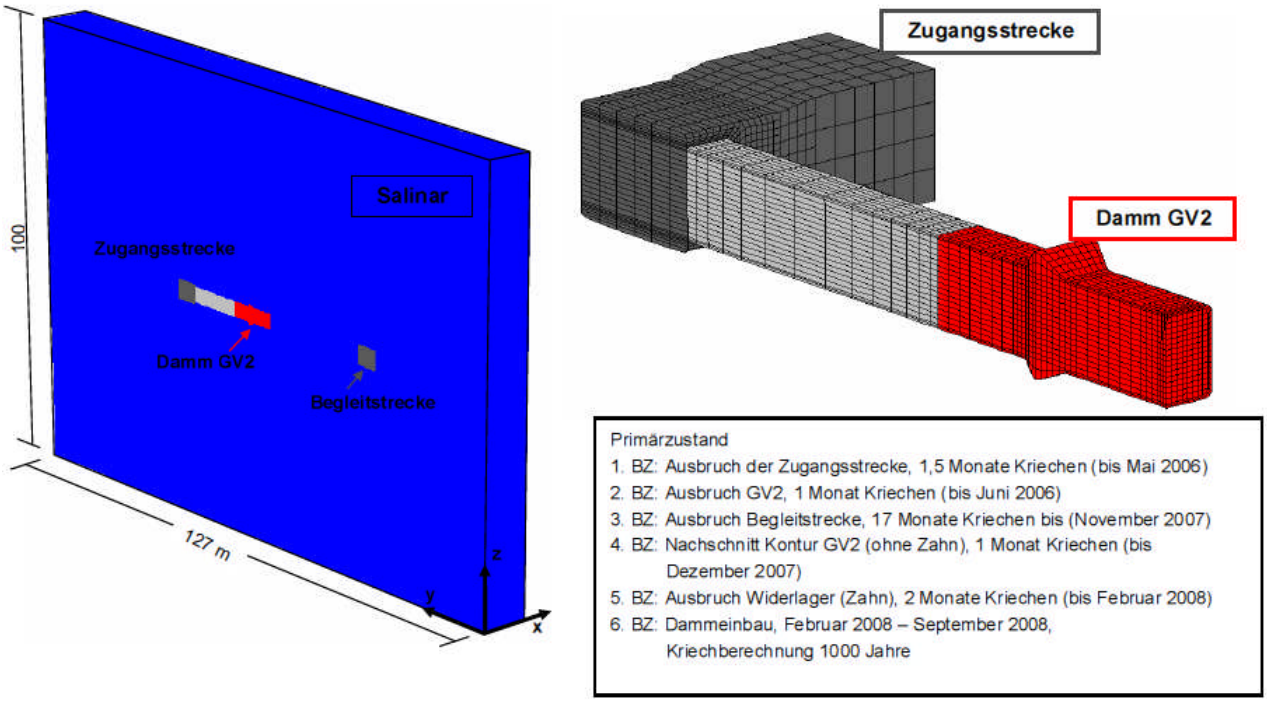

Abbildung 54: GV2, 3D-Modell und Berechnungsablauf (s. Teilbericht AP6, Anlage 8-3)

Auch in diesem Modell zeigte sich, dass zur realistischen Nachbildung der Wirklichkeit eine VWZ in der Weise in das Modell aufgenommen werden muss, dass im Bereich der KF die Steifigkeiten deutlich herabgesetzt werden muss.

Um den Einfluss unterschiedlicher Kompressibilitäten der messtechnisch nachgewiesenen Verwitterungszone VWZ an der Streckenkontur auf die Entwicklung der Normalspannungen am Kontakt zwischen GV2 und dem Gebirge abschätzen zu können, wurde die Parameterstudie mit dem am Konvergenzverhalten und der Spannungsverteilung geeichten Modell durchgeführt. Dabei wurde die Kompressibilität einer 5,5 cm mächtigen VWZ von 6.700 MPa (unverwitterter Carnallitit) auf 100 MPa bzw. 10 MPa (ALZ/VWZ-Einfluss) reduziert. Infolge dieser Reduzierung sinken die für einen Zeitpunkt von 12 Monaten nach Abschluss der Dammkörpererrichtung an der druckseitigen Flanke des Zahns prognostizierten Normalspannungen von 0,7 MPa auf 0,6 MPa bzw. 0,2 MPa.

Bei dieser Vorgehensweise wird auch die mechanische (und hydraulische) Deformationswirkung eines lokal möglicherweise vorhandenen offenen Spaltes zwischen Dammkörper und Gebirge durch die VWZ mit abgebildet.

Abbildung 55 zeigt die Auswirkungen einer Abminderung der VWZ-Steigigkeit von 6700 MPa über 100 MPa auf 10 MPa auf die Normalspannungen.

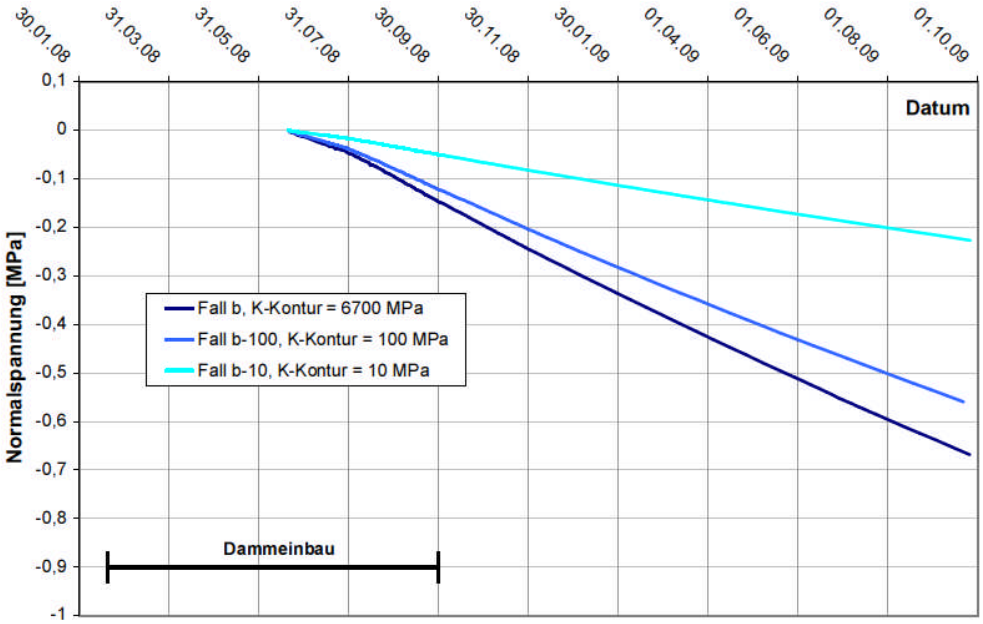

Abbildung 55: Fälle b (ohne Verringerung des Kompressionsmoduls der VWZ), b-K10 und b-K100 (Abminderungen des Kompressionsmoduls auf 10 bzw. 100 MPa), Messquerschnitt ME1 (s. TB 6, Anlage 8-20)

Vergleichende Modellstudie GV1 – GV2:

Zum Zeitpunkt des Baubeginns der GV1 und GV2 lagen noch keine Modellstudien vor, die Auskunft über die optimalen Geometrie der Funktionselemente geben konnten. So wurde für GV1 unter Bezugnahme auf Erfahrungen im Bergbau eine Kegelstumpfform mit geringer Neigung und für den GV2 ein rechteckiger Querschnitt mit einer Verzahnung gewählt (TB 7). Parallel zum Aufbau der Versuche erfolgte die vergleichende Modellstudie. Allerdings wurden nicht unmittelbar Vergleiche zwischen rotationssymmetrischer und prismatischer Form, sondern solche über die Wirksamkeit eines Kegelstumpfes und die Wirksamkeit einer

Verzahnung - in beiden Fällen an rotationssymmetrischen Modellen – auf die Lagestabilität eines Dammelementes durchgeführt.

Mit den vergleichenden Berechnungen für GV1 und GV2 wurden grundsätzliche Prognosewerte für eine Fluiddruckbelastung der Dammkörper bis zum geplanten Lösungsdruck p = 8 MPa geliefert. Dabei wurde bei sonst gleichen Modellparametern im Unterschied zu den vorangegangenen Modellstudien sowohl eine Scheiben-Weise Auffahrung der Strecken als auch ein Scheiben-Weiser Einbau des Dammkörpers simuliert. Gleichzeitig wurden zylindrische Dammkörper mit äquivalenten Durchmessern untersucht. Mit den vorliegenden Berechnungsergebnissen konnten folgende teilweise bereits mit den Modellen für GV1 abgeleiteten Aussagen bestätigt bzw. präzisiert werden:

- Entsprechend der angenommenen (konservativ festgelegten) Parameter, erfüllen beide Versuchsbauwerke GV1 und GV2 die mechanischen Sicherheitsanforderungen. Dabei ist unter der Annahme, dass die Permeabilität im kontaktnahen Gebirge von der Volumendilatanz stetig abhängt, GV2 deutlich günstiger einzustufen.
- Infolge der präzisierten Kriechparameter baut sich innerhalb von 6 Monaten in der Kontaktfuge des Damms nur noch ein Normalspannungsniveau von ca. = 0,7 MPa (GV1a 1,5 MPa) infolge der Gebirgskonvergenz auf. Die Berechnungen mit einer Belastungsrate von 1,8 MPa/6 Monate bzw. 0,01 MPa/Tag zeigen, dass bis zum Erreichen eines Fluiddruckes von 1,8 MPa keine Erhöhung der Ausgangspermeabilität zu erwarten ist, da die Kontaktfuge überdrückt bleibt und dort auch keine Scherfestigkeitsüberschreitungen belegt wurden.
- Wird der Fluiddruck in der Druckkammer deutlich über die durch Gebirgskonvergenz resultierenden Normalspannungen in der Kontaktfuge bis 8 MPa gesteigert, ergibt sich rechnerisch keine wesentliche durch die Fluiddruckbelastung bedingte weitere Schädigung des Konturbereiches. Allerdings ist bekannt (und durch Laborversuche nachgewiesen), dass sich bei Annäherung des Fluiddruckes an die Normalspannungen eine signifikante Erhöhung der Permeabilität in der Auflockerungszone ergibt [25], die hier nicht berücksichtigt wurde.
- Die Berechnungen zu den zylinderförmigen Dammkörpern zeigen, dass bei den angenommen und den laborativ ermittelten Kontaktfestigkeiten auch diese Dammkörpergeometrien (ohne Kegelstumpf beim GV1 und ohne Verzahnung beim GV2) eine ausreichende Stabilität aufweisen. Unter diesen Bedingungen, die praktisch einem festen Verbund entsprechen, hat die Wahl der ohnehin im Modell nur idealisiert abzubildenden Dammkörpergeometrie für den Lastabtrag eine untergeordnete Bedeutung (Abbildung 56). Das bedeutet, dass für konkrete Standorte gute Chancen bestehen, auch für rein zylindrische bzw. prismatische Dammkörper (ohne Kegelstumpfgeometrie bzw. ohne Verzahnung) die Lagestabilität nachzuweisen.

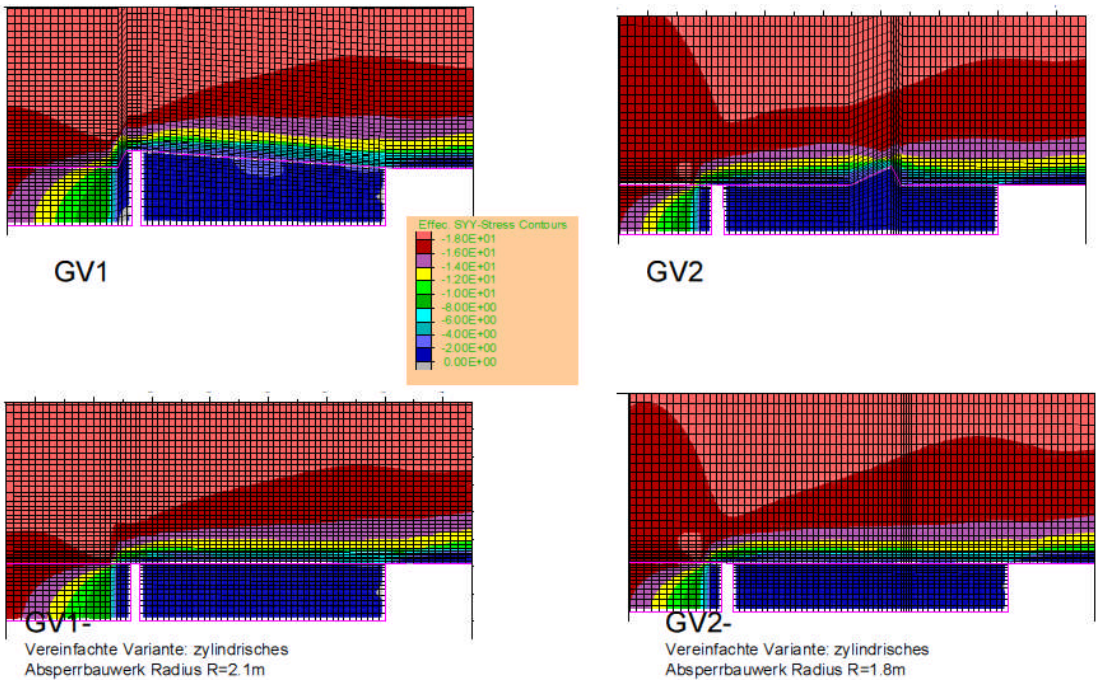

Abbildung 56: effektive Spannungen in Achsrichtung am Ende des 5. BZ, Druckbeaufschlagung 8 MPa (TB 6, Anlage 5-11)

GV3:

Da der GV3 der Verifizierung der technologischen Möglichkeit der Monolithisierung einer aus einzelnen Bausteinen zusammengesetzten Asphaltscheibe diente (TB 7), bei der ein Widerlager benötigt wird, das zunächst den für die Monolithisierung erforderlichen Druck < 1 MPa aufnehmen und der danach bei Lösungsdruckaufgabe (bis 8 MPa) für die Lagestabilität der monolithisierten Asphaltscheibe sorgen muss, stand geomechanisch die Lagestabilität des MgO-Widerlagers im Vordergrund der Modellierung. Die Modellierung wurde in Übereinstimmung mit der tatsächlichen Geometrie dieses Großversuchs als rotationssymmetrische Aufgabe durchgeführt.

Mit dem Modell wurde eine weitgehende Übereinstimmung mit den bautechnisch realisierten Rahmenbedingungen (z. B. Bauwerksdimensionen) mit der Zielstellung des Nachweises der mechanischen Stabilität des Widerlagers dieses Großversuchs erreicht, wobei in diesem Fall keine gekoppelten Rechnungen durchgeführt wurden. Dazu sind zwei Teil-Modelle untersucht worden, die die Bandbreite der Kontaktflächeneigenschaften abdecken. Die Eigenschaften des MgO-Betons und die Kontakteigenschaften MgO-Beton/Carnallitit wurden im Modell 1 nicht verändert (vgl. Abbildung 57). So wurden im Modell 1 die Parameter für die im Labor ermittelten Spitzenfestigkeiten, d. h. eine Kohäsion c = 1,5 MPa, eine Kontaktzugfestigkeit von σ_z = 0,5 MPa und ein Reibungswinkel von Φ = 50° angesetzt. Im Modell 2 wurden dagegen die Parameter für die entsprechenden Restfestigkeiten, d. h. eine Kohäsion c = 0,5 MPa, eine Kontaktzugfestigkeit von σ_z = 0,0 MPa und ein Reibungswinkel von Φ= 30°, gewählt. Dabei konnten mit den vorliegenden Berechnungsergebnissen folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Für die Monolithisierungsphase der Asphaltscheibe, die bis zu einer Belastung des Widerlagers von 1 MPa simuliert wurde, ergibt sich für keines der beiden Modelle ein Versagen der Kontaktflächen zwischen dem Widerlager und dem Gebirge. Erst bei einer Belastung der Druckkammer bis 5 MPa errechnet sich für Modell 2 mit geringer Kontaktflächenfestigkeit ein Versagen der ersten beiden druckseitigen Drittel der Kontaktfläche. Das Gesamtsystem bleibt aber noch stabil, wobei sich die luftseitige Stirnfläche des Widerlagers ca. 0,8 mm verschiebt.

- Aus dem Vergleich zwischen berechneten und beim GV3 gemessenen Werten kann gefolgert werden, dass die gewählten gesteinsmechanischen Parameter für Modell 1 in guter Näherung das mechanische Verhalten insbesondere der Kontaktflächen zwischen einem MgO-Beton-Damm und dem angrenzenden Carnallititgebirge widerspiegeln, d. h. die Standsicherheit des in GV3 integrierten Widerlagers konnte gezeigt werden.

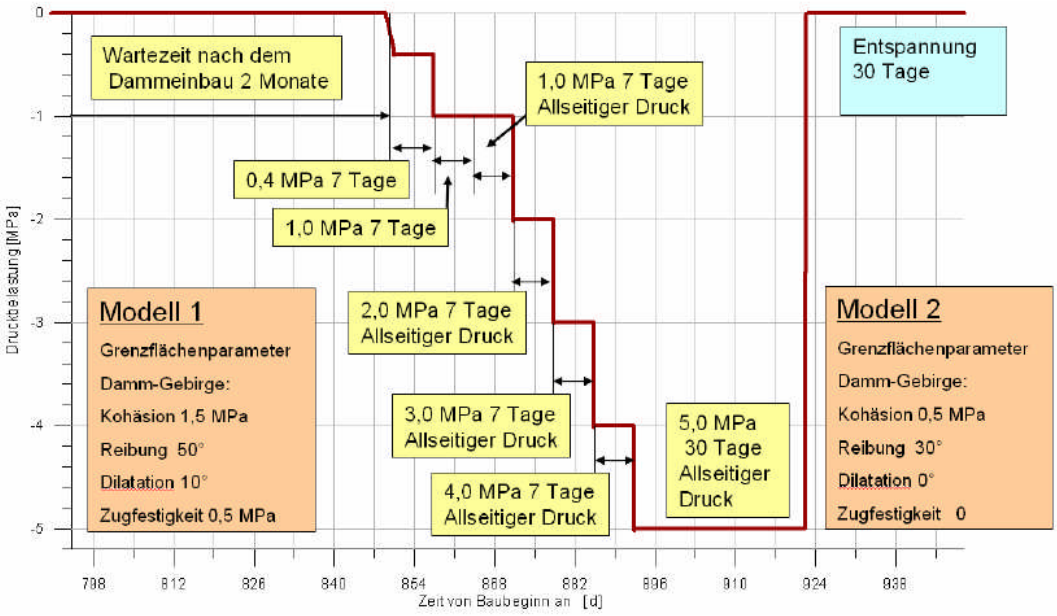

Abbildung 57: Zeitliche Modellierung der Druckbelastung im GV3-Modell (TB 6, Anlage 6-8)

8.4. Modellstudien an komplexen Modellen eines Verschlussbauwerkes

Die numerischen Untersuchungen wurden mit einem rotationssymmetrischen Modell mit dem Programmsystem FLAC am Beispiel einer Stecke mit einem Durchmesser von 4 m durchgeführt. Das Modell besitzt eine Länge von 160 m und einen Radius von 100 m. Für das Gebirge wurden die gesteinsmechanischen Parameter (Stoffmodell Minkley) verwendet, die an den In-situ-Messungen am GV2 für das 3D-Modell geeicht sind. Weiterhin wurde der gleiche isotrope Grundspannungswert von 18 MPa angenommen.

