

Arbeitsgruppe Morsleben (AG Morsleben)

**Prüfbericht im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur  
Stilllegung des ERA Morsleben**

**Prüfkomplex  
„Verfüllen und Verschließen von Strecken“**

**Teil 1 – Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung**

**Auftraggeber:** Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt  
des Landes Sachsen-Anhalt  
Rahmenvertrag Reg.-Nr. 29/02/1998  
Einzelauftrag Reg.-Nr. 16/08/2008

**Auftragnehmer:** IHU Geologie und Analytik GmbH  
Dr.-Kurt-Schumacher-Straße 23  
39576 Stendal

Der Prüfbericht umfasst 102 Seiten

**Datum:** 26.04.2010

**Unterschrift:** .....  
(Dr. U. Stahl)

Die Stellungnahme wurde im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) erstellt. Das MLU behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des MLU zitiert, vervielfältigt oder Dritten zugänglich gemacht werden. Der Bericht gibt die Meinung und Ansicht der Verfasser wider, diese muss nicht in jedem Falle mit der Meinung des MLU übereinstimmen.

**Erklärung:**

Die Unterzeichnenden versichern, die Stellungnahme unparteiisch und nach bestem Wissen und Gewissen frei von Ergebnisanweisungen erstellt zu haben.

**Datum:** April 2010

**Unterschrift:**

.....  
(Dr. rer. nat. U. Stahl)

Mitglieder der Arbeitsgruppe Morsleben:

IHU Geologie und Analytik  
Gesellschaft für Ingenieur-, Hydro- und Umweltgeologie mbH  
Dr.-Kurt-Schumacher-Straße 23  
39576 Stendal

TU Clausthal  
Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik  
Erzstraße 20  
38678 Clausthal-Zellerfeld

GTU Ingenieurbüro Prof. Dr. Knoll  
Berliner Straße 70  
14467 Potsdam

Unterauftragnehmer:

Brenk Systemplanung  
Heider-Hof-Weg 23  
52080 Aachen

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1</b>	<b>Veranlassung und Gegenstand der Berichterstattung</b> <b>4</b>
<b>2</b>	<b>Grundsätzlicher Sachstand und Methodik der Prüfung</b> <b>7</b>
<b>3</b>	<b>Konzeption der Unterlagen zum Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“</b> <b>13</b>
3.1	Angaben des Antragstellers 13
3.2	Bewertung der Verschlusskonzeption 16
<b>4</b>	<b>Temporäre Streckenabdichtungen</b> <b>18</b>
4.1	Angaben des Antragstellers 18
4.2	Bewertung der temporären Abdichtungen 21
4.2.1	Stand sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis 21
4.2.2	Technische Realisierbarkeit 24
<b>5</b>	<b>Verschlussbauwerke im Steinsalz</b> <b>26</b>
5.1	Angaben des Antragstellers 26
5.2	Bewertung Verschlussbauwerke im Steinsalz 44
5.2.1	Gesamtkonzeption 44
5.2.2	Stand sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis 46
5.2.3	Technische Realisierbarkeit 52
<b>6</b>	<b>Verschlussbauwerke im Steinsalz – in-situ Versuch</b> <b>55</b>
6.1	Angaben des Antragstellers 55
6.2	Bewertung in situ Versuch Streckenverschlussbauwerke 57
<b>7</b>	<b>Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit</b> <b>63</b>
7.1	Angaben des Antragstellers 63
7.2	Bewertung Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit 79
7.2.1	Gesamtkonzeption 79
7.2.2	Stand sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis 81
7.2.3	Technische Realisierbarkeit 86
<b>8.</b>	<b>Abdichtung des südlichen Wetterrolllochs</b> <b>87</b>
8.1	Aussagen des Antragstellers 87
8.2	Bewertung Abdichtung südliches Wetterrollloch 92
<b>9</b>	<b>Abdichtungen von Bohrungen</b> <b>93</b>
9.1	Aussagen des Antragstellers 93
9.2	Bewertung Abdichtung von Bohrungen 95
<b>10</b>	<b>Zusammenstellung der Bewertungen</b> <b>97</b>
<b>11</b>	<b>Liste der verwendeten Unterlagen und Literatur</b> <b>100</b>

## **1 Veranlassung und Gegenstand der Berichterstattung**

Das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) forderte die Arbeitsgemeinschaft Morsleben, vertreten durch das Ingenieurbüro IHU Geologie und Analytik GmbH, mit Schreiben vom 11.04.2008 auf, ein Angebot für die Prüfung der durch das Bundesamt für Strahlenschutz im Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ eingereichten Unterlagen vorzulegen. Das Angebot der AG Morsleben wurde entsprechend den Anmerkungen des MLU vom 22.07.2008, 16.09.2008 und 20.11.2008 überarbeitet und mit Datum vom 16.12.08 beauftragt. Neben den Mitgliedern der AG Morsleben wurde die Firma Brenk Systemplanung als Unterauftragnehmer eingebunden, um die Auswirkungen der Funktion der Streckenverschlüsse beim Langzeitsicherheitskonzept umfassend berücksichtigen zu können.

Zur Planfeststellung des Stilllegungsbetriebes legt das Bundesamt für Strahlenschutz Unterlagen vor, welche den Gegenstand des Vorhabens beschreiben und die Voraussetzungen für die Planfeststellung nachweisen sollen. Von der Planfeststellungsbehörde werden diese Unterlagen in sogenannte Prüfkomplexe gebündelt, um der Komplexität des Vorhabens gerecht zu werden. Im Prüfkomplex 7 „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ werden dabei die Unterlagen zur Errichtung von horizontalen Streckenabdichtungen im Steinsalz und im Anhydrit sowie die Unterlagen zur Abdichtung von Bohrungen und Rolllöchern zur Abdichtung der Einlagerungsbereiche zusammengefasst.

Der aktuelle Prüfbericht behandelt den Leistungsteil 1, die Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung der eingereichten Unterlagen U01 bis U15. Die Konsistenzprüfung erfolgt in Bezug auf die anderen bekannten Verfahrensunterlagen und insbesondere auch gegenüber dem „Plan zur Stilllegung des ERAM“, Stand 31.03.2009, A 281 (U16).

Ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass der durch den vorliegenden Prüfbericht dokumentierte Sachstand zum Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ im Wesentlichen auf den mit U01 bis U15 bezeichneten Unterlagen basiert. Die seit Beauftragung der vorliegenden Stellungnahme vom Antragsteller weiterhin vorgelegten Planungen zur bautechnischen Machbarkeit und zum Nachweis der Funktionalität durch In-situ-Versuche sowie die Ergebnisse der diesbezüglich geführten Fachgespräche werden durch den vorliegenden

Prüfbericht nicht abschließend erfasst, sondern gemäß Vereinbarung zwischen Genehmigungsbehörde, Antragsteller und AG Morsleben im Rahmen einer begleitenden Prüfung erörtert und bewertet. In der Konsequenz bleibt darauf hinzuweisen, dass einige der im Rahmen des vorliegenden Prüfberichtes genannten Forderungen, Empfehlungen und Hinweise durch die weiterführenden Arbeiten des Antragstellers bereits berücksichtigt worden sind.