Das untersuchte Bauwerk besteht in seinem mittleren Teil mit einer Länge von 30 m aus chemisch langzeitbeständigem Sorelbeton (3-1-8-Phase), der für die langzeitsichere Verwahrung des Schachtes Saale entwickelt wurde und für den ein vollständiger Parametersatz (Modell Minkley) bekannt ist. Dieser Teil ist beidseitig von 5 m langen Sorelbetonabschnitten eingeschlossen, die dem Spritzbeton (5-1-8-Phase) entsprechen, aus dem GV2 errichtet wurde und für den die gesteinsmechanischen Parameter (Modell Mohr-Coulomb) ebenfalls bereits früher ermittelt wurden. Die äußersten Teile des Bauwerkes bestehen aus jeweils zwei ca. 12 m langen Schotterabschnitten, für die die gesteinsmechanischen Parameter aus dem Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth ebenfalls bekannt sind [1]. Die Geometrie und die Materialverteilung des modellierten Bauwerkes sind in Abbildung 58 dargestellt (TB 6, Abschnitt 9).

Zielstellung der Untersuchungen an einem rotationssymmetrischen gebirgsmechanischen Strukturmodell für ein komplexes Verschlussbauwerk besteht im Erfassen der gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen mechanisch unterschiedlich reagierenden Teilen eines möglichen komplexen Verschlussbauwerkes. Mit diesem Modell sollte insbesondere

untersucht werden, ob langfristig infolge des auflaufenden Gebirges auch eine thermodynamisch nicht von vornherein langzeitstabile Bauwerkskomponente (z.B. Element aus MgO-Beton 5-1-8) zwischen einem Widerlager (z.B. Schotterelement) und einem kriechfreudigen thermodynamisch langzeitstabilen Teil (z.B. MgO-Beton 3-1-8) so fest eingespannt wird, dass auch bei einer vollständigen Phasen-Umwandlung des 5-1-8 MgO-Betons in die thermodynamisch stabile 3-1-8-Phase und bei einer möglicherweise damit verbundenen Entfestigung (Erhöhung der Relaxation) seine Einspannung im für die Langzeitsicherheit erforderlichen Umfang erhalten bleibt.

Zunächst wurde für den auch bisher verwendeten und verifizierten Parametersatz die Entwicklung der radialen Einspannung in den einzelnen Teilen des Bauwerkes, das nach einer 40-jährigen Standzeit der Strecke und dem Nachriss eines 50 cm breiten Konturbereichs erfolgte, ohne Lösungszutritt untersucht. Damit sollte der Zeitpunkt abgeleitet werden, zu dem die Normalspannungen am Kontakt zum Gebirge einen Wert von 8 MPa übersteigen, so dass das Minimalspannungskriterium auch bei diesem Lösungsdruck nicht verletzt wird. Die steifsten Teile des Bauwerkes sind – entsprechend der vorher bestimmten mechanischen Materialeigenschaften (s. TB 5) - die aus Spritzbeton MgO 5-1-8, für die sich im Vergleich zum mittleren Teil und zu den Widerlagern aus Schotter die höchste Einspannung errechnet.

Die Abbildungen 58 und 59 bilden den Radialspannungsaufbau als Flächenplots im gesamten Modell nach 1.000 jähriger Standzeit des Bauwerkes ab. Die Entwicklung der Radialspannungen in verschiedenen markanten Teil des Bauwerkes (Abbildung 60) zeigt, dass nach ca. 50 Jahren die Radialspannungen in allen Sorelbeton-Teilen des Bauwerkes einen Wert von 8 MPa erreichen oder übersteigen, was in guter Übereinstimmungen mit den am 3D-Modell für GV2 errechneten Ergebnissen steht. Abbildung 61 gibt eine Übersicht bezüglich der Entwicklung der Normalspannungen am Kontakt zwischen dem Bauwerk und dem Gebirge zu charakteristischen Zeitpunkten und belegt dabei anschaulich die differenzierte aber in allen Teilen wachsende Einspannung des gesamten Bauwerkes.

Für den Zeitpunkt 1000 Jahre nach Errichtung des Bauwerkes wurde in einem weiteren Rechengang untersucht, welche Auswirkungen die Umwandlung der 5-1-8-Phase des Spritzbetons durch die Wirkung einer angreifenden Lösung in die 3-1-8-Phase besitzt (Abbildung 62). Dazu wurden die mechanischen Eigenschaften des rechten (bzw. des unteren) Vorbauelementes aus Spritzbeton in sehr konservativer Weise instantan und vollständig geändert, in dem die gesteinsmechanischen Parameter des mittleren Teils, übernommen wurden. Durch die hohe allseitige Einspannung dieses Vorbauelementes, die auf der Schotterseite einen Wert von ca. 4 MPa erreicht hatte, erfolgt durch die Simulation der Umwandlung lediglich eine relativ geringe Spannungsänderung, die in einem geringfügigen Abbau der Radialspannungen im Beton (induziert durch das stärkere Kriechens der 3-1-8-Phase) und einem zusätzlichen Aufbau der Axial- und Radialspannungen im Schotter besteht. Dabei wird das Minimalspannungskriterium für 8 MPa am Kontakt zu allen Sorelbetonteilen des Bauwerkes weiterhin erfüllt. Mit fortschreitender Zeit verbessern sich die Einspannungsbedingungen des Bauwerkes durch das aufkriechende Gebirge weiter. Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass bei dieser Modellrechnung konservativer Weise nicht der Kristallisationsdruck berücksichtigt wurde, der bei der Umwandlung der 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase zusätzlich entsteht.

Mit dem Modell für ein mögliches komplexes Verschlussbauwerk konnte grundsätzlich gezeigt werden, dass mit den im Laufe der Bearbeitung des Forschungsvorhabens validierten Teilmodellen für die verschiedenen errichteten einzelne Funktionselemente auch ein komplexes Verschlussbauwerk modelliert und sein Verhalten prognostiziert werden kann.

Im dem hier untersuchten Modell eines möglichen komplexen Verschlussbauwerkes konnte insbesondere gezeigt werden, dass langfristig infolge des auflaufenden Gebirges auch eine thermodynamisch zunächst nicht langzeitstabile Bauwerkskomponente aus Spritzbeton

(z.B. MgO-5-1-8) zwischen einem Widerlager (z.B. Schotterelement) und einem kriechfreudigen chemisch langzeitstabilen Teil (z.B. MgO-Beton der 3-1-8-Phase) so fest eingespannt wird, dass auch bei einer vollständigen Umwandlung des thermodynamisch nicht stabilen MgO-Betons 5-1-8 bei Lösungsangriff in die stabile 3-1-8-Phase und damit einer möglicherweise verbundenen Entfestigung (Relaxation) seine Einspannung im für die Gewährleistung der Standsicherheit ausreichenden Umfang erhalten bleibt.

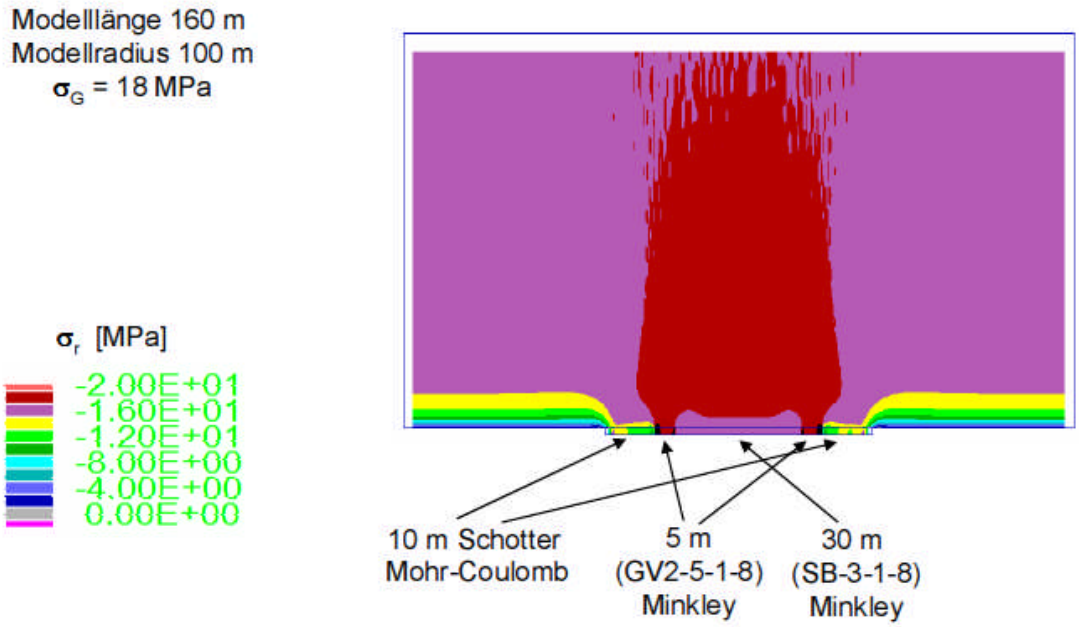

Abbildung 58: Modellaufbau 1.000a (Teilbericht AP6, Anlage 9-1)

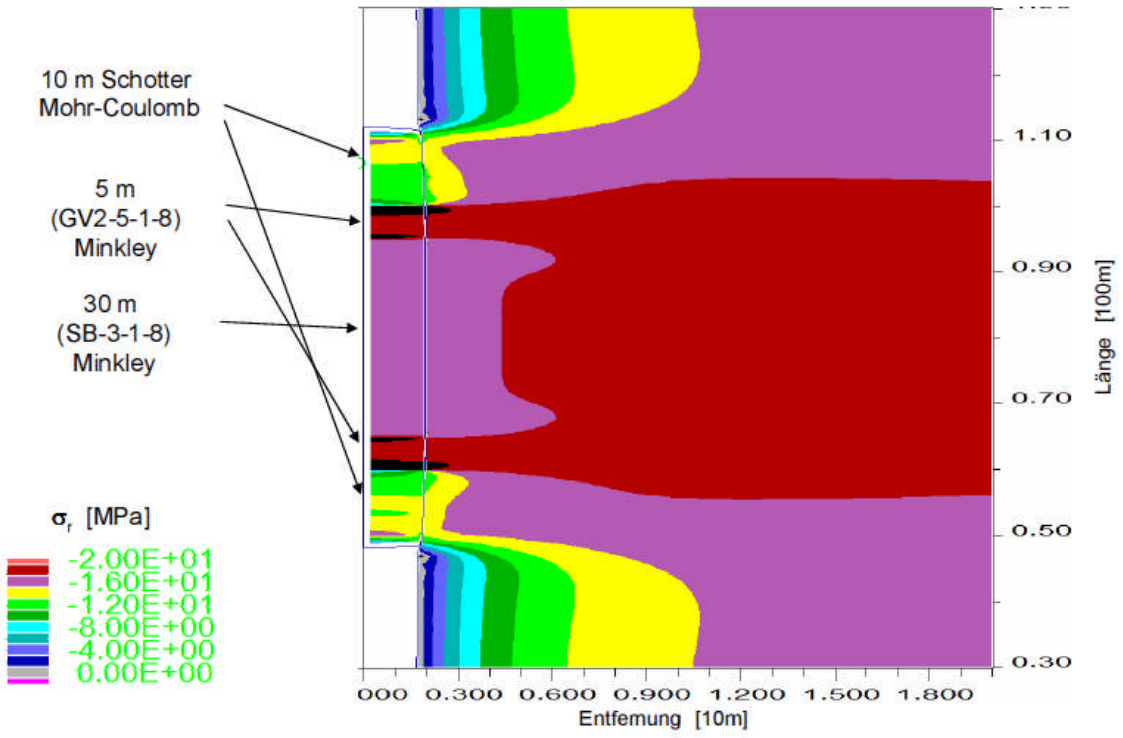

Abbildung 59: Radialspannungen 1.000a (TB 6, Anlage 9-2)

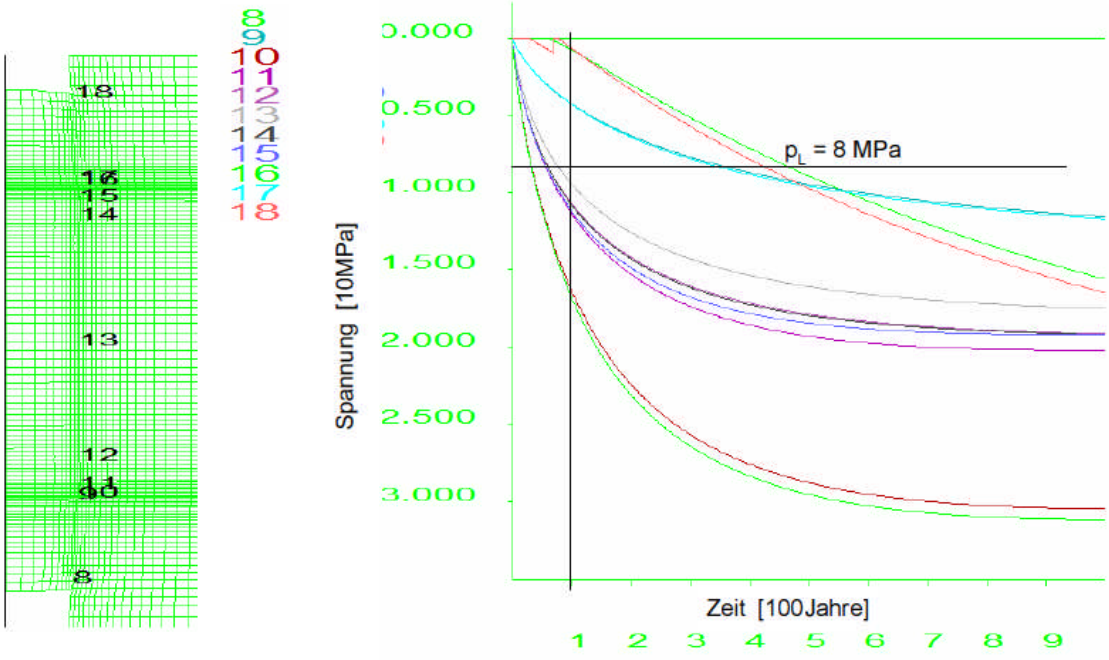

Abbildung 60: Radialspannungsentwicklung an der Kontaktfläche (TB 6, Anlage 9-3)

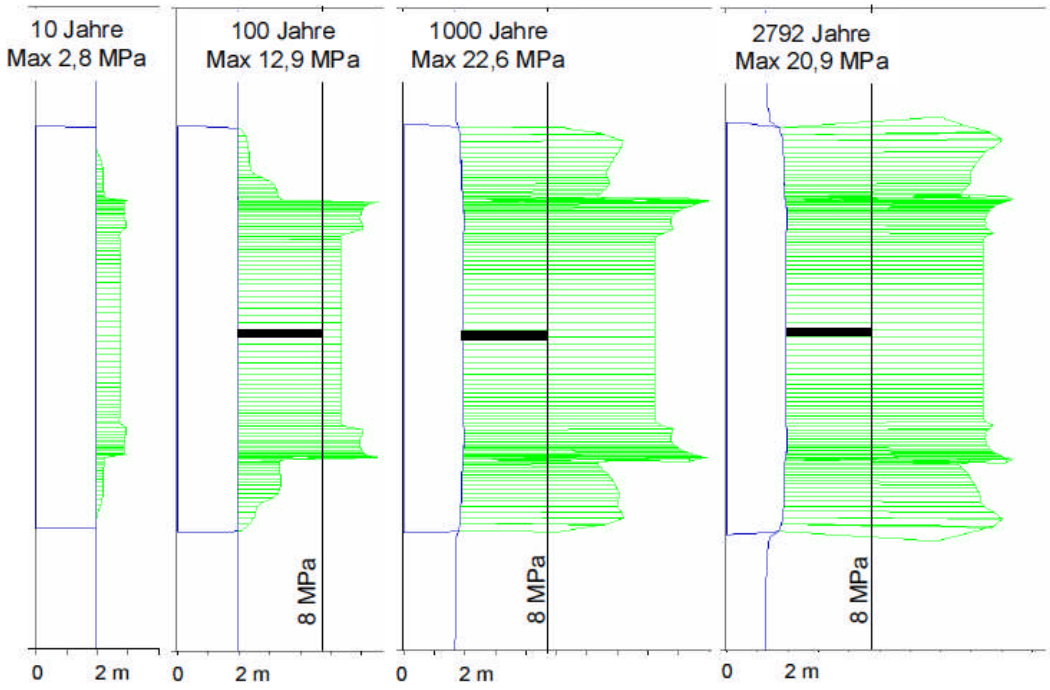

Abbildung 61: Normalspannungen auf der Kontaktfläche (Teilbericht AP6, Anlage 9-4)

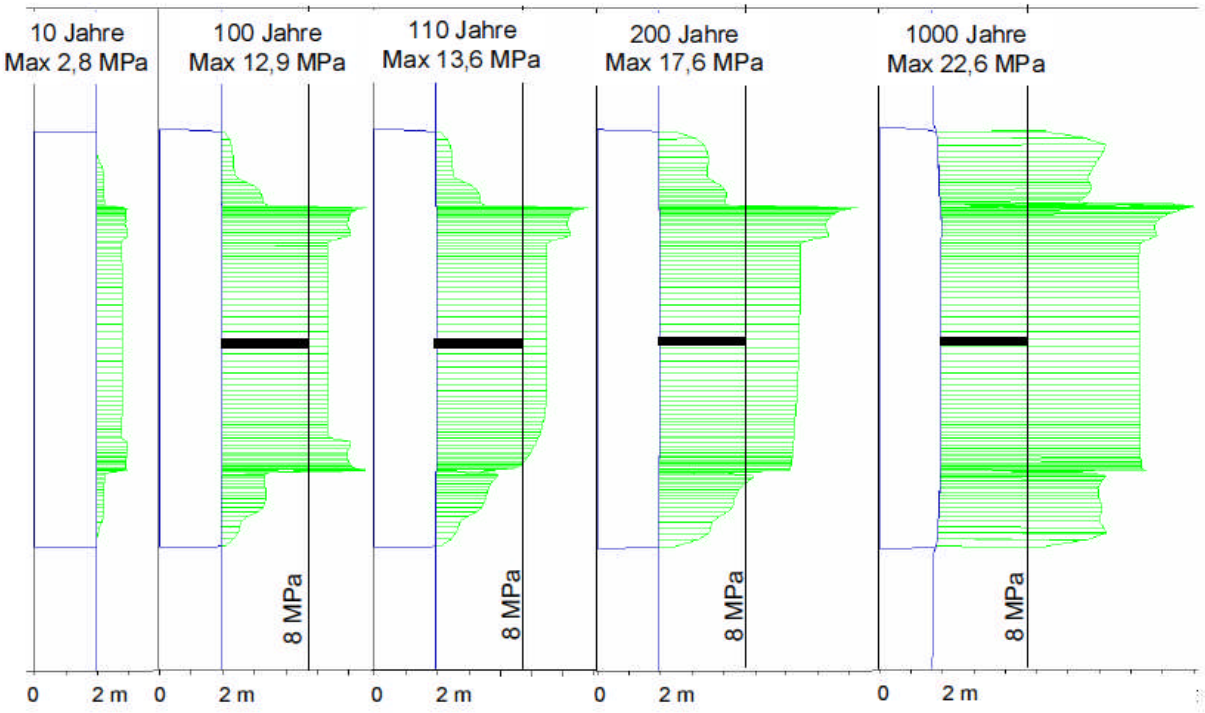

Abbildung 62: Normalspannungen auf der Kontaktfläche 1.000a (TB 6, Anlage 9-5)

9 Schlussfolgerungen für das Grundkonzept eines horizontalen Abdichtbauwerkes im Carnallitit

9.1 Ausgangspunkte

Die Zielstellung des Vorhabens besteht in der Entwicklung bzw. der Erfassung der geowissenschaftlichen und geoingenieurwissenschaftlichen Grundlagen für die Errichtung von langzeitsicheren Abdichtbauwerken in mehr oder weniger horizontalen Grubenbauen (Strecken) im carnallitischen Salzgebirge. Da der Begriff „carnallitisches Salzgebirge“ ein breites Spektrum von Eigenschaften abdeckt, wird im Vorhaben von der folgenden Definition ausgegangen:

Unter ***carnallitischem Salzgebirge*** wird im vorliegenden Bericht ein polykristallin aufgebautes Salzgebirge verstanden, dessen stofflicher Aufbau vom Mineral Carnallit (Ca: $KCl * MgCl_2 * 6H_2O$) dominiert wird. Dabei bestimmt der quantitative Anteil des Minerals Carnallit im polykristallinen Festkörper vor allem dessen Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Neben dem Mineral Carnallit sind im Allgemeinen die Minerale Steinsalz, Anhydrit und Tone vertreten, wobei die Anteile von Anhydrit und Ton gegenüber Carnallit und Steinsalz in der Regel untergeordnet sind. Im Kalirevier an Werra und Fulda haben sich für den dort anstehenden quasihomogenen Trümmercarnallitit z.B. die Bezeichnungen C60 (für ca. 60% Ca im Carnallitit) und entsprechend C80 und C100 durchgesetzt.

Das carnallitische Salzgebirge ist (im Vergleich mit einem Steinsalzgebirge) durch die allgemeinen Merkmale geringe Festigkeit, sprödes Deformationsverhalten und hohe Löslichkeit gekennzeichnet (s. TB 2).

Wenn neben den oben genannten weitere Mineralen in spürbaren Quantitäten (z.B. um 10%) auftreten, die sowohl das geomechanische Verhalten als auch das Lösungsverhalten wesentlich mitbestimmen und besonders, wenn diese Minerale in quasi-anisotropen und schichtähnlichen Anhäufungen auftreten, kommen zu den allgemeinen Merkmalen weitere, z.T. im Hinblick auf die Errichtung von Abdichtbauwerken schwer beherrschbare Eigenschaften (die besonderen Merkmale) hinzu. Das trifft in besonderer Weise auf den im Grubengebäude Teutschenthal anstehenden Carnallitit CaT zu, der durch die zusätzliche Anwesenheit von Tachyhydrit und Kieserit in z.T. typischer räumlicher Verteilung gekennzeichnet ist. Dieser Sachverhalt hat vor allem Auswirkungen auf das Lösungs- und Verwitterungsverhalten, bestimmt die Bildung von Auflockerungs- und Verwitterungszonen an freien Gebirgsoberflächen und die Resistenz des anstehenden Gebirges gegenüber angreifenden salinaren Lösungen entscheidend (s. TB 2).

Im Vorhaben wurden die standortbezogenen Untersuchungen u.a. auch aus den genannten Gründen am Carnallitit Teutschenthal (CaT) durchgeführt, um für die kompliziertesten bekannten Gebirgsverhältnisse in carnallitischen Lagerstätten Grundsatzlösungen anzustreben, die dann für weniger komplexe Gebirgsverhältnisse entsprechend „abgerüstet“ werden können, ohne ihre Anwendbarkeit zu verlieren.

Im Hinblick auf die Gegebenheiten in der Grube Teutschenthal, aber auch mit Blick auf die im Kali- und Salzgebirge allgemein technisch beherrschbaren Situationen, wird exemplarisch von den folgenden Rand- und Nebenbedingungen für die Analysen und Untersuchungen ausgegangen:

Teufenlage der Einbaustellen für Abdichtbauwerke: $H \approx 700$ m

Grundspannungszustand im Gebirge: $\sigma_x \approx \sigma_y \approx \sigma_z \approx 18$ MPa

Permeabilität des unverritzten einschlusswirksamen Gebirgsbereiches: $k_0 < 10^{-22}$ m²

Maximaler Lösungsdruck der ggf. einseitig auf das Bauwerk wirkt: $p_{max} = 8$ MPa

Angreifende Lösung:

entsprechend dem anstehenden Wirtsgestein: IP 19 bzw. IP21 bzw. nach „Konditionierung“: gesättigte $MgCl_2$-$CaCl_2$ Lösung. Mit der im Ergebnisbericht zum Teil 1 des Vorhabens ebenfalls genannten NaCl-Lösung ist in einem carnallitischen Wirtsgestein praktisch nicht zu rechnen, so dass sie außerhalb der Betrachtung bleiben kann.

Im allgemeinen soll ein Abdichtbauwerk möglichst zeitnah (wenige Jahre) nach seiner Errichtung einen zuverlässigen Abdichteffekt besitzen, d.h. eine integrale und über das eigentliche Bauwerk sowie die Kontakt- und Auflockerungszone gemittelte Permeabilität von $k_{int} \leq 10^{-18}$ m² aufweisen und diese Eigenschaft dauerhaft, d.h. etwa für eine Zeit ≥ 30.000 a (abhängig von den konkreten, standortbezogenen Zielstellungen) aufrechterhalten. Nach den vorliegenden Ergebnissen zu den Eigenschaften von komplexer ALZ und den verfügbaren Baustoffen ist diese Forderung nur durch die Kombination quasi sofort wirksamer Bauwerksabschnitte (EZ) mit ggf. nicht vollständig nachweisbarer Langzeitstabilität und verzögert wirksam werdender Bauabschnitte mit nachgewiesener Langzeitstabilität (ED) im Gesamtbauwerk zu realisieren. Dabei wurde im Vorhaben für die Mindestwirksamkeitsdauer der Abschnitte EZ nach TB 6 (Annäherung an die Verhältnisse in Teutschenthal) eine Zeit von zeitnah nach Errichtung bis etwa ≤ 200a und entsprechend ein Wirkungsbeginn der Abschnitte ED für Zeiten etwa ≥ 200a bis ≥ 30.000a zu Grunde gelegt.

Entsprechend den allgemeinen Grundsätzen, die sich für langzeitsichere Abdichtbauwerke mit hohem Sicherheitsbedarf durchgesetzt haben, wird davon ausgegangen, dass die wesentlichsten Eigenschaften des Abdichtbauwerkes (Erfüllung der Dichtheitsanforderung, Standsicherheit/Rissbegrenzung und Lagestabilität) möglichst redundant abgesichert und in diversitärer Ausführung im Abdichtbauwerk realisiert werden sollten. Das gilt sowohl für die Abschnitte EZ als auch für die Abschnitte ED.

Gegenstand des FuE-Vorhabens mit Grundlagencharakter ist es nicht, eine Entwurfsplanung z.B. im Sinne der Definition nach HOAI für einen bestimmten Standort vorzulegen. Dennoch wird angestrebt, für die Verhältnisse der Grube Teutschenthal die Eckdaten eines exemplarischen und mit größter Wahrscheinlichkeit grundsätzlich realisierbaren Entwurfes vorzulegen (Abschnitt 10), ohne auf die einer späteren konkreten und ortsbezogenen Ausführungsplanung vorbehaltenen Einzelheiten der technologischen Umsetzung einzugehen.

Die Sicherheit bzw. Langzeitsicherheit der Elemente EZ bzw. ED werden somit grundsätzlich und exemplarisch an Hand von getrennten Berechnungsstudien erbracht und ersetzen im Realisierungsfall nicht eingehende Detailuntersuchungen und Berechnungen (TB 6). Dabei konzentrieren sich die Untersuchungen und Nachweisstudien entsprechend der Aufgabenstellung auf das Element ED. Für das Element EZ werden Hinweise für die Gestaltung abgeleitet; die konkrete Auslegung erfolgt entsprechend dem zum Zeitpunkt der Errichtung gegebenen Stand von Wissenschaft und Technik.

9.2 Charakterisierung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Die entscheidenden Randbedingungen für die Abdichtbauwerke werden durch das einschlusswirksame Gebirge EWG festgesetzt. Das EWG setzt sich - in Anlehnung an [33] - aus der geologischen Barriere und der unmittelbaren Gebirgsumgebung der Abdichtbauwerke zusammen. Bei der vorliegenden Betrachtung steht die unmittelbare Gebirgsumgebung der Abdichtbauwerke im Vordergrund. Die Randbedingungen für diesen Bereich wurden eingehend und an verschiedenen, repräsentativen Standorten der Grube Teutschenthal untersucht (VO1 bis VO3) und werden nachfolgend zusammenfassend und in ihrer unmittelbarer Relevanz für das Grundkonzept eines entsprechenden Abdichtbauwerkes (Abschnitt 10) noch einmal zusammenfassend genannt werden.

Mineralogischer Aufbau und Struktur:

Zunächst war der geologisch-mineralogische Aufbau des carnallitischen Salzgebirges im Standortbereich aufzuklären und zu charakterisieren (TB 3). Wenn – wie im Falle des CaT – die Minerale Tachyhydrit und Kieserit in relevanten Konzentrationen anstehen, ist ihre Verteilung im Gebirgsverband von entscheidender Bedeutung. Im Ergebnis feinstratigrafischer Untersuchungen in situ wurde für CaT eine quasischichtartige Verteilung der Minerale Tachyhydrit und Kieserit festgestellt mit Mineralanteilen von 0 bis lokal 40% und vorwiegend nestartiger Verteilung, wobei die einzelnen Nester i.d.R. voneinander isoliert auftreten und Ausdehnungen von einigen Millimetern bis Zentimetern haben. Am VO1 wurde festgestellt, dass sich in einigen Bereichen diese Tachyhydrit und Kieserit-Nester vereinigen können, was zu räumlich länger aushaltenden „Quasischichten" dieser Minerale führen kann; am VO2 und vor allem am VO3 waren weniger zusammenhängende Tachyhydrit/Kieserit „Schichten", sondern überwiegend einzelne nestartige Verteilungen der Minerale Tachyhydrit und Kieserit festzustellen (TB 2).

Geomechanische Parameter und integrale Gebirgspermeabilität:

Die geomechanischen Parameter weisen relativ große Streubreiten auf. Sie konnten im Mittel aber an Bohrkernen und an aus Großblöcken gewonnenen Einzelproben zuverlässig bestimmt werden. Sie wurden durch Vergleich von in situ Messungen und Rückrechnungen verifiziert. Einzeldaten sind in TB 2 enthalten und wurden in den numerischen Modellstudien verwendet (TB 6).

Die integral wirksame Gesamtpermeabilität des unverritzten EWG bestimmt die Sinnhaftigkeit der Errichtung von Abdichtungsbauwerken überhaupt und begrenzt die zu erreichenden Mindestanforderungen an die Dichtheit des Bauwerkes. Die integral wirksame effektive Gebirgspermeabilität gegenüber dem Angriff von $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösungen und IP21 Lösungen wurde am VO3 mittels punktueller Gas- und Lösungs-Permeabilitätsmessungen mit unterschiedlichen Entfernungen der Messpunkte von der Grubenbaukontur sowie mittels mehrmonatiger integraler Permeabilitätsmessungen an langen Bohrlöchern am Versuchsstandort zu $k_0 < 10^{-22}$ m² bestimmt (TB 2). Damit weist diese Kenngröße das unverritzte CaT-Gebirge als dichte einschlusswirksame Salzgesteinsformation aus, in der Abdichtbauwerke als geotechnische Barrieren in isolierten Einzelgrubenbauen grundsätzlich errichtet werden können. Unter integral wirksamer Gebirgspermeabilität ist die Fluiddurchlässigkeit unter Einschluss verschiedener Effekte wie chemische Wechselwirkungen und Mehrphasenströmungen - auch bei der Existenz an diskreten Punkten gemessener Permeabilitäten $< 10^{-15}$ m² (TB 2) - zu verstehen.

Am VO1 wurden Untersuchungen zur Permeabilität des unverritzten CaT-Gebirgsverbandes nicht durchgeführt. Wegen der dort stärker schichtartigen Verteilung der Minerale Tachyhydrit und Kieserit könnten evtl. regional höhere Werte der Gebirgspermeabiltät im unverritzten Gebirge auftreten. Bei der Errichtung von Abdichtbauwerken ist in solchen Bereichen besonderer Wert auf Vorbauelemente VB (s. Abschnitt 10) zu legen, mit denen die angreifenden Lösungen so konditioniert werden, dass insbesondere der schädliche Lösungsangriff auf das Tachyhydrit-Mineral reduziert bzw. unterbunden wird (TB 8).

Ausbildung der ALZ:

Von entscheidender Bedeutung für die Wirksamkeit eines Abdichtbauwerkes ist die Ausbildung der ALZ im weiteren Sinne am Einbaustandort (im Weiteren: komplexe ALZ bzw. hydraulische wirksame ALZ genannt). Mittels umfangreicher in situ-Untersuchungen (Muliti-Methoden-Erkundungsstrategie MMES (vgl. [17] und TB 2) sowie mit geomechanischen und geohydraulischen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass im Konturbereich eines Grubenbaues durch Überlagerung der geomechanischen und der lösungschemischen Eigenschaften des anstehenden Salzgesteins eine komplexe hydraulische wirksame

Auflockerungszone entsteht. Diese komplexe ALZ setzt sich aus einer konturnahen Verwitterungszone (VWZ) und einer dilatanzbedingten Auflockerungszone im engeren Sinne (ALZ) zusammen (Abschnitt 3 und TB 2).

Die diltanzbedingte ALZ ist in ihrer hydraulischen Wirkung weitgehend reversibel und ist mit dem Ansteigen der geomechnischen Minimalspannung über den maximalen Wert des angreifenden Lösungsdruckes hinaus nicht mehr permeabiltätsbestimmend (das gilt offensichtlich sogar für Frac-Risse; TB 2, Abschnitt 7.1).

Die VWZ stellt dagegen für die Elemente ED die eigentliche, unmittelbar konturnah permeabilitätsbestimmende Zone im Kontaktbereich des Bauwerkes mit dem Gebirge (Kontaktfuge KF) dar. Sie bildet sich grundsätzlich ebenfalls mit der Wiedereinstellung des triaxialen Gebirgsspannungszustandes in der Bauwerksumgebung durch das Aufkriechen des

Gebirges zurück und ihre Permeabilität reduziert sich mit der Zeit. Die Abnahme der Permeabilität ist jedoch kaum zu quantifizieren und hängt stark von der tatsächlichen lokalen Verteilung der sehr leichtlöslichen Minerale (ta und ks) im Gebirge und von der Wechselwirkung der einzelnen Mineralnester (speziell: ta) mit der angreifenden Lösung ab.

Sollte sich an einem späteren Einbaustandort tatsächlich eine weit aushaltende quasi-schichtartige Verteilung der Minerale Tachhydrit und Kieserit in „Schichten“ mit endlichen Mächtigkeiten von einigen Zentimetern bzw. im Dezimeter- bis Meterbereich herausstellen (s. VO1), ist die Errichtung eines langzeitsicheren Abdichtbauwerkes an einem solchen Standort dennoch nicht grundsätzlich in Frage zu stellen. Unter „weit aushaltend“ sind hier Ausdehnungen zu verstehen, die die Dimension des Abdichtbauwerkes erreichen bzw. übersteigen. Ein wirksames Abdichtbauwerk kann dann jedoch nur mit „Konditionierung“ der angreifenden Lösungen (Umwandlung in eine $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung) durch dauerhaft wirksame Vorbauelemente (TB 8.1 und 8.2) sicher errichtet werden. Im Falle zwar schichtartig angeordneter, aber in diesen Quasischichten nestartig isoliert auftretender Tachyhydrit/Kieserit-Minerale mit im Einzelnen geringerer Ausdehnung (VO3) müssen diese ALZ-Bestandteile, d.h. die VWZ, unmittelbar vor dem Einbau der EZ- und ED-Dammkörper zuverlässig entfernt und die Neubildung einer VWZ durch geeignete Maßnahmen (z.B. Aufbringen wirksamer und möglichst dauerplastische Anstrichstoffe) unterbunden bzw. deutlich rediziert werden. Diese Anstrichstoffe müssen möglichst „sofort“ nach dem Freilegen der Kontur aufgebracht werden.

Zeitnah nach der Errichtung des Abdichtbauwerkes (d.h. im Funktionszeitraum des sofort wirksamen Bauwerkselementes EZ) kann die Neubildung der dilatanzbedingten ALZ vor allem durch die Einstellung eines möglichst hohen und bleibenden Quell- bzw. Kristallisationsdruckes des EZ-Baumaterials, ggf. in Verbindung mit einer Injektion der Kontaktfuge, erreicht werden. Die VWZ ist unmittelbar vor dem Einbau des Dammkörpers (EZ und ED) möglichst vollständig zu entfernen. Die Neubildung der VWZ muss nach dem Berauben durch sofortiges Aufbringen eines geeigneten Schutzanstriches zusätzlich behindert werden. Dieser Vorgang wird unterstützt, je inerter die angreifende Lösung gegenüber den sensiblen Mineralkomponenten im CaT ist. Hilfreich ist deshalb auch hier die Konditionierung der angreifenden Lösung mit dem Ziel der Umwandlung in eine möglichst tachyhydritgesättigte Lösung (vgl. Vorbauelemente VE, TB 8).

Nach dem Aufkriechen des Gebirges (d.h. im Funktionszeitraum des Elements ED) ist die permeabilitätserhöhende Wirkung der dilatanzbedingten ALZ abgeklungen; die ALZ stellt keine hydraulisch wirksame Schwachstelle im Abdichtbauwerk mehr dar. Die VWZ ist im günstigsten Falle ebenfalls durch vorheriges qualifiziertes Berauben und Versiegeln und durch das spannungsbedingte Schließen der verbliebenen lokalen „Lösungskavernen“ im Bereich der vorherigen „Tachyhydrit-Mineralnester“ unwirksam. Wegen der Unsicherheit und mangelhaften Nachweisbarkeit dieses Vorganges, ist die VWZ unmittelbar vor Dammeinbau deshalb auch hier möglichst vollständig zu entfernen, die frische Oberfläche zeitnah durch einen geeigneten Anstrichstoff zu versiegeln und zusätzlich das Einbringen von Injektionsmaterial in die KF vorzusehen. Zweckmäßigerweise ist auf Injektionsmaterial mit einer Restplastizität zu orientieren, damit die Möglichkeit besteht, dass das Injektionsmaterial

in der KF im Zeitverlauf und getrieben durch den Druck des auflaufenden Gebirges in die evtl. verbliebenen lokalen Lösungskavernen innerhalb der VWZ wandern kann. Wenn die durch Auflösen der voneinander isoliert in der KF entstandenen kleinen „Lösungskavernen“ räumlich voneinander isoliert sind und somit keine hydraulische Verbindung haben, kann auch im Falle des unwahrscheinlichen Verbleibens einzelner „offener“ Mikrokavernen infolge punktuell größerer ta/ks-Mineralnester keine Lösungsströmung durch die KF/ALZ zustande kommen. Wegen der zeitabhängigen Verformungseigenschaften des anstehenden Salzgesteins werden evtl. vorhandene Reste einer VWZ im Zeitverlauf weiter abnehmen; der Vorgang wird jedoch gegenüber der Risschließung und Verheilung in der dilatanzbedingten ALZ wegen der anderen Geometrie der „Mikrokavernen“ zeitlich verzögert stattfinden.