Übergeordnetes Ziel der vorliegenden Prüfung ist es zu beurteilen, ob die vom AS in U01 bis U15 dokumentierten konzeptionellen Planungen zur konstruktiven und bautechnischen Gestaltung der Abdichtungsbauwerke dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen bzw. ob und ggf. welche Defizite bestehen. Hierzu im Einzelnen zu beantworten sind Fragestellungen

- zur grundsätzlichen Machbarkeit der konstruktiven Maßnahmen,
- zur Eignung der Streckenabdichtungen, die in den Sicherheitsanalysen definierten Anforderungen zu erfüllen,
- zur Vollständigkeit der Nachweisführung für die Dichtwirkung der Verschlussbauwerke,
- zur Eignung der verwendeten Nachweiskriterien,
- zu Umfang, Art und Eignung experimenteller Labor- und Felduntersuchungen zur Quantifizierung der Materialeigenschaften des Verbundsystems „Abdichtungsbauwerk - Gebirge“,
- zur rechnerischen Nachweisführung hinsichtlich der Abbildung der in-situ- Situation im Berechnungsmodell (Berechnungsverfahren, Stoffmodelle, Stoffmodellkennwerte, Lastfälle, Einwirkungen etc.).

Inwieweit die in den Unterlagen dokumentierten rechnerischen Nachweise die Forderungen an Standsicherheit, Dichtigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung der relevanten Belastungsszenarien zahlenmäßig richtig erfüllen, ist nicht Gegenstand der Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung. Die auf Konsistenz und Plausibilität ausgerichtete Prüfung ist charakterisiert durch eine erfahrungsbasierte qualitative Überprüfung von Sachverhalten. Sie ist inhaltlich beschränkt auf die Kontrolle grundsätzlicher Abhängigkeiten, Vorgehensweisen und Prozesse und fragt beispielsweise danach, ob

- (1) dokumentierte Ergebnisse zu Berechnungen, Laboruntersuchungen oder Messungen in qualitativen Verläufen und quantitativen Größenordnungen dem Erfah-

- rungsbereich entsprechen und in Übereinstimmung sind mit gegebenen Zwangs- und Randbedingungen sowie den Aussagen im Plan zur Stilllegung des ERA Morsleben,
- (2) im jeweiligen Sachzusammenhang verwendete Verfahren und Konzepte der üblichen Vorgehensweise im fachlichen Umfeld entsprechen,
  - (3) die Anforderungen an eine in sich schlüssige, vollständige und nachvollziehbare Dokumentation erfüllt werden und sofern möglich und vorhanden
  - (4) die dokumentierten Ergebnisse in Übereinstimmung sind mit vergleichbaren Fallbeispielen.

Eine Aussage zur zahlenmäßigen Richtigkeit der mitgeteilten Ergebnisse bzw. eine Identifizierung von Unsicherheiten erfolgt im Rahmen der Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung nicht.

Ein wichtiger Bestandteil der Konsistenz und Plausibilitätsprüfung im Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ ist die Kontrolle der geologischen Voraussetzungen für die Errichtung der Verschlussbauwerke. Hier ist vorrangig zu prüfen, ob die Angaben in den Planungsunterlagen mit den geologischen Primärunterlagen korrespondieren. Insbesondere wird geprüft, ob die vorgesehenen Standorte der Verschlussbauwerke geologisch geeignet sind und den Untersuchungs- und Kartiererergebnissen entsprechen, z. B. den Angaben im Lagerstättenmodell U22, dem Risswerk U18, den Kartierungsergebnissen für ausgewählte Grubenfelder U19, U20 und U21. In diesem Zusammenhang ist es in Bezug auf die Zuverlässigkeit der Standortauswahl wichtig, ob Standortauswahl und Berechnungsgrundlagen auf exakten Kartierungsdaten und Messwerten beruhen oder ob Interpolationen, Analogien und Annahmen herangezogen wurden.

Weiterhin ist zu prüfen, ob geogene und technogene Randbedingungen in ausreichendem Maße berücksichtigt wurden. Hier sind z. B. zu nennen: Carnallitvorkommen und Kalilager, die die Funktionstüchtigkeit der Verschlussbauwerke ebenso beeinträchtigen können wie Störungen und Klüfte sowie Altbohrungen und geometrische Unregelmäßigkeiten.

## **2 Grundsätzlicher Sachstand und Methodik der Prüfung**

Die im Rahmen von Prüfkomplex 7 „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ behandelten Abdichtungsbauwerke sind ein wesentlicher Bestandteil des weltweit angewandten Multibarrierenkonzeptes, bei dem durch ein aufeinander abgestimmtes System von geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren eine langfristige Isolation der untertägig abgelagerten Schadstoffe erreicht werden soll. Nach deutschem Konzept muss die Isolation der Schadstoffe in erster Linie durch die geologische Barriere gewährleistet werden. Als geologische oder auch natürliche Barriere werden die Gebirgsschichten des Wirtsgesteins sowie des Deck- und Nebengebirges bezeichnet, die unzulässige Freisetzungen von Schadstoffen aus dem Endlager und den Transport in die Biosphäre be- bzw. verhindern. Sie umfasst damit alle geologischen Einheiten zwischen dem Einlagerungsbereich und der Biosphäre, die eine Schadstoffausbreitung be- bzw. verhindern.

Die aus der Auffahrung von Strecken, Schächten und Hohlräumen des Endlagerbergwerkes resultierenden Perforationen bzw. Störungen der geologischen Barriere müssen durch technische und geotechnische Barrieren so lange kompensiert werden, bis sich die Wirksamkeit der geologischen Barriere durch langfristige Konvergenzprozesse wieder vollständig eingestellt hat. Damit sind die technischen und geotechnischen Barrieren insbesondere für den Zeitraum der Betriebsphase und einige hundert bis einige 1000 Jahre nach Verschluss des Endlagers von signifikanter Bedeutung für die Isolation der Schadstoffe. Für das ERA Morsleben hierbei zu berücksichtigen ist, dass aufgrund der für den Verschluss der Schächte Marie und Bartensleben und den Verschluss der Strecken planmäßig vorgesehenen Abdichtungsmaterialien Bentonit, Bitumen, Salzbeton und Magnesiabeton eine hydraulische Wirksamkeit dieser geotechnischen Barrieren auf dem Niveau der geologischen Barriere auch langfristig nicht durch Konvergenzprozesse erreicht wird. In der Konsequenz ist für die Abdichtungsbauwerke nachzuweisen, dass sie über die gesamte im radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis für erforderlich abgeleitete Zeitspanne ihre Funktionsfähigkeit behalten.

Die im Rahmen von Prüfkomplex 7 behandelten Strecken- und Bohrlochverschlüsse werden allgemein als geotechnische Barrieren bezeichnet. Ziel geotechnischer Barrieren ist es, das Endlagerbergwerk gegen einen Zu- bzw. Austritt von Lösungen abzudichten. Geotechnische

Barrieren sind gekennzeichnet durch das Zusammenwirken technischer Barrieren mit dem geologischen Umfeld. Ihre Leistungsfähigkeit resultiert daher nicht ausschließlich aus den bautechnischen Eigenschaften des technischen Elementes, sondern ist vielmehr abhängig von den langfristigen Wechselwirkungen des Verschlussbauwerkes mit dem umgebenden Gebirge. Geotechnische Barrieren sind charakterisiert durch ein viergliedriges System aus

- (a) bautechnischer Konstruktion im offenen Grubengebäude,
- (b) Kontaktzone zwischen bautechnischer Konstruktion und Auflockerungszone des Gebirges,
- (c) Auflockerungszone und
- (d) dem umgebenden, geologisch dichten Gebirge.