Geomechanische Eigenschaften – Gebirgskonvergenz:

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse weisen der zeitabhängigen Deformationen des Gebirges eine entscheidende Bedeutung zu. Die zeitabhängige Verformung des Gebirges ist im Salzgestein eine feststehende Eigenschaft, die mit Sicherheit eintritt, deren tatsächlicher zeitlicher Verlauf aber – neben dem herrschenden Spannungszustand - von den lokalen Gebirgseigenschaften und der hohlraumnahen sekundären Spannungsverteilung quantitativ bestimmt wird. Am VO3 wurden deshalb frühzeitig Konvergenzmessungen begonnen. Wegen des geringen Durchörterungsgrades in der Umgebung des VO3 wies die Konvergenz eine stetige, betragsmäßig aber relativ geringe Größe (s. TB 3) auf. Diese Daten und ein für den Standort mehrfach verifiziertes Stoffgesetz wurden den numerischen Studien (TB 6 und Abschnitt 8) zu Grunde gelegt. Es konnte nachgewiesen werden, dass sich bei Modellierung exemplarischer Bauwerksabschnitte mit den untersuchten Baustoffen in der KF des Dammbauwerkes nach etwa $t_x \geq 100$ Jahren eine Gebirgsnormalspannung eingestellt hat, die die maximal zu erwartenden Lösungsdrücke übersteigt und somit in der KF das Minimalspannungskriteriums nicht verletzt ist (TB 6 und Abschnitt 8). Zu diesem Wert „$t_x \approx$ >100 Jahre“ sollte standortabhängig ein Sicherheitszuschlag (z.B. mindestens in Form eines Faktors 2) hinzugefügt werden, der die Restunsicherheiten, die in den Berechnungsmodellen enthalten sind und die „verzögerte“ Impermeabilisierung der VWZ durch Gebirgsdruck, die in den Modellen nicht exakt genug modelliert werden können, berücksichtigt. Somit ergibt sich die Zeit $t_{x,eff} \approx 200$ a, die den Zeitraum umfasst, bis zu dem das Element EZ mindestens wirksam bleiben muss. Ab Zeit $t_{x,eff} \approx 200$ a muss das langzeitsichere Element ED an voll wirksam sein. Der Zeitpunkt $t \approx 200$ a spielt somit bei der Strukturierung/Planung und Ausführung des Abdichtbauwerkes eine bestimmende Rolle (TB 6).

Die Zeit $t_{x,eff}$ bestimmt, dass das gesamte komplexe, zeitnah nach Errichtung wirksame und langzeitsichere Abdichtbauwerk einen Abschnitt enthalten muss, der quasi sofort (Monate bis wenige Jahre nach Errichtung) die Dichtwirkung im erforderlichen Maße bis zur Zeit $t_{x,eff} \approx 200$ a übernehmen kann (Abschnitt EZ), für den jedoch deshalb nicht zwingend die Langzeitsicherheit für Funktionszeiträume > 200a nachgewiesen werden muss. Ein zweiter Abschnitt (Abschnitt ED) muss spätestens nach $t_{x,eff} \geq 200$ a im vollen Umfang wirksam werden und (unabhängig vom ersten Abschnitt EZ) von diesem Zeitpunkt an die erforderliche Dichtwirkung dauerhaft mit redundanten und diversitären Einzelelementen absichern.

Die Wirksamkeit des gesamten, komplexen Abdichtbauwerkes kann zusätzlich wesentlich unterstützt werden, wenn Möglichkeiten gefunden werden, die angreifenden Lösungen so zu konditionieren, dass die Auswirkungen der angreifenden Lösung auf die VWZ – zusätzlich zu den Maßnahmen der Beseitigung und Behandlung der VWZ – dauerhaft so gering wie möglich gehalten werden können und dass evtl. in die komplexe ALZ eindringende Lösungen keine Restlösefähigkeit mehr besitzen. Das kann grundsätzlich durch auf der Lösungsseite installierte Vorbau-Elemente VE erreicht werden. Im Rahmen des Vorhabens wurden 2 Wirkungsprinzipien derartiger Vorbauelemente entwickelt (TB 8.1 und 8.2).

9.3 Konditionierung der angreifenden Lösungen (VE)

Im Teil 1 des Vorhabens wurde das 3-Zonen-Element als ein Vorbau-Element (VE) entwickelt und vom Grundsatz her stofflich dimensioniert, das je nach Ausführungsvariante sicher stellen kann, dass ungesättigte Salzlösungen vor der Einwirkung auf das eigentliche Bauwerk für Standorte im CaT in eine $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung umgewandelt werden können, die weder die Dammbauwerke im engeren Sinne noch die komplexe ALZ nachteilig beeinflusst. Als Zusatzeffekt finden die stofflichen Umwandlungen im 3-Zonen-Element unter Expansion der einzelnen Zonen (TB 8.1) statt. Im Rahmen des Vorhabens konnten die expansiven Wirkungen qualitativ erfasst werden. Nicht abschließend geklärt ist bei diesem Element das denkbare „Umströmen" der ursprünglich angreifenden unkonditionierten Lösung durch die komplexe ALZ mit nachfolgendem Angriff auf die komplexe ALZ im eigentlichen Bauwerksbereich EZ und ED. Dieser Effekt kann jedoch durch die weitgehende Entfernung der komplexen ALZ vor dem Einbau des VE und durch eine ausreichende Baulänge wesentlich reduziert werden. Außerdem kann er – wenn überhaupt – nur für die Elemente VE und EZ Bedeutung erlangen. Für das 3-Zonen-Element ist wegen dieses Effektes der quantitative Funktionsnachweis derzeit nicht erbringbar. Wegen der qualitativ sicher eintretenden positiven Wirkungen auf das eigentliche Abdichtbauwerk wird seine Errichtung jedoch in jedem Falle empfohlen.

Alternativ bzw. ergänzend ist im Rahmen eines Vorbauelementes VE auch der Einsatz von Elementen aus Gelbaustoffen mit Tachhydritdepot (weiche Ausführung) entwickelt und erprobt worden, die im Falle angreifender tachyhydrituntersättigter Lösung eine Sättigung an Tachyhydrit vor dem Angriff auf das Abdichtbauwerk und die ALZ herbeiführen können (TB 8.2).

Bei dem letztgenannten Element wird ein dauerplastischer und ortsstabiler Gelbaustoff auf der Basis konzentrierter $MgCl_2$-Lösungen eingesetzt, dessen Feststoffphasen wegen ihrer feinkörnigen Struktur hohe Festigkeiten erreichen können. Bei der Vergelung kann wegen der Phasenstruktur ein erheblicher Anteil Lösung in den Poren eingelagert werden. Das Ziel besteht dabei in der Entstehung eines dauerplastischen Gelkörpers. Die einzusetzenden mineralischen Systeme auf der Basis wässriger Anmischflüssigkeiten sichern ab, dass bei dem fertigen Gelbaustoff das Porenfluid vollständig mit Tachyhydrit gesättigt ist. Die Gelbaustoffe geben bei Druckbeanspruchung einen Teil des Porenfluids ab, so dass im Falle des Durchströmens des Elements mit nicht vollständig mit ta gesättigter Lösung diese – bis zum Verbrauch der vorhandenen gesättigten Porenlösung - aufgesättigt werden kann (TB 8.2).

Beide Varianten von Vorbau-Elementen sind umso länger wirksam, je niedriger die integrale effektive Permeabilität des Abdichtbauwerkes ist. Die Überbrückung zumindest der Zeit $t_{x,eff}$ ist mit diesen Elementen bei sachgemäßer Ausführung entsprechend den im Vorhaben gewonnenen Ergebnisseen mit sehr großer Wahrscheinlichkeit möglich.

Das Vorbauelement auf Gel-Basis (harte Ausführung) eröffnet als Porenfüllstoff für Hartgesteinsschotter-Widerlagerelemente eine weitere Anwendungsmöglichkeit innerhalb der komplexen Abdichtbauwerke (s. Abschnitt 9.4).

9.4 Eigenschaften der Baustoffe für das Abdichtbauwerk

9.4.1 Baustoffe auf MgO-Basis

Im Ergebnis der Untersuchungen zum Teil 1 des Vorhabens hat sich ein Hauptelement aus MgO-Beton, das zugleich die Funktion eines Dicht- und eines Lastabtragelementes erfüllt, für den leichtlöslichen CaT als am besten geeignet herausgestellt. Dazu muss das Baumaterial MgO-Beton sowohl gegenüber dem maximalen Lösungsdruck als auch gegenüber der vollen Gebirgsbelastung sowohl thermodynamisch als auch mechanisch stabil sein und die erforderlichen Eigenschaften dauerhaft beibehalten. Ausgangspunkt der Untersuchungen war der klassische MgO-Beton nach KAMMÜLLER & SCHEIBE [7, 17, 23]. Als

Zuschlagstoffe sollten inerte mineralische Zuschlagstoffe und als Anmischflüssigkeiten solche Salzlösungen verwendet werden, die möglichst keine Schädigung des sensiblen anstehenden Gebirges im Konturbereich der Grubenbaue zur Folge haben. Bei den Untersuchungen ergab sich, dass der konkreten Rezeptur der MgO-Mischungen eine sehr große Bedeutung zukam. Dabei standen die großtechnische Verarbeitbarkeit, die stoffliche Reproduzierbarkeit der Rezeptur und die charakteristischen Eigenschaften sowie die Gewährleistung der mechanischen Stabilität und der thermodynamischen Beständigkeit des MgO-Betons im Vordergrund.

Zunächst erwies sich die Rezeptur MB6 als geeignet [17]. Teilfragen wie Verhältnisse in der KF (z.B. Permeabilitätsentwicklung) bei großmaßstäblicher Anwendung, relativ hohe Entwicklung von Hydratationswärme beim Abbinden, Veränderung der mechanischen Eigenschaften bei Lösungsangriff, Verhalten gegenüber $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung, Verhältnis der thermodynamischen Stabilität zur mechanischen Stabilität u.a. bedurften der weiteren Aufklärung.

Im Ergebnis umfangreicher Labor- und kleinmaßstäblicher in-situ-Untersuchungen erwies sich die Basisrezeptur MB10 als Baustoff für MgO-Beton besser geeignet als die Rezeptur MB6 vor allem bezüglich der geomechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Verformbarkeit). Diese Rezeptur diente auch als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer modifizierten Rezeptur für den Einsatz als Spritzbeton (TB 5.1). Die Rezeptur MB10 besteht jedoch aus chemischer Sicht zum größten Teil aus 5-1-8-Phase, die – wie sich erst im Laufe der Forschungsarbeiten herausstellte – thermodynamisch nicht stabil ist. Die thermodynamisch stabile Phase ist die 3-1-8-Phase. Der Zerfall von MB10-Proben bei Einlagerung in $MgCl_2$-$CaCl_2$-Lösung wurde in Einlagerungsversuchen über mehrere Monate und Jahre auch versuchstechnisch nachgewiesen. Ein weiteres Ziel der Forschungsarbeiten war daher, einen MgO-Beton zu entwickeln, der nahezu ausschließlich aus 3-1-8-Phase besteht. Dieses Ziel konnte jedoch noch nicht zufrieden stellend erreicht werden. Es hat sich gezeigt, dass die thermodynamisch stabile Phase 3-1-8 zunächst zu mechanisch ungünstigen Eigenschaften des MgO-Bauwerkes geführt hat (gegenüber MB10 verringerte Steifigkeit und wesentlich höhere Kriechrate). In weiterführenden Untersuchungen gelang es, Bedingungen zu identifizieren, die diesen Nachteil weitgehend ausschlossen (Abbinden bei erhöhten Temperaturen, Zulassen eines sogen. Alterungsprozesses nach dem Einbau; s. TB 5.1 und 5.2).

Als hilfreich erweist sich die gesichert festgestellte Eigenschaft, dass sich ein MgO-Beton mit überwiegend 5-1-8 Phase bei Lösungszutritt unter Volumenzunahme allmählich in die Phase 3-1-8 umwandelt, die dann nach einer bestimmten Alterungsdauer bereits in der Größenordnung von Zeiten $t << t_{x,eff}$ auch die erforderlichen geomechanischen Eigenschaften aufweist. Damit ergab sich die Möglichkeit, im komplexen Bauwerk die ED-Elemente in MgO-Ortbeton der Basisrezeptur MB10 (mit Temperaturbegrenzung im Bereich der KF) und/oder als MgO-Spritzbeton auszuführen und diese Elemente aus 5-1-8-Phase durch Widerlager mechanisch einzuspannen. Dadurch kann der zum Zeitpunkt eines Lösungszutrittes evtl. noch nicht abgeschlossenem Umwandlungsvorgang von MgO/5-1-8 in MgO/3-1-8 sowie einem evtl. noch nicht ausreichenden Alterungsvorgang (diese Einschränkung hat nach den Versuchergebnissen eine geringe Eintretenswahrscheinlichkeit) die nachträgliche Umwandlung von MgO/5-1-8 in MgO/3-1-8 unter Kompressionsbedingungen stattfinden. Auf diese Weise wird sowohl eine zusätzlich positive Wirkung auf die Selbstabdichtung der komplexen ALZ, als auch eine positive Wirkung in Richtung Reduzierung der Permeabilität des Baukörpers selbst ausgeübt und die geomechanische Stabilität des Elementes bleibt erhalten. Diese Verhaltensweise wurde den numerischen Studien an komplexen Modellen (s. TB 6 und Abschnitt 8.4) zu Grunde gelegt und somit hinsichtlich der mechanischen Wirkungen rechnerisch verifiziert. Von der Berücksichtigung einer mit der Umwandlung der 5-1-8-Phase in die 3-1-8-Phase zusätzlich exoperimentell beobachteten und theoretisch begründbaren Volumenzunahme des MgO-Betons wurde in den Berechnungsmodellen (konservativ) Weise Abstand genommen.

Aus den genannten Gründen ergibt sich die generelle Schlussfolgerung für das Element ED im Gesamtkonzept, dass Element im Sinne einer Redundanz und Diversität sowohl als eingespannten MgO-Spritzbeton mit zunächst überwiegender 5-1-8 Phase (Baustoff 1 in Abbildung 63) und als eingespannten MgO-Ortbeton mit zunächst überwiegender 5-1-8 Phase (Baustoff 2 in Abbildung 63) zu erstellen.

Alternativ ist nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen (s. TB 5.1 und TB 6) als Baustoff 2 auch ein mechanisch eingespannter MgO-Spritzbeton auf MgO/3-1-8-Basis anwendbar, wenn die zum Vorhabensende noch offenen Fragestellungen zu dieser Baustoffvariante geklärt werden können.

Bzgl. der Langzeitsicherheit des MgO/5-1-8 Baustoffs ist - ähnlich wie für zementbasierte Baustoffen (z. B. Salzbeton [2, 32]) – festzuhalten, dass MgO/5-1-8 unter folgenden Bedingungen eine sehr lange Beständigkeit ausweist:

A. Die für die Wechselwirkungen mit zutretenden Lösungen zur Verfügung stehende Oberfläche der Bindemittelphase ist sehr gering. Dies wird erreicht, wenn
   a. die Porosität insgesamt sehr gering ist.
   b. die Porenradien so klein sind, dass der Flüssigkeitstransport sehr langsam verläuft.

B. Die Reaktionsgeschwindigkeit zwischen der 5-1-8-Bindemittelphase und der zutretenden Lösung ist sehr gering bzw. kinetisch gehemmt. Dies ist durch folgende Mechanismen möglich:
   a. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Phasenumbildung ist sehr gering.
   b. Die Viskosität der in den Poren reagierten Lösung erhöht sich infolge der aufgelösten Korrosionsprodukte.
   c. Es entstehen feste Korrosionsprodukte, die zu einer "Verstopfung" der Poren führen.
   d. Auf der Reaktionsoberfläche bilden sich Deckschichten, die einen weiteren Zutritt von Lösung verhindern (Passivierung).

C. Die Umwandlungsprozesse finden unter Volumenzunahme statt und das Bauwerk kann nicht expandieren, so dass es zu einer dauerhaften Expansionsdruckausbildung kommt.

Die mittlere Porosität (Fall Aa) des MgO-Betons beträgt bei einem defektfreiem Gefüge ca. 5 % (für Gas). Für Lösung wurden in diesem Fall Porositäten von 1 – 2 % bestimmt. Die Unterschiede können darauf hinweisen, dass möglicherweise die Mikroporen des MgO-Betons nicht vollständig mit Lösung gesättigt werden konnten [6]. Eine Bestimmung der Porengrößenverteilung für den Beton (Fall Ab) ist im vorliegenden Vorhaben nicht vorgenommen worden. Es liegen erste Untersuchungen zur Porengrößenverteilung der 3-1-8-Bindemittelphase vor (TB 5.2). Diese Ergebnisse sind aber für die Bewertung der Standzeit der 5-1-8-Bindemittelphase nicht direkt relevant.

Permeabilitätsmessungen des MgO-Betons (5-1-8-Bindemittelphase) mit $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung zeigen schwankende oder sich mit der Zeit verringernde Werte, was auf Wechselwirkungen zwischen der Lösung und dem MgO-Beton hindeutet. Diese Messergebnisse können auf die Befunde für die Fälle Bb und Bc hinweisen. Der Fall Bb ist direkt nur erschwert nachweisbar, da die Viskosität der Porenlösung nicht messbar ist bzw. in den bisher durchgeführten Versuchen kein Permeat gewonnen werden konnte. Der Fall Bd (nachhaltige Passivierung) kann nur durch Langzeitpermeabilitätsmessungen und phasenanalytische Identifizierung dieser Dickschichten belegt werden. Derartige Messungen sind nicht durchgeführt worden. Weiterhin wurde eindeutig der Fall C (Expansionsvorgänge) belegt. Bei den Permeabilitätsmessungen (Auswertung der Druckabfallkurve) wurde ein Druckanstieg festgestellt, der auf Reaktionen hinweist, die zu einer Volumenzunahme bzw. auf einen Expansionsdruck hinweisen (TB 4.2). Ähnliche Effekte sind auch bei Messungen der Lösungspermeabilität im Gebirge festgestellt worden [35]. Ein Teil der Volumenzunahme ist für den vorliegenden Fall (MgO-Beton mit 5-1-8-Bindemittel bei Molverhältnissen

MgO/Mg^{2+} > 5) auf die Reaktion zwischen Überschuss-MgO und $CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung bedingt (TB 5.1 und 5.2).

Über die Reaktionsgeschwindigkeit der Phasenumbildung (Fall "Ba") liegen noch keine endgültigen Ergebnisse vor. Dies ist nicht problematisch, da die Reaktion durch die Transportvorgänge limitiert wird, worauf die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen hinweisen (siehe oben).

Insgesamt unterstützen diese Befunde, dass ein MgO-Beton auf der Basis der 5-1-8-Phase unter Langzeitsicherheitsaspekten einsetzbar ist, da bei Lösungsangriff die Umwandlung immer in die langzeitstabile 3-1-8-Phase erfolgt und die dabei auftretenden Begleitumstände einer Funktionalität eines 5-1-8- bzw. 3-1-8-Elementes nicht entgegenstehen, wenn das Element mechanisch zwischen geeigneten Widerlagern eingespannt wird.

9.4.2 Baustoffe auf Asphalt Basis

Das bereits im Teil 1 des Vorhabens entwickelte vorläufige Grundkonzept (Abbildung 4) geht davon aus, dass eine echte Diversität und Redundanz bezüglich der Funktionalität des Verschlussbauwerkes erreicht wird, wenn alternative Baustoffe zusätzlich eingebaut werden. Im Vorhaben war von Anfang an der Baustoff Asphalt als alternativer Dichtbaustoff vorgesehen, wenn seine dauerhafte Abdichteigenschaft technologisch im Bauwerk zur Wirkung gebracht werden kann und wenn zusätzliche Elemente die Lagestabilität (nur geringe Verschiebung des Asphaltelementes bei maximaler Lösungsbelastung) dauerhaft sicher übernehmen.

Der Absicherung dieser Zielstellung dienten sowohl der Großversuch GV3 (TB 7) als auch die ihn begleitenden und ergänzenden Labor- und mittelmaßstäblichen in situ Untersuchungen. Die Verwendung des Materials Asphalt im Grundkonzept wurde ermöglicht bzw. entscheidend befördert durch die Ergebnisse des parallel realisierten Vorhabens [22], die zeitnah in das Vorhaben CARLA eingebunden werden konnten (TB 2 und TB 7).