Für eine die in situ Verhältnisse hinreichend realitätsnah berücksichtigende Analyse und Bewertung des Trag- und Dichtheitsverhaltens von Strecken- und Bohrlochverschlüssen sind somit die das Verbundtragsystem „Strecken- bzw. Bohrlochverschluss“ charakterisierenden Elemente im Rahmen der Planung und Auslegung zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung hierbei ist, dass die auf das Tragsystem raum- und zeitabhängig einwirkenden mechanischen, hydraulischen, thermischen und chemischen Beanspruchungen in Verbindung mit den Materialeigenschaften von Gebirge, Auflockerungszone, Kontaktzone und Dammbauwerkstoffen zu komplexen geomechanischen Wechselwirkungen führen, die nicht unabhängig voneinander sind, sondern sich gegenseitig beeinflussen. Vor diesem Hintergrund ist die aktuelle Forschung im Bereich der Nachweisführungen zu Standsicherheit und Dichtheit von Verschlussbauwerken gekennzeichnet durch das Bestreben, durch mechanisch-thermisch-hydraulisch-chemisch gekoppelte Berechnungen die komplexen Wechselwirkungen quantitativ zu erfassen. Hierbei zu berücksichtigen ist, dass allgemein gültige Regeln, Normen oder Richtlinien für den Bau und die Konstruktion geotechnischer Barrieren ebenso wenig existieren wie Vorgaben für den Nachweis von Dichtheit und Standsicherheit. Die Situation im Bereich geotechnischer Sicherheitsnachweise für Damm- und Verschlussbauwerke ist charakterisiert durch das aktuelle Bestreben des Arbeitskreises Salzmechanik der DGGT, *Empfehlungen zur Planung und Ausführung von geotechnischen Barrieren im Salinalgelände im Rahmen der Stilllegung von Untertagedeponien* zu erarbeiten. Für die Planung oder Prüfung geotechnischer Barrieren verwertbare Entwürfe liegen z.Zt. jedoch nicht vor. Für die Praxis der Planung und Dimensionierung von Verschlussbauwerken folgt daraus, dass weder die bautechnische Konstruktion, die verwendeten Baumaterialien und die bautechnische Realisierung



noch die Vorgehensweise bei der physikalischen Modellierung, die einzusetzenden Berechnungsverfahren, die Methodik der Nachweisführung und die anzusetzenden Sicherheitsmargen vorgegeben sind. Dessen ungeachtet ist es Aufgabe der Tragwerksplanung aufzuzeigen, dass die gewählte bautechnische Konstruktion und die standortbezogene Nachweisführung im jeweiligen Sachzusammenhang der Forderung nach Anwendung der allgemein anerkannten Regeln der Technik, des Standes der Technik bzw. des Standes von Wissenschaft und Technik entsprechen. Für die Prüfung der im Rahmen von Prüfkomplex 7 – „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ zusammengestellten Unterlagen resultiert hieraus die Notwendigkeit, zunächst aufzuzeigen, welche grundsätzlichen Anforderungen nach Einschätzung der Prüfer an die Strecken- und Bohrlochverschlüsse zu stellen sind und darauf aufbauend, unter besonderer Berücksichtigung der standortbezogenen Randbedingungen und Erfordernisse des ERA Morsleben kritisch zu beurteilen, ob bzw. inwieweit

- der Entwurf und die Ausführung der verschiedenen Verschlussbauwerke,
- die Methodik der rechnerischen Nachweisführung,
- die verwendeten Bewertungskriterien für die Nachweise zu Standsicherheit und Dichtheit und
- die rechnerische Simulation des Trag- und Dichtheitsverhaltens

in Übereinstimmung sind mit den grundlegenden Anforderungen. Als grundlegende Anforderungen sind aufbauend auf den generellen Zielstellungen geotechnischer Barrieren,

- a) den Austritt von Schadstoffen aus Ablagerungsbereichen zu verhindern,
- b) eine druckdichte Abdichtung gefluteter Grubenteile gegenüber offen gehaltenen Grubenteilen zu gewährleisten und
- c) im Rahmen der Stilllegung von Endlagerbergwerken einen Zutritt fluiden Phasen in das Endlager zu verhindern,

zu nennen:

- (1) Angesichts der Wechselwirkung zwischen bautechnischer Konstruktion und umgebendem Gebirge hat die Nachweisführung standortgezogen zu erfolgen.
- (2) Die konstruktive Auslegung der geotechnischen Barriere muss unter Berücksichtigung der lokationsbezogenen Eigenschaften des umgebenden Gebirges und der anstehenden Fluide erfolgen.
- (3) Für eine hinreichend präzise Einschätzung der rheologischen Eigenschaften des anstehenden Gebirges sind im Bereich der geplanten Dammstandorte rechtzeitig vor Einbau der Verschlussbauwerke Konvergenzmessungen zu realisieren.

- (4) Geotechnische Barrieren sind als ein- oder zweiseitig dichte (bidirektionale) Bauwerke auszulegen, so dass unabhängig vom Ort eines möglichen Fluidzutrittes sowohl ein Austritt von Schadstoffen aus den Einlagerungsbereichen wie auch ein Zutritt in die Einlagerungsbereiche verhindert wird.
- (5) Um auch bei ggf. eingeschränkter Wirksamkeit eines Abdichtungselementes die Systemsicherheit zu gewährleisten, sind geotechnische Barrieren hinsichtlich der Anzahl einzelner Abdichtungselemente soweit möglich redundant und hinsichtlich der Abdichtungsmaterialien diversitär auszulegen.
- (6) Zur Vermeidung potenzieller Undichtigkeiten in der Kontaktzone zwischen bautechnischer Konstruktion und umgebenden Gebirge hat sich eine Trennung von dichtenden und lastabtragenden Elementen bewährt.
- (7) Der Zeitraum für die Nachweisführung zur Standsicherheit und Dichtigkeit muss mindestens die Zeitspanne umfassen, bis zu der die Abdichtfunktion durch andere geotechnische Barrieren bzw. die in ihrer geogenen Qualität wieder hergestellte bzw. verheilte geologische Barriere (z.B. versetzte und durch Gebirgsdruckwirkung dicht verschlossene Grubenbaue) übernommen wird.
- (8) Bei eingeschränkter zeitlicher Wirksamkeit der technischen Konstruktion und zur Gewährleistung einer auch langfristigen Funktionalität der Abdichtungs konstruktion ist die Anordnung von Kurzzeit- und Langzeitdichtelementen vorteilhaft (vgl. (7)).
- (9) Die Dichtwirkung geotechnischer Barrieren sollte mit der Standzeit zunehmen.
- (10) Geotechnische Barrieren sind wartungsfrei auszulegen.
- (11) Die drucktechnische Auslegung geotechnischer Barrieren hat so zu erfolgen, dass mindestens ein dem Teufenniveau des Standortes entsprechender einseitig angreifender hydraulischer Flüssigkeitsdruck ohne Verlust der Funktionstüchtigkeit aufgenommen werden kann. Die Wirkung von komprimierten Gasen im Endlager auf geotechnische (und auch geologische) Barrieren bedingt eine besondere Betrachtung.
- (12) Es sind grundsätzlich Baumaterialien zu verwenden, deren Langzeitbeständigkeit und -verträglichkeit mit dem umgebenden Gebirge und seinem geochemischen Milieu durch natürliche Analoga nachweisbar sind (Feststoff, fluide Phasen).
- (13) Die eingesetzten Dammbaumaterialien müssen gegenüber den möglicherweise eindringenden Fluiden (Lösungen, Gase) zumindest für den Zeitraum der geforder-

ten Funktionalität in dem erforderlichen Maße korrosions- und temperaturbeständig sein.

- (14) Der Standort der Querschnittsabdichtungen soll sich in einem möglichst homogenen, tektonisch und durch bergmännische Arbeiten weitgehend unbeeinflussten Gebirgsbereich befinden.
- (15) Die Permeabilität der Querschnittsabdichtung sollte aus hydraulischer Sicht in der Größenordnung der Permeabilität des umgebenden Gebirges liegen.
- (16) Die bautechnische Machbarkeit ist durch einen Demonstrationsversuch am Standort des Endlagers in einem hinsichtlich der geologischen Verhältnisse vergleichbarem Gebirgsbereich zu belegen.
- (17) Die Funktionalität des Abdichtungskörpers ist durch einen in situ Versuch am Standort des Endlagers in einem hinsichtlich der geologischen Verhältnisse vergleichbarem Gebirgsbereich zu belegen.
- (18) Die das Dammbauwerk aufbauenden Materialien sind hinsichtlich ihrer mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Eigenschaften quantitativ auf der Grundlage geeigneter Laboruntersuchungen zu belegen. Art und Umfang der Laboruntersuchungen müssen geeignet sein, das Streubreitenband der Materialeigenschaften zu belegen. Die mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Materialeigenschaften sind durch geeignete Stoffmodelle derart zu beschreiben (physikochemische Modellierung), dass eine Prognose des Trag- und Abdichtverhaltens im Rahmen von rechnerischen Simulationen und Analysen möglich ist.
- (19) Die zur Gewährleistung einer planmäßigen Funktionalität der Abdichtungsbauwerke geforderten materialtechnischen und bautechnischen Anforderungen sind durch ein die Baumaßnahme begleitendes Qualitätsmanagementsystem zu prüfen und zu dokumentieren.

Über die vorstehend zusammengestellten grundsätzlichen Anforderungen an geotechnische Barrieren hinaus sind die im Rahmen von Prüfkomplex 7 vorgelegten Unterlagen des AS dahingehend zu prüfen, ob

- (1) die aufgeführten Nachweise und die Nachweiskonzeption insgesamt dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen,
- (2) die Ausführungen nachvollziehbar und schlüssig dokumentiert sind,
- (3) die Ausführungen sachlich richtig und inhaltlich vollständig sind,

- (4) die Nachweiskonzeption geeignet ist, die Standsicherheit und Integrität der Verschlussbauwerke in den Bauzuständen und im Endzustand zu bewerten,
- (5) die vorhandenen Erkenntnisse zum Materialverhalten der anstehenden Salinargesteine in geeigneter Weise bei der Festlegung der Kriterien und Grenzwerte berücksichtigt wurden,
- (6) die Kriterien und Grenzwerte durch hinreichende Untersuchungen und Messungen zum Materialverhalten des anstehenden Gebirges (lokationsspezifisch) und zu den verwendeten Baumaterialien belegt sind sowie
- (7) die Wechselwirkungen zwischen bautechnischer Konstruktion und umgebenden Gebirge angemessen in die Nachweisführung einbezogen wurden.

Hierzu werden die in U01 bis U15 dokumentierten Ausführungen des Antragstellers nachfolgend zusammenfassend skizziert und vor dem Hintergrund der vorstehend genannten Kriterien bewertet. Die Bewertung erfolgt im jeweiligen Sachzusammenhang unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Einzelunterlagen.

Die Ergebnisse der Bewertung werden schließlich den Rubriken

- Hinweise
- Empfehlungen und
- Forderungen

zugewiesen.

Die Rubrik „**Hinweise**“ beinhaltet Angaben zu formalen Mängeln wie z.B. das Fehlen von Anlagen, unvollständige Erläuterungen oder fehlende Erklärungen und Definitionen zu verwendeten Formeln oder Symbolen etc.

Unter der Rubrik „**Empfehlungen**“ werden Vorschläge zusammengestellt, die nach Einschätzung der Prüfer zu einer umfassenderen und/oder transparenteren Darstellung der Ergebnisse führen. Angesichts der weitgehend fehlenden Normung im Bereich der sicherheitlichen Nachweisführung für untertägige geotechnische Anlagen und der damit verbundenen Notwendigkeit, individuell durch den jeweiligen Bearbeiter geprägte Einschätzungen und Beurteilungsmaßstäbe zu entwickeln, sind unter der Rubrik „Empfehlungen“ zusammengestellte Anmerkungen als Anregungen für eine fachliche Diskussion zu verstehen. Insofern stellen die unter „Empfehlungen“ zusammengestellten Anmerkungen keine sachlichen Mängel dar, sondern dokumentieren vielmehr unter dem Zugeständnis individueller Vorgehensweisen die

Bandbreite möglicher Einschätzungen und möglicher Nachweismethoden im jeweiligen Sachzusammenhang.

In der Rubrik „**Forderungen**“ werden schließlich diejenigen kritischen Anmerkungen und identifizierten Defizite zusammengefasst, die nach Einschätzung der Prüfer einer Nachbearbeitung bedürfen.

Eine Zusammenstellung der berichtsspezifisch abgeleiteten Hinweise, Empfehlungen und Forderungen erfolgt am Schluss des Prüfberichtes im Kapitel 10.

### **3 Konzeption der Unterlagen zum Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“**

#### **3.1 Angaben des Antragstellers**

Aus der Gesamtstruktur der Unterlagen zu den Streckenverschlüssen kann entnommen werden, dass zur Stabilisierung des Grubengebäudes und zur Minimierung des einer potentiellen Umlösung von Salzgestein zugänglichen Hohlraumvolumens vom AS eine weitgehende Vollverfüllung der Grubenbaue des ERA Morsleben geplant ist. Von den zu Beginn der Stilllegung offen stehenden 5,5 Mio. m<sup>3</sup> Hohlraumvolumen sollen hierzu ca. 4,0 Mio. m<sup>3</sup> mit hydraulisch abbindendem Salzbeton vom Typ M3 verfüllt werden. Darüber hinaus ist geplant, durch die Errichtung von insgesamt 26 Streckenverschlüssen sowie einem Rolllochverschluss die mit radioaktiven Abfällen belegten Grubenbaue gegen einen potentiellen Zutritt von Lösungen abzudichten, Bild 3.1. Dabei wird unterstellt, dass ein potentieller Zutritt von Lösungen über den Zentralbereich des ERA Morsleben erfolgt. In der Konsequenz werden die Feldesteile Süd-West-Feld und Ostfeld durch 22 Streckenabdichtungen und eine Rolllochabdichtung gegen das restliche Grubengebäude planmäßig abgedichtet. Diese, als *Strecken mit hohen Anforderungen* bezeichneten Abdichtungen bestehen gemäß Aussage des AS aus bis zu 10 Abdichtungssegmenten von 25m Länge, wovon mindestens ein Segment einen *querschnittsgemittelten hydraulischen Widerstand* von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  ausweisen muss. Als Material für die Segmente mit einem *querschnittsgemittelten hydraulischen Widerstand* von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  ist geplant, hydraulisch abbindenden Salzbeton vom Typ M2 einzusetzen. Bohrungen im Bereich der Abdichtungssegmente, welche die hydraulische Wirksamkeit der Streckenver-

schlüsse herabsetzen könnten, sollen mit Magnesiabinder verfüllt werden. Um auch während der Verfüllung einen Kontakt von Überschusslösung und eingelagerten Abfällen auszuschließen, sollen insgesamt 4 so genannte *temporäre Abdichtungen* errichtet werden. Als Anforderungen an die *temporären Abdichtungen* nennt der AS eine Funktionstüchtigkeit von 12 Jahren und eine *Bauwerkspermeabilität* von etwa  $k = 10^{-15} \text{ m}^2$ .