Die im Vorhaben bevorzugte Variante der Errichtung einer „Mauerung“ aus Asphaltsteinen, ihre Einbindung in einen umlaufenden Gebirgsschlitz und ihre anschließende „In-situ-Monolithisierung“ durch Druck und Temperatur in quantitativen Größenordnungen, die unter Tage auch im CaT gut beherrschbar sind, hat sich als prinzipiell realisierbar erwiesen. Leider hatte die Umsetzung der Druckkissen-Lösung im Rahmen des GV3 – nach erfolgreichen Technikumsversuchen - technisch-technologische Unzulänglichkeiten, so dass der abschließende Funktionsbeweis im Großversuch nicht erfolgen konnte. Dennoch lassen die Labor- und mittelmaßstäblichen Versuche an Modellen im Labor und in Bohrlöchern in situ (TB 7 und TB 2) jedoch den Schluss zu, dass Asphaltdichtelemente auch im großen Maßstab realisiert werden können. Insbesondere ist mit der Entwicklung eines Voranstrichstoffes am Kontakt Asphalt ⇔ CaT die Frage der Dichtigkeit am Gebirgskontakt unter Lösungseinwirkung positiv beantwortet worden.

Im Vorhaben wurden Technologien der in situ Monolithisierung der „Asphaltmauerung“ analysiert (TB 7), von denen die Monolithisierung durch eine heizbare Gummi- (oder Stahldruckzelle) dann gut realisierbar erscheint, wenn die Gummi-Druckzellen anders als beim GV3 über die gesamte Fläche der Asphaltsteinmauer sich erstreckt und auf Schlitze in der Kontur verzichtet wird. Der Asphalt muss beim Monolithisieren der Asphaltsteine durch Druck und Temperatur auch so an die Kontur gepresst werden, dass eine dauerhafte Benetzung der Kontur erreicht wird. Die Benetzung muss auch dann erhalten bleiben, wenn im Bauzustand kurzzeitig an der Firste Zugspannungen unter Eigengewicht auftreten sollten, wenn die Asphaltscheibe nicht seitlich gestützt sein sollte. Reißt der Asphalt (an der Firste) von der Kontur während des Baus des Verschlussbauwerkes ab und ist damit keine Benetzung mehr vorhanden, ist die Asphaltscheibe bei einer Flüssigkeitsbeauschlagung nicht dicht. Die dauerhafte Benetzung ist fundamentale Voraussetzung für die Dichtheit der Asphaltscheibe. Wenn die Asphaltscheibe an der Kontur während des Baus abreißen sollte, muss deshalb erneut durch Druck und Temperatur über ein Kissen oder einen Stempel

monolithisiert werden. Injektionen im Kontaktbereich zwischen Asphaltscheibe und Kontur mittels perforierter Schläuche führen nicht sicher zu einer nachträglichen Verbund zwischen Asphaltscheibe und Gebirge, da bei einer Injektion mit perforierten Schläuchen, nicht sicher vorhergesagt werden kann, dass das Injektionsgut auch genau an den Stellen austritt, an denen keine Benetzung vorhanden ist. Eine Monolithisierung der Asphaltsteine ist technisch wesentlich einfacher ohne einen Schlitz auszuführen (auch wenn im GV3 ein Schlitz noch angeordnet worden ist). Auf einen Schlitz sollte deshalb beim Bau einer Asphaltscheibe verzichtet werden.

Weitere technologische Möglichkeiten der Monolithisierung senkrecht stehender Asphaltstein-Mauerungen wurde in Abschnitt 6.5.3 vorgestellt. Ihre Erprobung fand jedoch noch nicht statt.

Insgesamt konnte mit dem Vorhaben ein Entwicklungsstand erreicht werden, der die prinzipielle Funktionsfähigkeit eines solchen Elementes nachweist und der eine gute Basis für weitere technologische Verbesserungen erlaubt. Nach Entwicklung verbesserter technologischer Verfahrensweisen für den Monolithisierungsvorgang ist ein Asphalt-Element im Gesamtkonzept einsetzbar.

Die Verschiebungssicherheit der Asphaltdichtungen ist beim Grundprinzip der Abbildung 63 und 10.2 durch die Widerlager für die ED-Elemente bzw. für die EZ-Elemente gegeben.

Aussagen zur Langzeitstabilität von Asphalt bzw. von Bitumen sind im Abschlussbericht des FuE-Vorhabens "Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke" [21, 22] enthalten.

Die Langzeitbeständigkeit von Asphalt bzw. von Bitumen kann durch natürliche Analoga (natürlicher Asphaltsee in Trinidad) belegt werden. Allerdings sind für Bitumen keine natürlichen Analoga für salinare Bedingungen bekannt.

Aus dem Straßenbau sind folgende kritische Umgebungsbedingungen für Bitumen bekannt:

- UV-Strahlung in Kombination mit Sauerstoff,
- Versprödung durch hohe Temperaturen (oxidative Alterung),
- Biologische Degradation.

Unten den vorliegenden Bedingungen (Streckenverschluss im Carnallitit) können die beiden ersten Faktoren ausgeschlossen werden. Untertage ist die direkte UV-Strahlung nicht relevant. Die Temperaturen liegen konstant im Bereich < 35 °C. Beim Heißeinbau ist die Dauer der Hochtemperaturphase (> 35 °C) für Alterungsprozesse nicht relevant.

Eine biologische Degradation durch sog. "asphaltaktive" Mikroorganismen, die Bitumen als Kohlenstoffquelle nutzen, findet überall dort statt, wo freier Sauerstoff vorhanden ist. Findet eine derartige Degradation statt, so äußert sie sich im Verspröden und geschieht überwiegend an der Oberfläche des Asphalts. Dabei liegt die Abbaurate etwa zwischen 27-55 g/(m²a). Bei einer Bitumendichte von ca. 1 g/cm³ entspricht dies 27 bis 55 µm pro Jahr. Unter anaeroben Bedingungen werden ca. 100-fach niedrigere Werte angegeben (siehe [22]).

Andererseits existieren aber nur wenige Forschungsarbeiten zur biologischen Degradation bitumenhaltiger Baustoffe unter Untertagebedingungen. Für salinare Bedingungen, insbesondere für Kalisalz sind keine Untersuchungen bekannt [22].

Für eine realistische Prognose von Degradationsraten sind mikrobiologische Untersuchungen unter salinaren Bedingungen erforderlich (Forschungsbedarf). Insbesondere muss untersucht werden, ob die im Salinar und unter anaeroben Bedingungen (Nachbetriebsphase) relevanten Mikroorganismen überhaupt "asphaltaktiv" sind, oder ob über den angedachten Nachweiszeitraum derartige Arten durch Anpassung bzw. Mutation entstehen können. Insgesamt kann festgestellt werden, dass derzeit keine Kenntnisse für die Veränderung von Asphalt unter salinaren Bedingungen bekannt sind, die dessen Langzeitbeständigkeit in Frage stellen können.

9.4.3 Baustoffe auf Gel-Basis

Auf der Basis bereits wiederholt zur Sicherung von Grubenbauen und Schächten eingesetzter Gelbaustoffe unter Verwendung von $MgCl_2$-Lösungen ($MgCl_2$-Gehalt < 300 g/l) wurde im Rahmen des Vorhabens für die speziellen Bedingungen im CaT dieser Baustoff weiterentwickelt (TB 8.2). Es konnten Rezepturen entwickelt und erprobt werden, die in der CaT-Umgebung stabil sind, die unter Druck gesättigte Tachyhydritlösung abgeben, um so den Lösungsangriff auf komplexe Dammbauwerke, insbesondere die komplexe ALZ, positiv zu beeinflussen und die außerdem in Verbindung mit einer Gesteinsschottermatrix in langzeitsicheren Widerlagerelementen Verwendung finden können.

Auf Grund dieser Eigenschaften können Gel-Baustoffe mit Tachyhydrit-Depot als Vorbauelemente zur Konditionierung des Lösungsangriffs verwendet werden (sogen. „weiche“ Ausführung A; s. Abschnitt 9.3 und TB 8.2). Sie eröffnen aber auch die Möglichkeit, mit den entwickelten Gelbaustoffen die Porenräume von mechanischen Widerlagerelementen aus Hartgesteinsschotter zu verfüllen um so das Setzungsverhalten des Schotterkörpers zu minimieren (sogen. steife Ausführung B; s. TB 8.2).

9.4.4 Materialien für die Konturversiegelung und für Injektionsmaßnahmen

Wegen der außerordentlichen Bedeutung der KF für die Funktionstüchtigkeit des Gesamtbauwerkes wurden einerseits technische Möglichkeiten der „Vergütung“ der KF ausführlich untersucht und andererseits auf eine Zweiteilung des Gesamtbauwerkes in EZ (mit zwingend notwendiger Vergütung der KF) und ED (mit zeitabhängiger Schließung und Verheilung der mechanischen und hydraulischen Auswirkungen der KF durch Auflasten des Gebirges) orientiert.

Für die KF-Vergütung stehen prinzipiell Materialien und Verfahren mit nachweisbarer Langzeitsicherheit und Materialien und Verfahren mit nicht nachweisbarer Langzeitsicherheit zur Verfügung. Zu den erstgenannten gehört das im Vorhaben entwickelte 2K-Bitumen und MgO-Suspension. Zu Materialien und Verfahren mit nicht nachweisbarer Langzeitsicherheit gehört das Material Denepox-40 (TB 4.1) sowie u.U. auch Feinstzementsuspension [10]. Die Materialpalette wird durch verschiedene Anstrichstoffe für die beraubte Gebirgskontur mit unterschiedlichen Anwendungsbereichen ergänzt.

2K-Bitumen:

Das Material 2K-Bitumen ist ein definiert aufgemahlenes Hartbitumenpulver, das mit einem speziellen entaromatisierten Kohlenwasserstoff vermischt wird [16]. Die entstehende Suspension kann mittels einer Spezialpumpe in abzudichtende Wegsamkeiten verpresst werden. Die Vorteile bestehen in der Verarbeitbarkeit bei Umgebungstemperatur, in einer einstellbaren Viskosität, in der Entwicklung einer Schubfestigkeit bei einer lang anhaltenden Restplastizität des abgebundenen Materials und im geringen Schrumpfen. Für 2K-Bitumen wurde in zahlreichen Versuchen in Bohrlöchern, an Oberflächenpackern sowie mittelmaßstäblichen Versuchen in situ eine verpressbare Spaltweite bis hinab zu 30µm ermittelt. In verschiedenen hydraulischen Versuchen wurden an Versuchs-KF Permeabilitätsreduktionen nach 2K-Bitumeninjektion um bis zu 5 Größenordnungen ermittelt (s. TB 4.1).

MgO-Suspension:

Für den Fall der Entstehung von Fließwegen mit Spaltweiten im Bereich von Millimetern wurden Tests mit MgO-Suspensionen mit und ohne Partikelstützung unternommen. Sie konnten im Vorhaben nicht zu einem erfolgreichen Ende geführt werden, so dass für dieses Verfahren keine Empfehlung gegeben werden kann.

Anstrichstoffe:

Anstrichstoffe, die auf der Basis leicht flüchtiger Lösungsmittel arbeiten, stoßen bei der Anwendung im Untertagebergbau häufig auf Genehmigungsprobleme nach GesBergV bzw. nach den Sicherheitsvorschriften des Brand- und Explosionsschutzes. Ein Anstrichstoff, bei dem Chancen der Genehmigung gesehen werden, wurde im Rahmen des Vorhabens [21] entwickelt. Er steht prinzipiell für die Anwendung in den Asphaltelementen (s. TB 4.2) zur Verfügung.

Denepox-40:

Nach den in [15] dokumentierten Untersuchungen, die z. T. im Rahmen des Vorhabens durchgeführt wurden, ist für die Anwendungen in CaT-Umgebung das Material Denenpox-40 (TB 4.1) geeignet. Das Material zeichnet sich durch eine niedrige Anfangsviskosität (ca. 25 mPas), hohe Adhäsion zu Gebirge und Baustoff sowie eine hohe Zugfestigkeit (ca. 60 MPa) aus. Für das Material gibt es keinen Nachweis der Langzeitsicherheit in salinarer Umgebung. Da die Langzeitbeständigkeit des Materials vor allem durch die Einwirkung von UV-Strahlung begrenzt wird, die beim untertägigen Einsatz zuverlässig und dauerhaft ausgeschlossen werden kann, kann auch unter Bezugnahme auf Herstellerunterlagen [15] eine sichere Funktion für einen Zeitraum von 100 - 150 Jahren zu Grunde gelegt werden. Außerdem ist der Kontakt mit salinaren Lösungen (gegenüber denen Denepox-40 ohnehin eine hohe Resistenz aufweist) beim Einsatz als Injektionsmittel nur in geringer Intensität, meist nur auf diffusive Basis beschränkt, so dass von einer deutlich größeren Lebensdauer ausgegangen werden kann, die die Zeit $t_{x,eff}$ mit sehr großer Wahrscheinlichkeit mindestens erreicht. Positiv wird das im Zeitverlauf auflaufende Gebirge (auch beim Element EZ) eventuelle Korrosionseffekte am Denepox 40, die mit Volumenschwund verbunden sein könnten, mit zunehmender Zeit kompensieren.

Zahlreiche in situ Untersuchungen haben belegt, dass in Bohrlöchern und an Oberflächenpackern in CaT-Umgebung Permeabilitätsverringerungen mit Denepox-40-Injektion an entsprechenden KF um bis zu 5 Größenordnungen erreicht werden können.

9.4.5 Materialien und Bauprinzipen für Widerlagerelemente

Widerlagerelemente dienen der mechanischen Einspannung der eigentlichen Dichtelemente des Abdichtbauwerkes. Sie sollen sicher stellen, dass diese Bauelemente, wenn sie beim Einbau oder im Verlaufe ihrer Funktionszeit einer Expansion unterliegen, eine Normalspannung in der KF entsteht und aufrechterhalten wird. Das bedeutet, dass die Widerlagerelemente über den geplanten Funktionszeitraum mechanisch stabil und möglichst steif, dass sie aber nicht hydraulisch dicht sein müssen. In Sonderfällen, z.B. in Verbindung mit dem Einbau einer Asphaltscheibe, dienen Widerlager technologischen Zwecken, z.B. als Druck-Widerlager bei der Monolithisierung der Asphalt-Bausteine (GV3; TB 7). In diesem Fall haben sie eine zeitlich sehr begrenzte Funktion.

Auch bei einer zeitlich begrenzen Wirksamkeit dürfen Widerlager, da sie als Elemente im Abdichtbauswerk verbleiben, im Falle eines Lösungsangriffs dauerhaft keiner Materialerosion unterliegen, die von einem Volumenverlust begleitet ist, der durch das Gebirgskriechen nicht kompensiert werden kann.

Im Zusammenhang mit der Sicherung von Schächten und anderen Hohlräumen im Kali- und Steinsalzbergbau sind zu diesem Zweck wiederholt Bauelemente aus Hartgesteinsschotter untersucht worden [1, 5, 28]. Bei Hartgesteinsschottern (z.B. Basaltschotter) kann der Langzeitsicherheitsnachweis im Salzgestein über natürliche Analoga geführt werden (s.a. [17]). Beim Einbau aus einer Fallhöhe von ca. 20 m hat sich im Schotter (z.B. Diabasschotter der Kornkennlinie 32/80 mm) eine Verdichtung eingestellt, die relativ gleichmäßig war über das gesamte eingebaute Schottervolumen und die nur geringe Setzungen in der

Größenordnung von wenigen Millimetern zeigte [1]. Zugleich kam es zur zuverlässigen Ausbildung des sogen. „Siloeffektes“ bei der Spannungsverteilung. Voraussetzung war allerdings, dass das begrenzte Auslaufen der Schotterböschungen in den Füllorten unterbunden wurde. Diese Feststellungen gelten nach [1] gleichermaßen für trockene als auch für geflutete Schottersäulen.

Es ist schwieriger, diese Randbedingungen, die für Schachtröhren abgeleitet wurden, beim Einbau von Schotterwiderlagern in horizontale Grubenbaue zu erfüllen. Dazu sind im Rahmen konkreter Planungen an den jeweiligen Standorten ortsspezifische technologische Lösungen zu entwickeln. Erfolgversprechend scheint jedoch zu sein, den Einbau der Schotterwiderlager zwischen Schalungselementen (MgO-Baustein- bzw. Hartbranntklinkermauerungen oder auch Bauelemente des Abdichtbauwerkes selbst) vorzunehmen und die entstehenden Porenräume der Schotterpackung mit einem lösungsbeständigem Material (DBM2 oder Gelbaustoff, entsprechend den Ergebnissen nach TB 5 und TB 8.2) zu verfüllen. Die Porenraumverfüllung unterbindet das Nachsacken an den Stirnflächen der Schotterpackungen und sichert somit die Setzungsarmut des Schotters langfristig ab. Durch die Steifigkeit des Schottergerüstes kann auf diese Weise die Widerlagerfunktion dauerhaft übernommen werden.

10 Weiterentwicklung des Grundkonzepts

10.1 Elemente des Grundkonzepts

In [17] wurde im Ergebnis von Literaturanalysen und Grundsatzüberlegungen ein erstes Grundkonzept für ein komplexes Abdichtbauwerk im carnallitischen leichlöslichen Salzgestein vorgeschlagen. Dieses Grundkonzept (Abbildung 4) diente als Startmodell für die Weiterführung der gezielten Forschungsarbeiten im Vorhaben. Die im Abschnitt 9 zusammenfassend dargestellten Grundsätze und Randbedingungen für die Weiterentwicklung des Grundkonzeptes, die im Rahmen des Vorhabens erarbeitet wurden, führen auf ein Schema, wie es in Abbildung 63 dargestellt ist. Es besteht aus den Elementen VE (Vorbauelement), sofort wirksames, aber u.U. nicht langzeitsicheres Element EZ und langzeitsicheres Hauptelement ED in der Reihenfolge von der Lösungsangriffseite zur Luftseite. Dieses Bauwerk kann ggf. für den beidseitigen Lösungsangriff komplettiert werden, wenn sich an das in Abbildung 63 rechts befindliche Ende des Elementes ED die Elemente EZ und VZ erneut und in gleicher Funktion anschließen.

Mit diesem Grundkonzept werden die Forderungen an ein Abdichtbauwerk in der folgenden Weise umgesetzt:

- Die sofortige Dichtwirkung wird mit dem Element EZ realisiert, indem mit dem Abschnitt (2)+(3)+(4) (Widerlager für EZ-Baustoff + EZ-Baustoff exemplarisch + Widerlager für EZ-Baustoff) eine sofort wirksame Dichtung erreicht wird, die durch das Asphaltelement (5) redundant ergänzt wird. Da das Element (2)+(3)+(4) zur Sicherstellung des Expansionsdruckes in der KF eine Einspannung erfordert (Elemente 2 und 4) wird bei entsprechender steifer Dimensionierung der Elemente 2 und 4 auch die Lagesicherheit für die Elemente (3) sowie (5), Teil Asphalt, gewährleistet. Redundant für die eigene Lagesicherheit und für die Lagesicherheit der Asphaltdichtung (5) wirkt das Element (3) zunehmend selbst. Bei nicht expansivem Baustoff ist der prinzipielle Aufbau des Elementes EZ ähnlich, die Widerlager (2) und (4) nehmen hier die Schalungsfunktion und die Widerlagerfunktion für Injektionen der KF wahr.

  Die Elemente EZ sind – im Gegensatz zu den langzeitsicheren Elementen ED - nicht zentraler Teil des Vorhabens. Sie sollten im Falle der Errichtung einer Abdichtung dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend gestaltet werden. Nachfolgend werden einige Gesichtspunkte zusammengestellt, die sich nach Bearbeitung des Vorhabens aus dessen Ergebnissen ergeben.