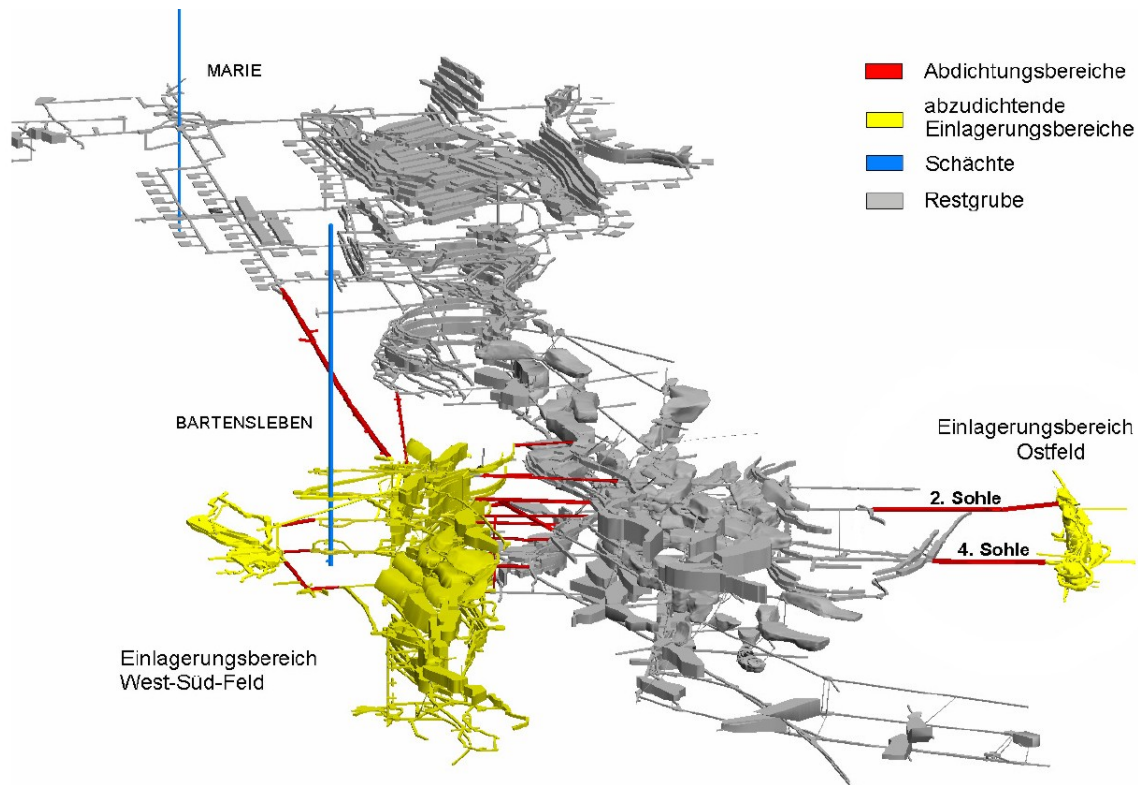


Bild 3.1 Übersicht der Einlagerungsbereiche und Abdichtungsbauteile (nach U10, Abb. 1)

Zur Untersuchung der grundsätzlichen Machbarkeit des vorstehend skizzierten Stilllegungs- und Abdichtungskonzeptes sind vom AS experimentelle Untersuchungen zu den mechanischen, hydraulischen, thermischen und chemischen Eigenschaften der Salz- und Magnesiabetonen und rechnerische Untersuchungen zur Langzeitsicherheit und Funktionstüchtigkeit der Streckenverschlüsse vorgelegt worden. Die rechnerische Nachweisführung für die *Streckenverschlüsse mit hohen Anforderungen* wie auch die rechnerische Nachweisführung der *temporären Abdichtungen* ist methodisch gekennzeichnet durch eine Vorgehensweise, bei der für jeweils einen, als extremal beanspruchten Streckenverschluss der rechnerische Nachweis geführt wird und die Ergebnisse durch verbal argumentative Ähnlichkeitsbetrachtungen auf die sonstigen Standorte übertragen werden. Die Herstellung der Abdichtungen soll schließlich in

einem *Handhabungsversuch* in situ erprobt werden. Auch ist beabsichtigt, den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bzw. Funktionstüchtigkeit durch einen in situ Versuch soweit möglich zu belegen.

Der Antragsteller beschreibt und begründet im Plan Stilllegung (Kurzbeschreibung) U17 das Verschlusskonzept für das Endlager wie folgt:

*Als geeignet für die Stilllegung und den Langzeitsicherheitsnachweis hat sich im Rahmen der Prüfung der Verfahrensalternativen das Konzept mit Abdichtungsmaßnahmen im weiteren Umfeld der Einlagerungsgrubenbaue und weitgehender Verfüllung von Resthohlräumen herauskristallisiert. Dieses Konzept sieht weitgehende Abdichtungsmaßnahmen im weiteren Umfeld der Einlagerungsgrubenbaue durch Errichten von Abdichtungen mit definierten hydraulischen Eigenschaften vor. Der Zutritt von Lösungen in die Grubengebäude und das Auspressen kontaminierter Lösung wird durch die Abdichtungen und die abschnittsweise vollständige Verfüllung der Grubenbaue solange verzögert, dass die Radionuklide mit den ursprünglich höchsten Aktivitäten dann weitgehend zerfallen sind. Untertägige Bohrungen, durch die ein sicherheitsrelevanter Lösungs- und Schadstofftransport erfolgen könnte, werden abgedichtet.*

Weiterhin wird im Plan Stilllegung U16 ausgeführt:

*Die horizontalen Abdichtungen aus Salzbeton und Magnesiabeton können nicht so ausgelegt werden, dass ihre geochemische Stabilität bei allen möglichen Zusammensetzungen der potenziell zutretenden Salzlösungen dauerhaft gegeben ist. In den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit wird daher unterstellt, dass die Abdichtungen mit der zutretenden Lösung entsprechend ihrer Zusammensetzung reagieren und sich ihre Permeabilität dabei erhöht. Aufgrund der niedrigen Anfangspermeabilität sind die Zutrittsraten in die Einlagerungsbereiche gering, so dass die Permeabilität der Abdichtungen über ausreichend lange Zeiträume erhalten bleibt und damit die hydraulische Wirksamkeit der Abdichtungen und die Rückhaltung der Schadstoffe gewährleistet werden. Auch die geomechanischen Modellrechnungen weisen eine ausreichend lange Standfestigkeit der Abdichtungen nach.*

In Übereinstimmung hierzu wird in der Systembeschreibung U05 ausgeführt:

*Das Stilllegungskonzept basiert auf einer weitgehenden Vollverfüllung des gesamten Grubengebäudes mit einem hydraulisch abbindenden Baustoff mit Salzzuschlag. Hierdurch wird die Integrität der Salzbarriere des Grubengebäudes gewährleistet. Des Weiteren werden Umlö-*

*seprozesse durch zutretende Wässer minimiert und der Zutritt von Lösungen an die Abfälle sowie der spätere Austrag von kontaminierter Lösung aus dem Grubengebäude verzögert.*