Für das Element EZ ist die abdichtende Wirkung im Kontaktbereich Bauwerk-Gebirge zeitnah nach seiner Errichtung entscheidend. Die Voraussetzung ist jedoch, dass der eigentliche Dammkörper rissfrei und mit einer Gesamtpermeabiltät ≤ 10^{-18} m² errichtet wird und dass das Element mindestens bis zur Zeit $t = t_{x,eff}$. wirksam bleibt. Weiterhin ist der Aufbau einer Normalspannung in der Kontaktfuge entweder durch den Baukörper selbst und unabhängig vom Aufkriechen des Gebirges oder durch zusätzliche Maßnahmen wie z.B. geeignete KF-Injektionen, die zugleich die Sofortabdichtung der KF für die Zeit $0 \leq t \leq t_{x,eff}$ bewirken, erforderlich.

Zum Zeitpunkt des Vorhabensabschlusses kann diese Bedingung wahrscheinlich durch den speziellen MgO-Baustoff DBM2 [20] erfüllt werden. Dieser Baustoff entwickelt nach den Ergebnissen von Labor- und mittelmaßstäblichen Versuchen beim Abbinden dauerhaft einen Kristallisationsdruck, der sich im Zusammenwirken mit dem umgebenden Gebirge als Normalspannung in der KF in der Größenordnung von ≥ 2 MPa äußert (abhängig von der Steifigkeit der Bettung des DBM2-Körpers im umgebenden Gebirge) und ist selbst weitgehend stabil gegen den Angriff salzhaltiger Lösungen (in [19] nachgewiesen für R-Lösung und für die Zeit $0 < t < t_{x,eff}$ auch für konzentrierte NaCl-Lösung). Die Stabilität gegenüber den in der Grube Teutschenthal angreifenden Lösungen zumindest für den Zeitraum $0 \leq t \leq t_{x,eff}$ konnte im Vorhaben aus Zeitgründen nicht abschließend belegt werden, gilt jedoch nach entsprechenden Anpassungen als sehr erreichbar.

Um die Entstehungsbedingungen der kristallisationsbedingten Normalspannung zu unterstützen und die Spannung selbst über die gesamte Länge des Elements EZ zu erhalten, ist es notwendig, den Bauwerkskörper (z.B. aus DBM2), der durch das Gebirge radial dehnungsbehindert wird, auch axial durch geeignete Widerlager an einer Expansion und dem damit verbundenen teilweisen Abbau der Radialspannungen zu hindern. Diese Widerlager müssen nicht fluiddicht sein; sie müssen aber als relativ steife (wenig verformbare) Elemente vor dem Einbringen des expandierenden Baustoffs errichtet werden und mindestens über den Zeitraum $0 < t < t_{x,eff}$ stabil bleiben. Das könnte eventuell realisiert werden durch Baukörper aus verdichtet eingebrachten grobkörnigen Hartgesteinsschotter, dessen Porenraum beispielsweise mit einem Gelmaterial mit Tachyhydrit-Depot (nach TB 8.2) verfüllt ist und damit die für die zeitnahe Wirksamkeit des Elements erforderliche Setzungsstabilität des Schotterkörpers auch bei horizontalem Einbau von Anfang an gewährleistet ist.

Eine weitere technische Möglichkeit, die Wirksamkeit des Bauabschnittes durch Aufbau einer Normalspannung auf der KF zu unterstützen ist das Einbringen des Baustoffes unter Vorspannung, wie es z.B. in [18] durch das Einbauen der Suspension in den in Frage kommenden Bauabschnitt über Bohrlöcher von höher gelegenen Sohlen aus vorgeschlagen und geplant wurde. Die konkreten Ausführungseinzelheiten und die technologischen Bauverfahren für die geforderten Widerlagereigenschaften müssen standortbezogen fallweise entwickelt und in ihrer Wirksamkeit nachgewiesen werden.

Im Falle nicht ausreichender expansiver Eigenschaften des Baustoffs und/oder bei sehr ausgeprägtem Auftreten einer VWZ (wie z.B. unter den geologisch-mineralogischen Bedingungen am VO1) ist eine Injektion der KF unerlässlich.

Aussichtsreich für den Einsatz im Element EZ erscheint auch die Weiterentwicklung der Spritzbetontechnologie des im Verfahren in den Grundzügen entwickelten MgO-Beton-3-1-8 im Zusammenhang mit einer Denepox 40 – Injektion nach Entwicklung einer - gegenüber GV2 - verbesserten Injektionstechnologie.

- Die Langzeitsicherheit bzgl. der Dichtwirkung gewährleisten redundant und diversitär die Abschnitte „ED-Baustoff 1“ (7) und ED-Baustoff 2“ (9) sowie die Asphaltdichtung (8) des Hauptelementes ED. Da dieses Hauptelement erst nach der Zeit $t \geq t_{x,eff}$ im vollen Umfang wirksam werden muss, ist zu diesem Zeitpunkt die volle Einspannung durch das Gebirge gegeben, so dass die Lagesicherheit bei entsprechender Dimensionierung der Einzelabschnitte (7) und (9) des Hauptelements sowohl für diese Elemente als

auch für das Asphaltelement (8) sicher gewährleistet wird. Redundant wirken die Widerlager für die ED-Elemente (6) und (10) ebenfalls für die Gewährleistung der Lagestabilität. Die Dichtheit wird im Falle des Versagens des Elementes EZ nach $t \geq t_{x,eff}$ dadurch sicher gestellt, dass die im Gebirge zwischen den Widerlagern (6) und (10) eingespannten Abschnitte (7) und (9) vollständig durch das Gebirge belastet sind und die hydraulische Wirksamkeit der KF dadurch nicht mehr gegeben ist. Bei Lösungszutritt sind die Elemente (7) und (9) bei entsprechender Materialwahl entweder von vornherein dauerhaft chemisch und mechanisch stabil (im Falle von MgO 3-1-8) oder es entsteht durch die mit der beginnenden Phasenumwandlung (im Falle von MgO 5-1-8) verbundene Volumenvergrößerung ein ausschließlich frontaler Lösungsangriff auf dieses Element. Das bedeutet, dass dann kein Vorauseilen der Lösungsfront in der ALZ mehr stattfinden kann. Das Material MgO-5-1-8 selbst wandelt sich dabei schrittweise in das phasenstabile Material MgO-3-1-8 um. Die Redundanz und Diversität wird damit durch die verschiedenen Baumaterialien Baustoff 1 und Baustoff 2 und zusätzlich durch ein Asphaltelement der gleichen Art wie beim Element EZ gewährleistet.

- Das Element VZ (1) wirkt in diesem Prozess zusätzlich unterstützend und kann je nach den am Standort konkret gegebenen mineralogischen Verhältnissen und dem zu erwartenden Chemismus der angreifenden Lösungen gestaltet werden. Im Vorhaben wurden dazu die Elemente „3-Zonen-Element“ und „Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – weiche Ausführung“ entwickelt. Die Elemente können alternativ oder gemeinsam eingesetzt werden in Abhängigkeit von den konkreten Bedingungen am Einbauort.

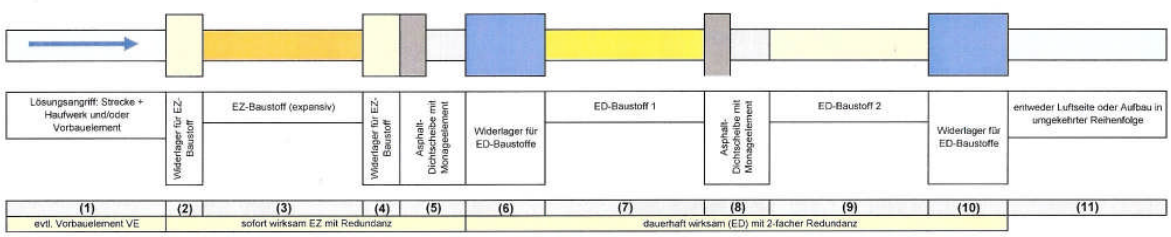

Abbildung 63: Prinzipieller stofflicher Aufbau eines Abdichtbauwerkes (stark schematisiert)

In Abbildung 64 ist das grob schematische Konzept der Abbildung 63 beispielhaft für eine mögliche und an die Bedingungen der Grube Teutschenthal angepasste Lösungsvariante stofflich ausgestaltet worden. Dabei nimmt das Element „Schotter mit Depot“ (Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – weiche Ausführung) zugleich Funktionen eines Vorbauelementes VE als auch eines Widerlagers für die Elemente Asphaltelement und EZ aus einem geeigneten Baustoff wahr. Einer der möglichen EZ-Baustoffe sowie als Porenraumfüllung in den Basaltschotter-Elementen könnte mit der MgO-Variante DBM2 [19] gegeben sein. Für diesen Baustoff konnte im Laborversuch und im mittelmaßstäblichen Versuch ein Abbindeverhalten bei Temperaturen unter 60°C und ein expansives Verhalten mit Radialspannungen $\underline{\geq}$ 2 MPa nachgewiesen werden [19]. Die Bestätigung dieses Verhaltens im Großversuch steht allerdings noch aus.

Als weiteres redundantes Vorbauelement VE wurde eine 3-Zonen-Vorschüttung nach dem Prinzip von TB 8.1 vorgesehen.

Die Asphaltelemente A1 und A2 lassen sich nach dem Muster des weiterentwickelten GV3 gestalten (TB 7) gestalten.

Die Funktion des Elementes ED wird in Abbildung 64 diversitär und redundant durch einen MgO/5-1-8 Ortbeton mit 2-K-Bitumen-Injektion (zentraler Teil des Elements ED), einen vor und nach diesem MgO/5-1-8 Ortbeton angeordneten MgO/5-1-8 Spritzbeton und einem

Asphaltelement, das dem im Element EZ entspricht, realisiert. Alle genannten Elemente der langzeitsicheren Hauptdichtung ED werden konservativ zur weiteren Erhöhung der Langzeitsicherheit in Widerlagerelemente, bestehend aus Hartgesteinsschotter mit MgO/3-1-8 Ortbeton-Porenraumverfüllung (alternativ mit Gelbaustoff-Porenraumfüllung – steife Variante) eingespannt. Dadurch wird der sehr unwahrscheinliche Fall einer eventuellen weiteren Phasenumwandlung unter Expansion und eventueller Veränderung der mechanischen Kompressibilität bei Lösungszutritt entgegengewirkt. Auch diese Widerlager haben ausschließlich Stabilitäts- keine Dichtungsfunktionen

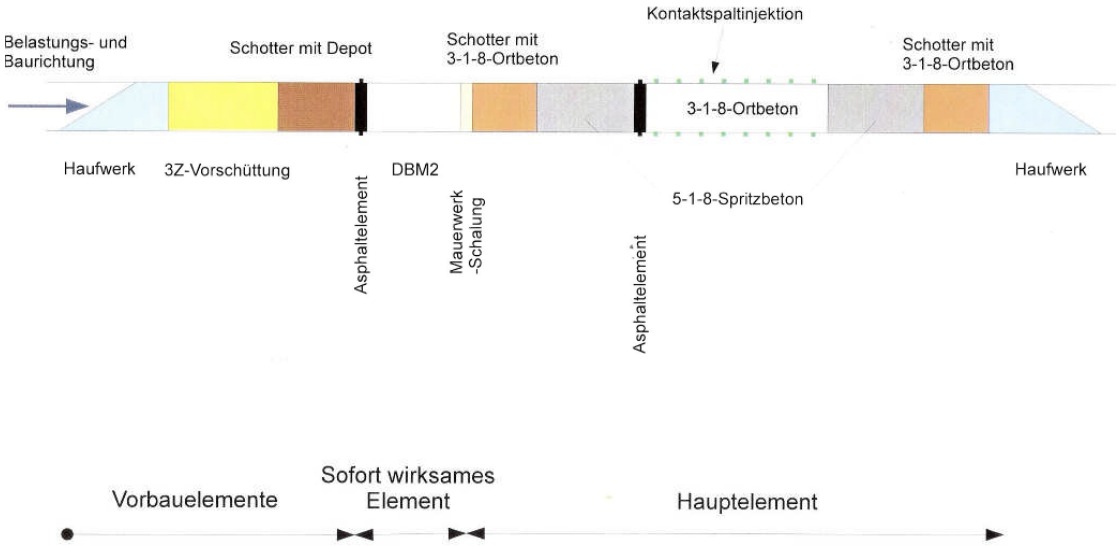

Abbildung 64: Abdichtbauwerk nach Abbildung 63 mit Lösungsvorschlägen

Diese Grundsatzlösungen lassen sich in Abhängigkeit von den konkreten lokalen geologischen, mineralogischen und gebirgsmechanischen Bedingungen ausgestalten und dimensionieren, wobei die hier konzipierte Lösung den besonders komplizierten geologisch-mineralogischen Bedingungen der Grube Teutschenthal Rechnung trägt.

10.2 Schlussfolgerungen zum Grundkonzept

Mit dem vorgeschlagenen Grundkonzept sollte gezeigt werden, dass mit den im Vorhaben erzielten Forschungsergebnissen der Nachweis erbracht werden konnte, dass auch im leichtlöslichen Carnallitit-Gebirge die Errichtung eines langzeitsicheren Abdichtbauwerkes in horizontalen Grubenbauen möglich ist. Das bezieht sich auf die Baumaterialien ebenso wie auf die Bedingungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (EWG) und gilt auch für die besonders komplizierte carnallitische Gebirgsausbildung (CaT), wie sie im Grubenfeld Teutschenthal vorliegt.

Unabhängig von diesem Resultat bedürfen bei der praktischen Umsetzung der Ergebnisse an konkreten Standorten noch zahlreiche Einzelfragen der technisch-technologischen Weiterbearbeitung, um die Grundsatzlösungen an die jeweils konkreten Standortbedingungen und Beanspruchungen optimal anzupassen.

Zugleich wird darauf hingewiesen, dass die Forschungsergebnisse einerseits die zeitnahe Errichtung von Abdichtbauwerken im Carnallitit (auch im Carnallitit der Grube Teutschenthal) bereits jetzt ermöglichen. Andererseits besteht jedoch in Einzelfragen noch weiterer Forschungsbedarf, um die Grundsatzlösung weiter optimieren und ggf. vereinfachen zu können. Einige Hinweise zur Vertiefung und Vervollkommnung der Forschungsergebnisse, die sich bei der Bearbeitung des Vorhabens ergeben haben, werden im Abschnitt 11 zusammengestellt.

11. Schlussfolgerungen aus dem Vorhaben und Ausblick

Bedingt durch den hohen Schwierigkeitsgrad und die Komplexität des vorliegenden FuEVorhabens konnten nicht alle Fragestellungen vollständig und endgültig gelöst werden. Weiterhin haben sich im Laufe der Bearbeitung neue Fragestellung ergeben, die zu Beginn des Vorhabens nicht ersichtlich waren. Folgende Themen sollten aus diesen Gründen an den bestehenden Versuchskörpern der GV1 und GV2 zukünftig weiter verfolgt werden:

- Verfolgung der weiteren Entwicklung des Kontaktdruckes in den Bauwerken der Großversuche GV1 und GV2
- Untersuchung der Korrelation zwischen Kontaktdruck und der Dichtheit des Gesamtsystems durch Aufgabe hydraulischer Drücke auf die Versuchkörper GV1 und GV2
- Weiterentwicklung der mechanisch-hydraulischen Modellierung des Verhaltens der Funktionselemente
- Weitere Nachuntersuchungen an den Versuchskörpern nach hydraulischer Belastung zur zusätzlichen Verifizierung der Ergebnisse
- Fortsetzung der Untersuchungen zur Langzeitstabilität und zum Mechanismus der Phasenumwandlungen von MgO-Baustoffen und deren hydraulischer und mechanischer Konsequenzen
- Weiterentwicklung der Injektionstechnik bei Verschlussbauwerken im Salinar

Diese Fragestellungen werden nachfolgend erläutert.

11.1 Weitere Entwicklung des Kontaktdruckes in den Bauwerken der Großversuche GV1 und GV2

Die Entwicklung des Kontaktdruckes zwischen einem Bauwerk aus MgO-Beton und dem umgebenden Gebirge ist in erster Linie von der Gebirgsdruckentwicklung bzw. der lokalen Gebirgskonvergenz abhängig. Aufgrund der hohen Kompressibilität (Steifigkeit) und der geringen Relaxation des MgO-Betons (insbesondere in der Phase 5-1-8) hat dessen Nachgiebigkeit bzw. dessen zeitabhängiges Verformungsverhalten nur einen sehr geringen Einfluss auf den Gesamtprozess der Radialdruckentwicklung. Somit wird die Kontaktdruckentwicklung vorrangig von den Eigenschaften des umliegenden Gebirges beeinflusst.

Im bisherigen Bearbeitungszeitraum sind Kontaktdrücke von 0,1 MPa (GV1) bzw. 0,2 MPa (GV2) erreicht worden. Diese Werte und deren zeitliche Zunahme sind geringer, als ursprünglich erwartet. Als Ursachen werden eine Einbettung der Druckkissen im MgO-Beton (bei GV1) und ein von bisherigen Stoffgesetzen für Carnallitit abweichendes Verformungsverhalten des konturnahen aufgelockerten und teilweise verwitterten Gebirgsbereiches (komplexe ALZ) vermutet.

Ein Defekt der Messgeber konnte ausgeschlossen werden, da in beiden Großversuchen die Kontaktdruckgeber die Änderungen des Luftdruckes in der Grube abbilden und auf die durchgeführten pneumatischen Vortests reagieren. Da alle Geber unabhängig von ihrer Lage im Bauwerk den gleichen Druckanstieg registrierten, kann geschlussfolgert werden, dass sich an der Luftseite des Bauwerks der Teil der verwitterten Zone (VWZ) mit der geringsten Durchlässigkeit befindet (Drossel).

Neuere Modellrechnungen des IfG Leipzig prognostizieren, dass erst nach ca. 50 Jahren die Radialspannungen in allen Sorelbetonelementen des Bauwerkes einen Wert von 8 MPa erreichen oder übersteigen.

Eine Kalibrierung des Modells an den Messwerten zur Kontaktdruckentwicklung ist bei den noch sehr niedrigen Werten nicht möglich. Um weiterführende Modell- und Parameteranpassungen vornehmen zu können sind Messwerte zur Kontaktdruckentwicklung über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren erforderlich. Es wird

erwartet, dass in diesem Zeitraum signifikante Änderungen der Messwerte auftreten werden. Durch eine Kompaktion der konturnahen verwitterten Zone (VWZ) wird deren Steifigkeit schrittweise erhöht, wodurch sich der Kontaktdruckanstieg beschleunigen wird.

Die Weiterführung der Messungen zur Kontaktdruckentwicklung in den Bauwerken der Großversuche GV1 und GV2 ist eine wichtige Voraussetzung für die bessere Beschreibung des zeitabhängigen Verformungsverhaltens des Carnallitits unter Berücksichtigung des konturnahen Gebirgsbereiches im Umfeld zukünftiger Verschlussbauwerke.

Die Entscheidung über den Zeitpunkt und den Betrag einer Flüssigkeitsdruckbelastung erfolgt in Abhängigkeit vom Kontaktdruckaufbau, unter Berücksichtigung der erreichten integralen Gaspermeabilität des Gesamtsystems. Die Flüssigkeitsdruckbelastung dient der Bestätigung der in den pneumatischen Vortests gemessenen integralen Permeabilität. Allerdings ist eine Flüssigkeitsruckbelastung erst sinnvoll, wenn die Voraussetzung des Dichtheitskriteriums (Fluidkriterium) erfüllt sind.