### **3.2 Bewertung der Verschlusskonzeption**

Wesentliche Begründungen und Erläuterungen zur Verschlusskonzeption sind in der Unterlage U03 -*Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen - Konzeptplanung und Nachweisführung* - dokumentiert. Danach sind die 21 im Steinsalzgebirge zu errichtenden Abdichtungsbauwerke ein wesentliches Element des übergeordneten Stilllegungskonzeptes für das ERA Morsleben, bei dem durch eine weitgehende Vollverfüllung des Grubengebäudes, eine hydraulische Trennung der Einlagerungsgrubenbaue West-Südfeld und Ostfeld von der Restgrube und die Gewährleistung eines querschnittsgemittelten hydraulischen Anfangswiderstandes der Abdichtungsbauwerke von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  die im Rahmen des radiologischen Langzeitsicherheitsnachweises für das Szenario zugelaufenes Grubengebäude abgeleiteten Anforderungen an einen zeitlich verzögerten und mengenmäßig begrenzten Austritt kontaminierter Fluide aus dem Endlager erfüllt werden. Die Standortauswahl für die Streckenabdichtungen berücksichtigt die Anbindung der zur Zeit zuflussfreien Einlagerungsbereiche an die Restgrube und den Zentralteil, die Befahrbarkeit der Standorte sowie die geologische Ausbildung und insbesondere das Vorhandensein der als kritisch anzusehenden Kalisalzeinlagerungen an den für die Errichtung der Streckenverschlüsse vorgesehenen Standorten. Generell wird versucht eine maximal mögliche Länge der Bauwerke zu realisieren. Als konzeptionelle Charakteristika der Abdichtungsbauwerke werden genannt:

- Keine Trennung von Dichtelement und Widerlager (*Auf Grund der geologischen und bergbaulichen Situation ist die zur Verfügung stehende Länge für die Abdichtungen z.T. gering*).
- Einfache Konstruktion (*sägezahnartige u.ä. Konstruktionen sind zu vermeiden*).
- Verwendung von Materialien, für die aus dem Salzbergbau eine technisch wissenschaftliche Basis vorhanden ist (*für den Anwendungsfall müssen die Grundlagen einer mathematisch technischen Beschreibung vorhanden sein, technische Verwertbarkeit als Massenbaustoff muss gewährleistet sein, hinreichende Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit für den Betrachtungszeitraum muss gegeben sein*).
- Konstruktionsprinzip: Vollversatz ggf. mit Nachinjektion (*In Bezug auf die Abdichtungsposition ist zu zeigen, dass der Druck durch die auflaufende Konvergenz*



*im zugrunde gelegten Betrachtungszeitraum ausreicht, um eine hinreichend geringe Permeabilität in der Auflockerungs- bzw. Kontaktzone zu gewährleisten.).*

- *Segmentweiser Aufbau der Abdichtungen (Für die Abdichtungen ist die Erstellung von hintereinander angeordneten Segmenten vorgesehen. Die Segmentlänge entspricht dabei den kleinsten sinnvoll anzuordnenden Längen von 15 – 30m, die als hydraulischer Widerstand wirksam werden sollen. Darüber hinaus gehende Abdichtungslängen werden durch plastische Fugen ... voneinander getrennt.).*
- *Nachschnitt und Abrundung der Streckenkontur zur Entfernung der Auflockerungszone (Die Streckenkontur im Salz bzw. im Anhydrit wird auf ca. 20 – 50 cm nachgeschnitten.).*

Auch wenn das vorstehend skizzierte Konzept der Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen nicht in allen Teilen den einleitend zusammengestellten grundlegenden Anforderungen an geotechnische Barrieren vollständig entspricht, bleibt nach Einschätzung der Prüfer festzustellen, dass eine praktikable und erfolgversprechende Alternative zum vorgesehenen Konzept der Abdichtung von Strecken nicht erkennbar ist. Der Antragsteller hat sowohl die standortspezifischen Anforderungen an die Langzeitsicherheit des verfüllten Endlagers berücksichtigt als auch die technischen und geologischen Randbedingungen in das Konzept einfließen lassen. Überflüssige Abdichtungsbauwerke sind aus der Sicht der Prüfer ebenso wenig zu erkennen wie die Notwendigkeit zusätzlicher Bauwerke. Sofern an einzelnen Standorten eine vollständige Umsetzung der grundlegenden Anforderungen an geotechnische Barrieren durch die geplante bautechnische Konstruktion bzw. die geplanten Abdichtungsmaterialien nicht realisiert wurde, dokumentieren die Ausführungen des AS in den Prüfunterlagen eine hinreichende Berücksichtigung und Würdigung der (langzeit)sicherheitlichen Konsequenzen. Von den Prüfern wird daher eingeschätzt, dass das vom AS vorgelegte Konzept zum Verfüllen und Verschließen von Strecken im Sinne der Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung insgesamt erwarten lässt, dass die Anforderungen aus dem Langzeitsicherheitsnachweis erfüllt werden können. Vorstehende Aussage setzt voraus, dass der von den Prüfern geforderte in situ Versuch zum Nachweis der technischen Machbarkeit und zum Beleg der voraussichtlichen Funktionstüchtigkeit der Abdichtungsbauwerke erfolgreich realisiert wird. Die Bewertung der Planungen und Ausführungen des AS zum in situ Versuch erfolgt in Kap. 7.

## 4 Temporäre Streckenabdichtungen

### 4.1 Angaben des Antragstellers

Gemäß Aussage in U09 *kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Zuge der Stilllegungsmaßnahmen ... die Überschusslösung auch mit den radioaktiven Abfällen in Kontakt kommt. Daher müssen bereits während des Verfüllbetriebs temporäre Abdichtungen errichtet werden....* Im Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben U16 wird ausgeführt: *„Ausschließlich auf der 4. Sohle (-372 m NN) im Grubenfeld Bartensleben werden vor der Verfüllung der großvolumigen Abbauhohlräume vier temporäre Abdichtungen in ausgewählten Streckenabschnitten des Nord- und Südfeldes und im Ostquerschlag aus Dammbaustoff errichtet ... Der Dammbaustoff besteht aus Zement, Steinkohlenfilterasche und Wasser. Eine weitere temporäre Abdichtung im Ostquerschlag des Ostfelds bildet den östlichen Abschluss der dortigen Abdichtung und wird aus zementbasiertem Beton hergestellt. In Verbindung mit einer abschnittsweisen vollständigen Streckenverfüllung wird verhindert, dass die bei der Abbauverfüllung mit Salzbeton anfallende Überschusslösung, welche durch den Kontakt mit den radioaktiven Abfällen kontaminiert sein kann, in betrieblich noch genutzte Grubenbaue auf der 4. Sohle austreten kann. Die temporären Abdichtungen sind für die Dauer der Stilllegung bis zur Verfüllung des Schachtes Bartensleben nach dem Stand der Technik ausgelegt und bestehen jeweils aus einem ca. 20 m langen Segment. Die Kontaktzone zwischen Gebirge und Bauwerk wird durch eine Injektion ertüchtigt, um die sofortige Dichtigkeit zu gewährleisten. (U16, S. 173)U09 dokumentiert den Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis für insgesamt vier planmäßig zu errichtende temporäre Abdichtungen auf der Basis der konstruktiven Entwürfe für ein Referenzbauwerk, d.h. der rechnerische Nachweis erfolgt ausschließlich für das Referenzbauwerk mit verbal argumentativer Übertragung der Ergebnisse auf die sonstigen Lokationen. Zur Begründung wird ausgeführt: Die zu errichtenden Bauwerke unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen und deshalb auch bezüglich ihres Tragverhaltens bei anstehendem Fluiddruck. Daher wird stellvertretend für alle Gründungsbereiche ein Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die statisch ungünstigste Lokation geführt.*

Als Lokationen für die temporären Abdichtungsbauwerke werden genannt und ausführlich beschrieben:

- *Nördlicher Bereich der Nordstrecke (17YER21/R001) vor den Einlagerungsgrubenbauen* (→ Bild 4.1: A1)
- *Östliches Ende des westlichen Störreservelagers (17YEA31/R001) im Bereich des Abzweiges Wetterstrecke (17EA34/R001)* (→ Bild 4.1: A2)
- *Südstrecke (17YER31/R001) nördlich der Werkstatt* (→ Bild 4.1: A3)
- *Ostquerschlag (17YEQ01/R001) westlich des Lagerteils B* (→ Bild 4.1: A4).

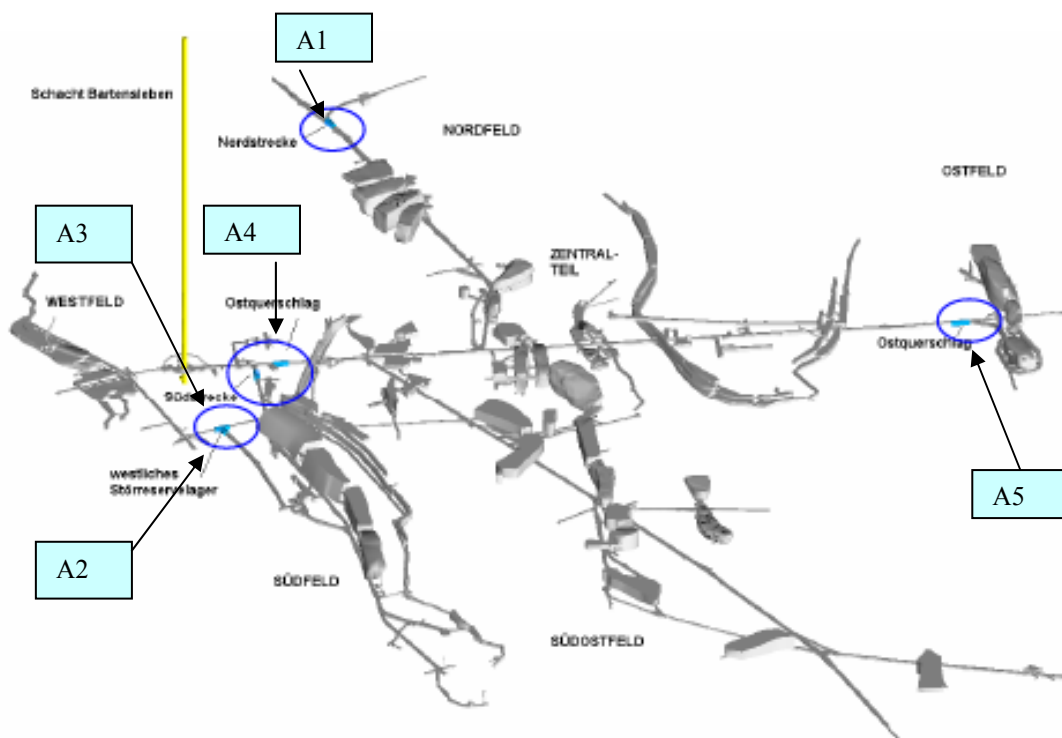


Bild 4.1: Lage der vorgesehenen temporären Abdichtungen auf der 4. Sohle des Grubengebäudes Bartensleben (nach Abb. 3.1-14 aus U16).

Eine vergleichende Gegenüberstellung der Ausführungen in U16 und U09 zeigt, dass in U16 insgesamt 5 Lokationen für temporäre Abdichtungen genannt werden (4 im Nord- und Südfeld, bestehend aus „Zement, Steinkohlenfilterasche und Wasser“ (U16, S. 173) und 1 im Ostfeld, bestehend aus „zementbasiertem Beton“ (U16, S. 173), während in U09 die Abdichtung im Ostquerschlag vor dem Ostfeld (→ Bild 4.1: A5) nicht genannt wird und auch keine Hinweise bzgl. unterschiedlicher Baustoffe dokumentiert sind.

### **Hinweis H1:**

Die in Bild 4.1 mit A5 gekennzeichnete temporäre Abdichtung ist in die langzeitstabile Abdichtung des Ostfeldes, die im Hauptanhydrit errichtet wird, integriert. Es werden danach 5 temporäre Abdichtungen errichtet.

Betriebliche Anforderungen an die bautechnische Herstellung der temporären Abdichtungen sind entsprechend den Ausführungen in U09:

- einfache technologische Herstellbarkeit,
- Einsatz handelsüblicher und genormter Baustoffe,
- Verwendung schwindarmer und wasserundurchlässiger Betone,
- kein Einsatz zusätzlicher Verdichtungsenergie,
- Bergbauzulassung der Baustoffe,
- Verwendung hydraulisch förderbarer und sedimentationsstabiler Baustoffe,
- ausreichende Verarbeitungszeit zur Vermeidung von Betonierfugen.

Als Auslegungsanforderungen an das Referenzbauwerk nennt die Unterlage U09 den gesicherten Lastabtrag aus max. 80m Überstauung (potentieller Fluiddruck zwischen der 2. und 4. Sohle Ostfeld) und Überlagerungsdruck im Niveau der 4. Sohle, eine technische Dichtheit von  $k \leq 10^{-15} \text{ m}^2$  über einen Zeitraum von ca. 12 Jahren, die Vermeidung von Horizontalfugen im Abdichtungsbauwerk und Umläufigkeiten zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge sowie eine hohe Korrosionsbeständigkeit der eingesetzten Baustoffe während des geforderten Abdichtungszeitraums. Die rechnerische Nachweisführung erfolgt auf Basis eines mit dem FEM-Programm ANSYS erstellten Berechnungsmodells. Das 3D-Modell bildet innerhalb eines 26m breiten, 49m tiefen und 47m hohen Berechnungsausschnittes einen Paralleldamm von  $B \times H \times L = 5,6\text{m} \times 5,0\text{m} \times 19\text{m}$  ab. Als schub- und druckfest miteinander verbundene Homogenbereiche werden der Beton des Abdichtungsbauwerkes mit einem linear elastischen Material (Stoffmodell Hooke) und das umgebende Salzgebirge mit einem viskosen Materialverhalten (Stoffmodell Norton) berücksichtigt. Die simulierte Belastungsgeschichte verzichtet gemäß Aussage in U09 *auf die Modellierung einer Jahrzehnte dauernden Standzeit. Die Betrachtung geht davon aus, dass das Nachschneiden der Strecke zum Entfernen der Auflockerungszone unmittelbar vor Bauwerkserrichtung im Gebirge zu einem Spannungszustand vergleichbar wie bei einer Neuauffahrung führt.*

Als relevante Bauzustände werden genannt:

1. Primärspannungszustand
2. spannungsfreier Einbau Salzbeton
3. Aufgabe Injektionsdruck
4. Einseitige Aufgabe Fluidruck
5. 12 Jahre viskoses Aufkriechen des Salzgebirges

Als Kriterien und Grenzwerte für den Nachweis der Standsicherheit nennt U09:

- \* Einachsige Druckfestigkeit Baustoff = 11,3 MPa > Beanspruchung
- \* Zugfestigkeit Baustoff = 1,5 MPa > Zugbeanspruchung
- \* Schubfestigkeit zwischen Baustoff und Gebirge = 0,4 MPa > Schubbeanspruchung

Im Ergebnis der Berechnungen wird ausgeführt: *Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in keinem Bauzustand kritische Materialbeanspruchungen oder Belastungen an der Fuge auftreten, die die Standsicherheit oder die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks gefährden.*

Für den Nachweis der Dichtigkeit wird unter Vorgabe der geometrischen Abmessungen des Abdichtungsbauwerkes, der Viskosität der NaCl-Lösung, des hydraulischen Gradienten und des geforderten Nachweiszeitraumes die erforderliche Permeabilität auf Grundlage der *Darcy*-Gleichung für den stationären Fluss berechnet. Sie beträgt für das Referenzbauwerk  $k_{\text{erf}} = 1,27 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ , womit der Nachweis gemäß Aussage in U09 erbracht ist.