Ohne den Ergebnissen der zukünftigen Messungen der integralen Gaspermeabilität vorzugreifen, wird von den beiden Großversuchen GV1 und GV2 dem Versuch GV2 hinsichtlich einer Flüssigkeitsdruckbelastung der Vorrang gegeben, da hier die Erfolgsaussichten höher sind (geringere integrale Permeabilität von $2 \cdot 10^{-16}$ m² gegenüber dem Wert von $4 \cdot 10^{-11}$ m² für den GV1 innerhalb der Vorhabenslaufzeit) und da die Bauausführung in Spritzbetonbauweise als Vorzugsvariante ausgewählt wurde.

11.2 Korrelation zwischen Kontaktdruck und der Dichtheit des Gesamtsystems

In Kombination mit der im Abschnitt 11.1 beschriebenen Fortsetzung der Kontaktdruckmessung soll beim Bauwerk GV2 periodisch eine Bestimmung der Permeabilität des Gesamtsystems durch pneumatische Tests vorgenommen werden. Diese Messungen ermöglichen eine Korrelation zwischen dem gemessenen Kontaktdruck und der gemessenen integralen Permeabilität des Gesamtsystems.

Es wird erwartet, dass sich mit der Zeit der Kontaktdruck erhöht. Ein signifikanter Anstieg wird in dem Moment erwartet, wenn die Porosität der konturnahen Verwitterungszone (VWZ) entsprechend verringert wird. Es wird eingeschätzt, dass eine deutliche Permeabilitätsverringerung eintritt, wenn der Kontaktdruck einen Wert von ca. 3 MPa erreicht.

Die Methode der Bestimmung der Durchlässigkeit des Gesamtsystems durch die Messung der integralen Gaspermeabilität (pneumatische Vortests) ist bereits erfolgreich praktiziert worden. Insbesondere beim GV2 konnte eine Verbesserung der Dichtheit des Bauwerkes durch die Injektionsmaßnahmen nachgewiesen werden. Im Mai 2009 wurde eine integrale Gaspermeabilität des Gesamtsystems von $2 \cdot 10^{-16}$ m² gemessen. Es wurde gezeigt, dass die Permeabilität des Gesamtsystems hauptsächlich durch die Permeabilität des konturnahen Gebirges (ALZ – VWZ) bestimmt wird. Eine Verringerung der Permeabilität des konturnahen Gebirges führt somit zu einer messbaren Verringerung der integralen Permeabilität des Gesamtsytems. Für die Permeabilitätsmessungen sollen sowohl instationäre Verfahren (Pulstest) als auch quasistationäre Verfahren (Messung des Volumenstromes bei konstantem Druck) eingesetzt werden.

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass nachfolgende Messungen problemlos durchgeführt werden können, ohne dass dabei eine Beeinflussung des Bauwerkes oder des Gebirges erfolgt. Die Fortsetzung der Kontaktdruckmessungen nach Abschnitt 11.1 ermöglicht nach entsprechenden Änderungen des Kontaktdruckes mit entsprechender Standzeit des Bauwerkes und den nachfolgend durchgeführten pneumatischen Dichtheitsprüfungen eine Korrelation zwischen dem Kontaktdruck und der Permeabilität des Bauwerkes bzw. des konturnahen Gebirges herzustellen.

11.3 Mechanisch-hydraulische Modellierung

Die Durchführung der im Abschnitt 11.2 beschriebenen Untersuchungen ermöglicht eine Fortschreibung der Modellvorstellungen zum Carnallitit, insbesondere die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität unter Berücksichtigung ihrer zeitlichen Entwicklung. Dadurch ist es möglich, mechanisch-hydraulisch gekoppelte Prozesse zu beschreiben.

Eine Kalibrierung bzw. Validierung der Modelle ist mit den in situ ermittelten Daten aus der Grube Teutschenthal möglich.

11.4 Nachuntersuchungen

Neben den bereits durchgeführten Untersuchungen an den Bauwerken GV1 und GV2 können optional weitere Nachuntersuchungen am MgO-Beton und an dem durch die Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung beeinflussten Gebirgsbereich durchgeführt werden. Der Umfang der Untersuchungen hängt von den Ergebnisse der Flüssigkeitsdruckbeaufschlagung und der dabei gemachten Beobachtungen und Messergebnissen ab. Der Umfang dieser Nachuntersuchungen kann somit noch nicht quantifiziert werden.

11.5 Langzeitstabilität von MgO-Baustoffen

Nach Abschluss der Arbeiten im Projekt "CARLA" verbleiben noch folgende offene Fragen zur Langzeitstabilität, die in künftigen vertieften Forschungsarbeiten geklärt werden müssen:

- Phasenbildung im Grundsystem MgO-$MgCl_2$-H_2O bei erhöhten Temperaturen,
- Einfluss von Sulfat und Calcium auf die Sorelphasenbildung,
- Entwicklung von Rezepturen für langzeitstabile 3-1-8-Baustoffe mit hoher Festigkeit,
- Expansionsdruck von Sorelphasen und Schlussfolgerungen für die Langzeitstabilität von Baustoffen mit der 5-1-8-Bindemittelphase.

Es liegen erste Erkenntnisse vor, dass für die Bildung der chemisch langzeitstabilen 3-1-8-Phase die Abbindetemperatur und der Temperaturverlauf nach dem Erstarrungsbeginn sowie eine nachfolgende Reifezeit für die Phasenbildung und Gefügeentwicklung maßgebend sind. Diese Gefügeentwicklung hat wiederum Einfluss auf die mechanische Stabilität in Gegenwart von zutretenden Lösungen. In diesem Zusammenhang soll das bisher diskutierte Problem der mechanischen Instabilität relevanter Bausstoffproben in Gegenwart von Lösung abschließend geklärt werden.

Dabei sollte untersucht werden, ob durch diese Gefügeentwicklung das Verformungsverhalten der 3-1-8-Bindemittelphase so verändert werden können (niedrige Kriechraten, hohe Steifigkeit, geringes Relaxationsverhalten), dass der Baustoff die Anforderungen als Widerlagermaterial erfüllt.

12. Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] Breidung, K.-P. et al.: Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. Abschlussbericht zum Vorhaben FZK 02 C 0516. K+S, Bad Salzdetfurth, August 2002.

[2] Bundesamt für Strahlenschutz: Planungsstudie für einen in situ Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton; Salzgitter, 31.12.2007 (unveröffentlicht)

[3] Döhner, Ch.; Seifert, G; Landsmann, O.: Neubearbeitung des Langzeitsicherheits-nachweises Grube Teutschenthal. Kali-Umwelttechnik GmbH Sondershausen, 29.06.1999.

[4] Eberth, S.; Müller-Hoeppe, N.: Übertragung des Sicherheitsnachweiskonzeptes für ein Endlager im Salz auf andere Wirtsgesteine (ÜBERSICHT). Abschlussbericht zum Vorhaben FZK 02 E 9521. DBE TECHNOLOGY GmbH - TEC-30-2008-AB. Peine, Dezember 2009.

[5] Eckart, D.; Klemm, Th.: Grundsätze für die Verwahrung von Tagesschächten im Steinkohlenbergbau; Neue Bergbautechnik, 5. Jhg. H.9 Spt. 1975, S. 677-681

[6] Freese, C,; Voigt, H.-D.: 1-2007. Messung - Auswertung Permeabilitäts- u. Porositätsmessungen an Kernproben aus Spritzbeton. Laborbericht. Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau. 20.9.2007.

[7] Freyer, D.; Voigt, W.: Zur Problematik des MgO-Betons. GDCh-Monographie, Bd. 37 (2007) S. 175 – 182.

[8] Freyer, D.; Voigt, W.: Anforderungen an Baustoffe im Salinar: Bindemittelphasen des MgO-Baustoffs für den Einsatz im Kalisalz. Tagung Bauchemie, Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen. Freiberg, 8.-9. Oktober 2009. GDCh-Monographie, Bd. 41 (2009) S. 67 – 72.

[9] Freyer, D.; Voigt, W.; Böttge, V.: Zur thermischen Stabilität von Tachhydrit und Carnallit. Kali und Steinsalz (2006) 1, 28 – 37.

[10] Friedrich, W., Schlötzer, C.: Injektion von Abdichtungssegmenten mit Feinstzementsupensionen; IGH Hannover 06.05.2010 (i.A. BfS; unveröffentlicht)

[11] Glaubach, U.; Gruner, M.; Hofmann, M.: Material zur Verbesserung der Dichtwirkung einer Bitumen- oder Asphaltdichtung im Salzgestein. Offenlegungsschrift DE102008050211 A1 - Anmeldung der TU Bergakademie Freiberg vom 2.10.2008

[12] Glaubach, U.; Gruner, M.; Kudla, W.: Formstabile Blöcke zum Abdichten von Strecken im Salzgestein sowie Einbauverfahren hierfür. Patentschrift DE 10 2006 059 478 B3, veröffentlicht 21.2.2008.

[13] Kahle, K., Krauke, W. Lack, D.: Sanierung der Bergschadenssituation an der Südflanke des Staßfurter Sattels – Pilotvorhaben zur Entwicklung eines Verfahrens zur Stabilisierung eines durch den Salzbergbau beeinflussten Untergrundes der Stadt Staßfurt. Zwischenbericht Arbeitspaket 2, Forschungsvorhaben Deutsche Bundesstiftung Umwelt AZ 07378, Sondershausen, 1996

[14] Kahle, K.; Thoma, H.; Seifert, G.: Sanierung der Bergschadenssituation an der Südflanke des Staßfurter Sattels – Pilotvorhaben zur Entwicklung eines Verfahrens zur Stabilisierung eines durch den Salzbergbau beeinflussten Untergrundes der Stadt Staßfurt. Abschlussbericht – Geotechnischer in-situ-Versuch zur Verwahrung der Schachtröhre Friedrichshall II, Forschungsvorhaben Deutsche Bundesstiftung

Umwelt AZ 07378, Sondershausen, 1999

[15] Kaledin, O: Abdichtung und Verfestigung der konturnahen Auflockerungszone beim Errichten von Verschlussbauwerken im Carnallititgestein unter Verwendung von Kunststoffinjektionen. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, 2008.

[16] Kawka, A., Gruner, M., Sitz, P., Knoll, P.: Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers. Patentschrift DE 10 2005 009 036 B3, veröffentlicht 16.03.2006.

[17] Knoll, P. et al.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV. Abschlussbericht zum Vorhaben FZK 02 C 0942. GTS Teutschenthal, März 2005.

[18] Knoll, P. et al.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallitit) für UTD/UTV (Projekt "CARLA“). Bericht zum 1. Meilenstein (Vorhaben FZK 02 C 1204). GTS Teutschenthal, Oktober 2006.

[19] Krauke, W.; Fliss, Th.: Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton; BfS / K-UTEC, Sondershausen, 2008; http://www.bfs.de.de.endlager/morsleben

[20] Krauke, W.; Lindenau, A.; Lack, D.: Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar – Hauptprojekt. Schlussbericht 02C1214. K-UTEC Sondershausen, 7.3.2008.

[21] Kudla, W.; Dahlhaus, F.; Glaubach, U.; Gruner, M.; Haucke, J.: Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben, BMBF-FKZ 02C1124. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau der TU Bergakademie Freiberg, Juli 2009.

[22] Kudla, W.; Glaubach, U.; Gruner, M.: Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke mit Schwerpunkt Asphalt. Fachgespräch "Verschlusssysteme für untertägige Entsorgungseinrichtungen“, Freiberg, 20. - 21. Oktober 2009 - Materialienband -, PTKA-WTE, Projektträger Karlsruhe im Karlsruher Institut für Technologie Wassertechnologie und Entsorgung. S. 3 – 26.

[23] Kudla, W.; Gruner, M.; Voigt, W.; Finder, M.: Magnesiabeton bei der Errichtung von geotechnischen Verschlussbauwerken für Untertagedeponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgestein. Tagung Bauchemie, Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen. Freiberg, 8.-9. Oktober 2009. GDCh-Monographie, Bd. 41, S. 59 – 66.

[24] Krakau, U.; Sitz, P.; Wetzel, D.: Verfahren zur Herstellung einer versiegelten Oberfläche auf Carnallititgesteinen. Patentschrift DD2985893, veröff. 14.11.1991. TU Bergakademie Freiberg

[25] Minkley, W. et al.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss; IfG Leipzig GmbH, 2010

[26] Minkley, W. u.a.: Bewertung der Langzeitsicherheit Grube Teutschenthal der GTS GmbH & Co. KG unter Berücksichtigung des Gebirgsschlages vom 11.09.1996; Leipzig 25.02.1998 (unveröffentlicht)

[27] Minkley, W.: Gebirgsmechanische Beschreibung von Entfestigung und

Sprödbrucherscheinungen im Carnallitit. Habilitationschrift, TU Bergakademie Freiberg, 2003.

[28] Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld: Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten; Verfügung vom 14.07.1989-0.3.-I/89-B II f.5.2.I und L e i t f a d e n der Bezirksregierung Arnsberg, Abt. Bergbau und Energie in NRW, für as Verwahren von Tagesschächten vom 05.12.2007 - 86.18.13.1-8-35 –

[29] Popp, T., K. Salzer, K., Wiedemann, M., Wilsnack, T., & Voigt, H.-D., 2007. Petrophysical and rock-mechanical characterisation of the excavation-disturbed zone in tachyhydrit-bearing carnallitic salt rocks. In K.-H. Lux, W. Minkley, M. Wallner, & H.R. Hardy, Jr. (eds.), Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Sixth Conf. on the Mech. Behavior of Salt. Hannover 2007. Lisse: Francis & Taylor (Balkema). 53 – 62.

[30] Popp, T., Salzer, K., Weise, D. & Wiedemann, M. 2010. Hydraulische Barrierenintegrität von carnallititischem Salzgebirge, Kali und Steinsalz, Heft 2/2010, 16 – 23.

[31] Priestel, U.; Gruner, M.; Kudla, W.: Entwicklung und Einsatz von MgO-Beton als Spritzbeton für die Errichtung von langzeitstabilen Verschlussbauwerken im leichtlöslichen Salzgestein. Tagung Bauchemie, Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen. Freiberg, 8.-9. Oktober 2009. GDCh-Monographie, Bd. 41, S. 73 – 80.

[32] Schmidt-Döhl, F.: Dauerhaftigkeitsprognose von Salzbeton im Kontakt mit salinaren Lösungen. Tagung Bauchemie, Energie und Nachhaltigkeit im Bauwesen. Freiberg, 8.-9. Oktober 2009. GDCh-Monographie, Bd. 41 (2009) S. 81 – 88.

[33] Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Stand: 30.09.2010

[34] Sitz, P.; Gruner, M.; Knoll, P.: Streckenverschlüsse im Carnallitit. Kali und Steinsalz (2005) Nr. 2, S. 16 – 25.

[35] Voigt, H.-D.; Kawka, A.: Permeabilitätsverhalten von carnallitischem Salzgebirge gegenüber hochkonzentrierten Lösungen. Kali und Steinsalz (2008) 2, 22 – 27.

13. Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Typischer Aufschluss des Hangenden Lagerteils des Kaliflözes Staßfurt in der Grube Teutschenthal (Detailaufnahmen: links: grobkristalliner bis spätiger Tachyhydrit, rechts Tachyhydritnester mit Kieserit – weiß) [17] 14

Abbildung 2: Synthese der Untersuchungsergebnisse zur Bestimmung der Ausdehnung der ALZ im Stoss anhand der teufenabhängigen Variation verschiedener Messverfahren und in situ Beobachtungen, ermittelt mit Hilfe der Muliti-Methoden-Erkundungsstrategie (MMES) [17]. 19

Abbildung 3: 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 [17] 20

Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau eines langzeitsicheren Streckenverschlusses im leichtlöslichen Salzgebirge (vorläufiger Vorschlag im Ergebnis des Teil 1 des Vorhabens) [17] 23

Abbildung 5: **T**emperatur- und feuchteabhängige Existenzgebiete von Tachyhydrit und Carnallit (TB 9.2) 30

Abbildung 6: Spätig bis klastenartig ausgebildeter Tachyhydrit in den Bereichen der Schicht 7a (rechtes Bild) und in der Schicht 6 Varietät A (Bild Mitte und links), die Kernaufnahmen zeigen einen Grenzbereich zu einer aufgelösten Steinsalzbank im Bereich der Schicht 8 (links) und spätig ausgebildeten Tachyhydrit aus dem hangenden Lagerteil (rechts) 32

Abbildung 7: Bestimmung der Festigkeitsparameter nach dem Stoffmodell von Minkley [27] 33

Abbildung 8: Bestimmung der Dilatanzparameter nach dem Stoffmodell von Minkley [27] 33

Abbildung 9: Festigkeit verschiedener Carnallititproben aus der Grube Teutschenthal 34

Abbildung 10: Messwerte zur räumlichen Permeabilitätsverteilung am Ort des Großversuches GV2 (VO3) und Streuung von Messwerten im konturnahen Bereich für eine Vielzahl von Einzelmessungen (rechts) 35

Abbildung 11: Synthese aus In-situ- und Labormessungen zur Ausdehnung der VWZ. Links: Untersuchte Kernproben mit poröser VWZ. Rechts: Abhängigkeit der Permeabilität vom Konturabstand. 36

Abbildung 12: Auswertung der Messungen im Bohrloch MB1 in zwei Prüfabschnitten (aus [29, 30]). 37

Abbildung 13: Auswertung der gemessenen Druckabfallkurven im Bohrloch MB2 (aus [29, 30]) 38

Abbildung 14: Reichweite der hydraulischen Konturzone im leicht löslichen Salzgebirge auf Basis eines interdisziplinären geotechnischen Multi-Methoden-Erkundungsprogramms [29, 30]; (s.a. Abbildung 2). 39

Abbildung 15: Wärmekapazität von MB10 in Abhängigkeit von der Temperatur 44

Abbildung 16: Wärmeleitfähigkeit von MB10 in Abhängigkeit von der Temperatur 44

Abbildung 17: Ausbreitmaß in Abhängigkeit vom Zuschlaganteil bei einem Masseverhältnis R-Lösung/MgO = 1 46

Abbildung 18: Materialparameter am Spritzbetonkörper OFP8 (auf Basis von Bohrkernen) 47

Abbildung 19: Einfluss des Massenanteils des Keimbildners auf die Viskosität 50

Abbildung 20: Ergebnisse von Triaxialversuchen unterschiedlicher MgO-Betone: Vergleich zwischenMgO-Beton mit 5-1-8- und 3-1-8-Bindemittelphasen 54

Abbildung 21: Verformungsverhalten des bei 80 °C abgebundenen 3-1-8-MgO-Ortbetons bei unterschiedlicher Dauer der Wärmebehandlung (24 h, 48 h, 120 h) und bei einer Belastungsrate von 0,1 MPa/s 54

Abbildung 22: Asphaltdichtelement im Einbauzustand - Versuch GLAU-2 57

Abbildung 23: Asphaltdichtelement nach dem Monolithisieren - Versuch GLAU-2 57

Abbildung 24: Aufbau Versuch GLAU-9 57

Abbildung 25: Aufbau Versuch GLAU-10 57

Abbildung 26: Injektion von 2K-Injektionsbitumen im konturnahen Gebirge (nachträglich erbohrte Kerne aus der KF; oben Salzgestein, unten MgO-Beton) 60

Abbildung 27: Schematischer Versuchsaufbau der Injektionsversuche in Bohrungen 65

Abbildung 28: Schematischer Versuchsaufbau für Bohrlochpackertests im MgO-Beton (TB 4.2) 66

Abbildung 29: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung des Kontaktbereiches am Oberflächenpacker aus MgO-Spritzbeton 68

Abbildung 30: Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Kontaktfuge am GV1 68

Abbildung 31: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV1 72

Abbildung 32: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV2 73

Abbildung 33: Prinzipieller Aufbau des Großversuches GV3; blau: Druckkammer (Korundsteine), schwarz: Asphaltelement, grau: MgO-Beton, rot: Druckkissen (beheizbar) 74

Abbildung 34: Lage und Anordnung der in situ Großversuche GV1, GV2 und GV3 im Versuchsort VO3 (Grundriss) 75

Abbildung 35: Schematische Darstellung eines Vertikalschnittes durch den Bauwerkskörper des GV1, einschließlich der Druckkammer in Längsrichtung 76

Abbildung 36: Temperaturmesswerte im 12. Betonierabschnitt 76

Abbildung 37: Markscheiderisches Aufmaß des Gebirgsausbruchs für den GV2 vor dem Einbau des Spritzbetonkörpers 78

Abbildung 38: Ergebnisse Temperaturmessung vom 18.02.2008 bei einer Bauwerkslänge von 1,64 bis 1,83m 79

Abbildung 39: Fertiggestellter Gebirgsschlitz (links) und in den Gebirgsschlitz eingelegter Asphalt-Baustein (rechts) 80

Abbildung 40: Einbau der Asphaltsteine in den vorbereiteten Versuchshohlraum (links) und fertig gestellte Asphaltmauerung vor dem Einbau des Druckkissens (rechts). 81

Abbildung 41: Aufbau des GV3 81

Abbildung 42: Teil eines Streckenverschlusses mit einer Ringdichtung aus Asphalt in Kombination mit einer Innendichtung aus einem Bitumenanstrich (Längsschnitt) [35] 84

Abbildung 43: Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Spritzbetonkästen des GV2 (Mittelwert 37 MPa) in Abhängigkeit vom Betonalter 85

Abbildung 44: Kompaktionsverhalten von Spritzbeton im Vergleich zu Ortbeton 86

Abbildung 45: Permeabilitätsentwicklung für den Großversuch GV2 88

Abbildung 46: Massenverhältnis R-Lösung / MgO bei jeder Spritzbetonlage beim Großversuch GV2 90

Abbildung 47: Abhängigkeit der maximalen Konturtemperatur und des Ausbreitmaßes vom Verhältnis Masse Zuschlag /Masse MgO [23] 91

Abbildung: 48: Schematischer Aufbau und Zusammensetzung des Vorbauelements Schüttung..... 92

Abbildung 49: Schematische Darstellung der Anordnung der Bohrlochversuche und der Geoelektrik-Profile 93

Abbildung 50: Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – weiche Ausführung 100

Abbildung 51: Vorbaumodul aus Gelbaustoff mit Tachyhydritdepot – steife Ausführung 101

Abbildung 52: Modellierung GV1 mit abgeminderter Steifigkeit in der ALZ: Einfluss einer verringerten Steifigkeit der ALZ im GV1 105

Abbildung 53: Modellierung GV2 mit abgeminderter Steifigkeit in der ALZ: Radialspannungen im Randbereich des Dammkörpers..... 106

Abbildung 54: GV2, 3D-Modell und Berechnungsablauf (s. Teilbericht AP6, Anlage 8-3) 106

Abbildung 55: Fälle b (ohne Verringerung des Kompressionsmoduls der VWZ), b-K10 und b-K100 (Abminderungen des Kompressionsmoduls auf 10 bzw. 100 MPa), Messquerschnitt ME1 (s. TB 6, Anlage 8-20) 107

Abbildung 56: effektive Spannungen in Achsrichtung am Ende des 5. BZ, Druckbeaufschlagung 8 MPa (TB 6, Anlage 5-11) 109

Abbildung 57: Zeitliche Modellierung der Druckbelastung im GV3-Modell (TB 6, Anlage 6-8) 110

Abbildung 58: Modellaufbau 1.000a (Teilbericht AP6, Anlage 9-1) 112

Abbildung 59: Radialspannungen 1.000a (TB 6, Anlage 9-2) 113

Abbildung 60: Radialspannungsentwicklung an der Kontaktfläche (TB 6, Anlage 9-3) 113

Abbildung 61: Normalspannungen auf der Kontaktfläche (Teilbericht AP6, Anlage 9-4) 114

Abbildung 62: Normalspannungen auf der Kontaktfläche 1.000a (TB 6, Anlage 9-5) 114

Abbildung 63: Prinzipieller stofflicher Aufbau eines Abdichtbauwerkes (stark schematisiert) 129

Abbildung 64: Abdichtbauwerk nach Abbildung 63 mit Lösungsvorschlägen 130

14. Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:
Lokale lithologische Schichtengliederung am Versuchsort VO3 der Grube Teutschenthal *29*

Tabelle 2:
Verwitterung des Carnallitits *30*

Tabelle 3:
MgO-Beton mit 5-1-8-Rezepturansatz (MB10) *43*

Tabelle 4:
MgO-Beton mit 3-1-8-Rezepturansatz und Microsilika bzw. Keimbildner *51*

Tabelle 5:
Zusammenfassende Versuchergebnisse zu den Injektionsmitteln *62*

Tabelle 6:
Zusammenfassende Versuchergebnisse zu den Injektionsmitteln *71*

Tabelle 7:
MOHR-COULOMB-Festigkeitsparameter der Trennfläche zwischen MgO-Beton und Gebirge im Vergleich mit dessen Festigkeitsparametern *86*

Tabelle 8:
Rezeptur St-MB-GV2 für MgO-Spritzbeton (Trockenspritzverfahren) *91*

Tabelle 9:
Dimensionierung des Materials im Vorbauelement auf 3m Streckenquerschnitt *95*

15. Glossar und Abkürzungsverzeichnis

2K-Bitumen: Kurzbezeichnung für ein Zwei-Komponenten-Injektionsbitumen, das unter Umgebungstemperatur verarbeitet werden kann. Komponente 1 besteht aus aufgemahlenem Hartbitumen, Komponente 2 ist ein flüssiger entaromatisierter Kohlenwasserstoff.

ALZ, "Auflockerungszone", engl. EDZ, ihre Entstehung ist geomechanisch (durch Dilatation bzw. Rissbildung) bedingt. Sie ist, zusammen mit der VWZ Bestandteil der hydraulisch wirksamen konturnahen Gebirgszone (ZAB, Abschnitt 3.4)

Anhydrit (an): Evaporitmineral ($CaSO_4$)

Bischofit (bi): $MgCl_2 * 6H_2O$

Carnallitit, hier auch: Ca,: Salzgestein mit überwiegendem Anteil am Mineral Carnallit-c ($KCl * MgCl_2 * 6H_2O$)

CaT: Carnallitit der Grube Teutschenthal

CP: Permeabilitätstest mit konstantem Druck (constant pressure test)

CR: Permeabilitätstest mit konstanter Rate (constant rate test)

Datenerfassungsanlage (DAQ): messtechnische Bezeichnung; hier für versuchstechnische Einrichtung zur zeitliche Datenerfassung (z. B. Druck, Temperatur, Volumenstrom) bei der Durchführung von strömungstechnischen Versuchen i.d.R. durch Datenloggersysteme

Denepox: Denepox-40, Epoxiharz des Herstellers De Neef

Druckquelle (DQ): versuchstechnische Einrichtung zur Druckbeaufschlagung (z. B. Druckgasbehälter, Pumpe, Druckspeicher, Medientrenner) bei der Durchführung von strömungstechnischen Versuchen

Druckregelanlage (DRA): anlagentechnische Bezeichnung; hier für eine versuchstechnische Einrichtung zur Druckregelung bei der Beaufschlagung von strömungstechnischen Versuchen i.d.R mit Gas oder mit Salzlösungen

ED: Langzeitsicheres Element des komplexen Abdichtungsbauwerkes

EdZ: Excavation disturbed Zone, auch hohlraumbeeinflusster Gebirgsbereich

EDZ: s. ALZ

effektive Permeabilität, auch effektive Phasenpermeabilität: Permeabilität, die den Einfluss mehrerer fluider Phasen im Porenraum berücksichtigt; sie wird beschrieben durch das Konzept der relativen Phasenpermeabilität laut Gleichung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**:

$$k_{rel\,i} = \frac{k_{eff,i}\,(S_i = x)}{k_{abs}}$$

$k_{rel,\,i}$	-	relative Permeabilität des Fluides i	[-]
$k_{eff,\,i}$	-	effektive Permeabilität des Fluides i	[m²]
k_{abs}	-	absolute Permeabilität	[m²]
S_i	-	volumetrische Sättigung des Porenraumes mit Fluid i	[-]
x	-	Wertebereich S_{Fluid} ($0 \le x \le 1$)	[-]

i - Zählindex der fluiden Phase im Porenraum [-]

EWG: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Einlagerungssystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt (in Anlehnung an: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Stand: 30.09.2010

EZ: Zeitlich begrenzt sicheres Element des komplexen Abdichtungsbauwerkes

Gips (gy): $CaSO_4 * 2 H_2O$

Grubenwetter: (s. Wetterfeuchte)

Grauer Salzton: Salzton ist ein empirisch eingebürgerter Terminus, der Tonhorizonte in Salzlagerstätten beschreibt. Der Graue Salzton (T3) besteht vorwiegend aus Quarz, Illit. Chlorit oder Kailonit und Magnesit (tonig-sandige Partie)

Großversuch (GV): großmaßstäblicher, untertägiger Versuch mit modularen Elementen eines Dammbauwerkes als Streckenverschluss, einschließlich Planung, Errichtung und Testung

Halbhydrat: $CaSO_4 * ½ H_2O$

Halit (h): auch: Na, Steinsalz (NaCl)

Hydraulischer Haupttest (HT): strömungstechnischer Test zur Ermittlung der integralen in situ-Permeabilität eines untertägigen Versuchsbauwerkes für Lösung, bei welchem eine Druckkammer mit Lösungsdruck beaufschlagt wird; kann je nach Permeabilitätsniveau als Impuls- bzw. als Test mit konstanten Druck durchgeführt werden; Vorteil: Möglichkeit der Beurteilung der Dichtheit des Bauwerkes gegenüber angreifenden Salzlösungen

Hydraulisch relevante Konturzone: auch komplexe ALZ: Überlagerung einer mechanisch bzw. Dilatanz-) bedingten Auflockerungszone (ALZ) und einer Verwitterungszone VWZ

Impulstest (IT): „engl. puls test“ strömungstechnischer Test zur Ermittlung der in situ-Permeabilität eines Testintervalls in Auswertung des Strömungsprozesses im Ergebnis eines kurzen Druckimpulses

integrale Permeabilität (Systempermeabilität, Bauwerkspermeabilität): Entspricht in diesem Bericht dem ingenieurtechnischer Parameter zur Beschreibung/Parametrisierung der strömungstechnischen Wirkung eines Verschlussbauwerkes aus unterschiedlichen Strömungsräumen (z.B. Bauwerk/Baustoff, Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge, Auflockerungszone im Gebirge, unverritztes Gebirge). Auf Grund der möglichen großen Flächenunterschiede der Strömungsräume sind deutliche Permeabilitätsunterschiede über mehrere Zehnerpotenzen möglich. Entsprechende große, lokale Schwankungen der Permeabilität können auch innerhalb der einzelnen Strömungsräume auftreten (z.B. Kontakt zwischen Baustoff und Gebirge). Eine Beurteilung der Strömungsprozesse in dem Bauwerk (Strömungsgeschwindigkeiten, Stofftransport, Erosion) erfordert daher immer die Kenntnis der Permeabilitäten in den einzelnen Strömungsräumen.

IT: Impulstest

IP19 Lösung am Punkt R bei $CaSO_4$-Sättigung

IP21 Lösung am Punkt Q bei $CaSO_4$-Sättigung

KAB: Konturabstand

Kainit (ka): Salzmineral ($4KCl * 4MgSO_4 * 11H_2O$)

KF, Kontaktfläche: Inhomogenitätsfläche zwischen den Bauteilen des Dammbauwerkes und dem anstehenden Gebirge

Kieserit, ks, ($MgSO_4 * H_2O$)

Kontaktbereich (KB): Bereich der Materialanbindung zwischen Bauwerk und Gebirge

Konturabstand (KAB): Abstand von der Konturfläche entlang ihrer Flächennormale

KV1: sogen. „Kleinversuch 1“: Mittelmaßstäblicher in situ Versuch zur Funktionsuntersuchung verschiedener Einzelverfahren, z.B., der TDR-Feuchtesensoren, von Injektionsmaßnahmen unter Anwendung von Manschettenrohren. Dazu wurde eine ca. 1 m³ großer Hohlraum in der Begleitstrecke des VO3genutzt, der bei der Gewinnung ungestörter Carnallitit-Proben entstanden ist.

Lösungen:
$CaCl_2$-$MgCl_2$-Lösung: Gegenüber Tachyhydrit sowie Carnallit und NaCl gesättigte Salzlösung (vereinfachte Schreibweise: Ca/Mg-Cl-Lösung),
Q-Lösung, Lösung mit einer Mineralzusammensetzung, die dem Punkt Q im Diagramm 1, S.3, [17], 1 entspricht; Sättigung an: Halit, Sylvin, Kainit, Carnallit; Lösungskonzentrationen in Tab. 3, S.20 dieses Berichtes
R-Lösung, Lösung mit einer Mineralzusammensetzung, die dem Punkt R im Diagramm 1 S.3, [17], 1 entspricht; Sättigung an: Halit, Kieserit, Kainit, Carnallit Lösungskonzentrationen in Tab. 4, S.21 dieses Berichtes

Messpunkt (MP): entspricht bezogen auf in situ-Permeabilitätstests einem Testintervall mit unterschiedlicher Länge

MMES, Multimethodenverfahrensweise zur Untersuchung und Quantifizierung der hydraulisch wirksamen konturnahen Gebirgszone

n.b.: Wert wurde nicht bestimmt

Neue Wetterstrecke: Verbindungsstrecke zur Wetterführung zwischen dem GF TEU und dem GF ANG im Leine Steinsalz, oberhalb des Bruchfeldes des Gebirgsschlages vom 11.09.1996

Oberflächenpacker (OFP): versuchstechnische Einrichtung zur Durchführung von strömungstechnischen in situ-Versuchen; hier Materialoberflächenpacker mit der Zielstellung der Untersuchung der integralen Permeabilitätsverhältnisse zwischen Baustoff und Gebirge (Materialanbindung) bzw. deren Beeinflussung durch Vergütungsmaßnahmen

Packer: auch „Bohrlochpacker“; versuchstechnische Einrichtung zur Abtrennung von Bohrlochbereichen (Intervallen); hier u.a. auch zur Durchführung von strömungstechnischen in situ-Versuchen; verschiedene Konfigurationen möglich (1-, 2-, und 4-fach Packergarnituren mit Prüf- und Kontrollintervallen verschiedener Intervalllängen)

PaTe: Auswerteverfahren für Packertests

Permeabilität (absolute Permeabilität): Eigenschaft eines Materials, z. B. poröses Medium, Gestein, ein Strömungsfluid (Permeat) hindurchzuleiten; unabhängig von Eigenschaften der Strömungsfluides; Koeffizient der Permeabilität k entspricht Linearitätsfaktor, abgeleitet aus den Gesetzen von Hagen-Poiseuille (Hagen 1839, 1870) und Darcy (d'Arcy 1856) für laminare Strömung eines Newton'schen Fluides ohne Wechselwirkungen des Fluides mit dem Porenraum bei vollständiger Fluidsättigung

Permeabilität (integral wirksame P. des Gebirges): In großen Messvolumina (lange Bohrlöcher) im praktisch unverritzten Gebirge mit Salzlösung über lange Messzeiten (mehrere Monate) gemessene Durchlässigkeit des Gebirgsverbandes. Diese Messgröße kann neben der physikalisch definierten Permeabilität auch andere Effekte (z.B. Mehrphaseneffekte, chemische Reaktionen zwischen Messfluid und Gebirge) enthalten.

Permeabilitätstest mit konstantem Druck (CP): „engl. constant pressure test" strömungstechnischer Test zur Ermittlung der in situ-Permeabilität eines Testintervalls in Auswertung des Strömungsprozesses bei konstantem Druck

Permeabilitätstest mit konstanter Rate (CR): „engl. constant rate test" strömungstechnischer Test zur Ermittlung der in situ-Permeabilität eines Testintervalls in Auswertung des Strömungsprozesses bei konstanter Rate

Pneumatischer Vortest (PV): strömungstechnischer Test zur Ermittlung der integralen in situ-Permeabilität eines untertägigen Versuchsbauwerkes, bei welchem eine Druckkammer mit Gasdruck beaufschlagt wird; kann je nach Permeabilitätsniveau als Impuls- bzw. als Test mit konstanten Druck durchgeführt werden; Vorteil: Möglichkeit der Beurteilung des Erfolges von Vergütungsmaßnahmen

Polyhalit (po): $K_2SO_4 * MgSO_4 * 2CaSO_4 * 2H_2O$

Porosität: beschreibt das Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen eines Materials, z. B. poröses Medium, Gestein; Einfluss auf die Dichte und Permeabilität eines Materials; Unterscheidung in totale, effektive und doppelte Porosität

Residuat: nach Auswaschung oder Zersetzung der Begleitmineralien verbleibende Rückstandmineralien in einem polymineralischen Salzgestein

strömungstechnisch relevantes Fernfeld: hier abweichend zur Definition im Endlagerbereich nicht Deckgebirge, sondern Hohlraum unbeeinflusster Bereich des Salzgebirges

strömungstechnisch relevantes Nahfeld: hier abweichend zur Definition im Endlagerbereich nicht durch Einlagerungsstoff direkt beeinflusster Salzgebirgsbereich, sondern durch den Hohlraum beeinflusster Bereich des Salzgebirges

Spätbank: Halitischer Leithorizont im Staßfurt-Kalilager der Grube Teutschenthal

Sylvin (sy): Salzmineral (KCl)

Tachyhydrit (ta), umgangssprachlich auch: Tachhydrit, $(CaCl_2 * 2MgCl_2 * 12H_2O)$

unverritztes Gebirge: als geologische Barriere wirksamer, nicht von Grubenbauen und bergbaulichen Spannungsumlagerungen beeinflusster (gestörter) Gebirgsbereich innerhalb des Wirtsgesteins, auch „Fernfeld" (Anlage 2; IBeWa, S.42)

UTD: Untertagedeponie

UTV: untertägiges Versatzbergwerk, bei dem Stoffe mit besonderer Überwachungspflicht und besonderem Langzeitsicherheitsanforderungen als Versatzmaterial zum Einsatz kommen

VE: Vorbauelement zur Konditionierung des Laugenangriffs

Versuchsorte: Orte im Grubengebäude der GTS, Feld Teutschenthal, an denen in situ Untersuchungen im Vorhaben durchgeführt wurden (Anlage 2, Text IBeWa, s.4-5)

Versuchsort 1 (VO1): oberer Lagerteil, 3a-Sohle, Maschinenstrecke, Grubenfeld Teutschenthal, nahe dem Grubenfeld Angerdorf. Durchführung der in situ-Versuche im Teil 1 des Vorhabens ([17] und Anlage 2)

Versuchsort 2A (VO2A): oberer Lagerteil, 2a-Sohle, Pfeiler zw. Kammern 206/208 Grubenfeld (Anlage 2)

Versuchsort 2B (VO2B): unterer Lagerteil, 3. Sohle, Pfeiler zw. Kammern 139/142 Grubenfeld Teutschenthal (Anlage 2)

Versuchsort 3 (VO3): Hauptversuchsort; mittlerer Lagerteil, 3a-Sohle Grubenfeld Teutschenthal, Standort der Großversuche GV1 bis GV3l (Anlage 2)

VWZ, Verwitterungszone, sie ist chemisch und durch lokale Lösungsvorgänge bedingt und ist typisch für den tachhydrit-/kieserithaltigen Carnallitit Ca-TEU. Sie ist, zusammen mit der ALZ Bestandteil der hydraulisch wirksamen konturnahen Gebirgszone

Wetterfeuchte (s.a. Grubenwetter)**:** Feuchtigkeitsgehalt der den Grubenbauen zugeführten Frischwetter (Grubenwetter) zur Belüftung