## **4.2 Bewertung der temporären Abdichtungen**

### **4.2.1 Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis**

Vorbehaltlich der noch für erforderlich eingeschätzten rechnerischen Prüfung wird aufgrund der Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung von U09 eingeschätzt, dass durch die dokumentierten Ausführungen weder die Standsicherheit noch die Gebrauchstauglichkeit bzw. hinreichende Dichtheit der temporären Abdichtungen abschließend nachgewiesen ist. Begründet wird vorstehende Einschätzung wie folgt:

- (1) Die rechnerischen Nachweise verzichten ohne Not auf eine Berücksichtigung des Sekundärspannungszustandes im Gebirge (→ keine Modellierung des Sekundärspannungszustandes nach Streckenauffahrung und keine Modellierung des Sekundärspannungszustandes nach Nachschnitt der Streckenkontur).

- (2) Die Hydratationswärme des hydraulisch abbindenden Betons wird im Rahmen der rechnerischen Untersuchungen ebenso wenig berücksichtigt wie die aus der Hydratationswärme und der nachfolgenden Abkühlung resultierenden Thermospannungen.
- (3) Das tatsächlich visko-elastische Materialverhalten des Betons wird durch ein linear-elastisches Stoffmodell abgebildet. Der bei Ansatz eines tatsächlich visko-elastischen Betonverhaltens in Verbindung mit einem visko-elastischen Gebirge insbesondere in der Kontaktfuge resultierende Spannungszustand wird durch den Ansatz linear-elastischer Materialeigenschaften für den Beton nicht den realen Verhältnissen entsprechend berücksichtigt. Vielmehr führt die Kombination aus linear-elastischer Bauwerkskonstruktion und kriechfähigem Gebirge zu einer Überschätzung der radialen Einspannung des Bauwerkes und in der Folge zu einer nicht konservativen, sondern eher progressiven Bewertung der Schubbeanspruchung in der Kontaktfuge zwischen technischer Konstruktion und umgebendem Gebirge.
- (4) Der theoretisch auf die temporären Abdichtungen einwirkende Fluiddruck wurde auf Basis einer gesättigten NaCl-Lauge mit  $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$  zu  $p_{fl} = 0,94 \text{ MPa}$  festgelegt. Bei Ansatz einer IP21-Lösung mit  $\rho = 1292 \text{ kg/m}^3$  ist dagegen ein Fluiddruck von  $1,01 \text{ MPa}$  in Ansatz zu bringen. In der Konsequenz ist der in U09 (S.25) für die Bauwerkseinspannung geforderte Injektionsdruck von  $1 \text{ MPa}$  rechnerisch nur dann abdeckend, wenn eine Lösung von Kalisalzen bzw. die Entstehung einer IP21-Lösung ausgeschlossen werden kann.
- (5) Eine Berechnung / Abschätzung bzw. dann auch Berücksichtigung der in Folge dilatanter Beanspruchungen im Konturbereich auch der nachgeschnittenen Streckenstöße resultierenden erhöhten Sekundärpermeabilität erfolgt nicht. Eine gleich lautende Aussage gilt auch für die mechanisch-hydraulisch gekoppelte Belastung im konturnahen Gebirge.
- (6) Die grundsätzlich unterschiedlichen geometrischen Abmessungen der temporären Abdichtungsbauwerke und ihre unterschiedliche Teufenlage innerhalb des Grubengebäudes rechtfertigen nach Einschätzung der Prüfer nicht die Beschränkung der Nachweisführung auf ein Referenzbauwerk. Vorstehende Aussage gilt auch und insbesondere vor dem Hintergrund, dass bei thermomechanisch-hydraulisch gekoppelter Analyse des Trag- und Dichtigkeitsverhaltens aus einer zunehmenden Teufenlage abhängig vom betrachteten Bauzustand nachweisbezogen sowohl posi-

tive als auch negative Konsequenzen resultieren können (→ Zeit bis zum Aufkriechen des Gebirges, Verheilungsspannung, Superposition thermomechanischer und hydraulischer Beanspruchungen, Superposition thermisch und mechanisch induzierter Spannungen, etc.).

- (7) Geologische Details zur Ausbildung des Wirtsgesteins im Bereich der geplanten Dammstandorte werden nicht dokumentiert.
- (8) Der für die temporären Abdichtungsbauwerke planmäßig einzusetzende Baustoff ist nicht abschließend definiert. Während in U09 als Baustoff ein Beton der Festigkeitsklasse C20/25 gemäß DIN 10454-1:2001-07 genannt wird, wird gemäß U16 für die temporären Abdichtungsbauwerke ein Baustoff aus Zement, Steinkohlenfilterasche und Wasser genannt.

#### **Forderung F1:**

Die rechnerischen Nachweise zu Standsicherheit und Dichtheit der temporären Abdichtungsbauwerke sind entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik unter Berücksichtigung einer hinreichend realitätsnahen Abbildung des physikalischen Materialverhaltens durchzuführen.

#### **Forderung F2:**

Die im Bereich der Dammstandorte anstehenden geologischen Verhältnisse sind zu dokumentieren.

#### **Empfehlung E1:**

Zur Vermeidung von Missverständnissen sollte eine eindeutige Bezeichnung für den Baustoff gewählt werden.

#### **Empfehlung E2:**

Angesichts der Tatsache, dass die in U10 dokumentierten rechnerischen Einschätzungen zur maximalen Fluiddruckbelastung der Abdichtung im Hauptanhydrit den konservativen Lastfall einer IP21-Lösung ( $\rho = 1292 \text{ kg/m}^3$ ) berücksichtigen, ist der in U09 gewählte Ansatz einer ausschließlich auf Basis der Dichte von NaCl-Lauge ( $1200 \text{ kg/m}^3$ ) abgeleiteten Fluiddruckbelastung zu erläutern.

#### **4.2.2 Technische Realisierbarkeit**

Die Realisierbarkeit der Betonierungsarbeiten mittels hydraulischer Fernförderung wird auf der Basis der vorliegenden Erfahrungen und technischen Möglichkeiten aus dem Versatz mit Salzbeton als gegeben betrachtet. Eine analoge Aussage gilt nach Einschätzung der Prüfer für die Entfernung der ALZ (ggf. nach Feststellung ihrer Mächtigkeit durch Messungen vor Ort). Bezüglich der technischen Realisierbarkeit der Kontaktfugeninjektion über ein zentrales Befahrungs- und Injektionsrohr verweist der AS auf ein ausgeführtes Dammbauprojekt im Steinkohlenbergbau (BW AV/Blumenthal).

Von besonderer Bedeutung ist die Kontaktfugeninjektion nach Einschätzung der Prüfer insbesondere für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit. Die vom AS dokumentierte Technologie entspricht grundsätzlich dem Stand der Technik im Felsgebirge. Eine gleich lautende Aussage gilt für die Ausführungen zum Bauablauf, zum Zeitmanagement und zur Qualitätssicherung. Die für eine Anwendung der Technologie im ERA Morsleben wesentlichen Fragestellungen zur möglichen Anlösung der Rissufer bzw. der gebirgsseitigen Kontaktflächenufer durch die Anmachflüssigkeit des Injektionsmittels werden in U09 jedoch nicht bearbeitet. Auch fehlen in U09 nach Einschätzung der Prüfer Detail-Informationen zur Injektion der Kontaktfläche zwischen dem Dammbaumaterial und der Verfüllung des Befahrungs- und Injektionskanals, materialtechnologische Angaben zu den mit Injektionsmittel „A“ und Injektionsmittel „B“ bezeichneten Baustoffen und Planungen bzw. Ausführungen zu einer geeigneten Kontrolle der Injektionsmaßnahmen. Die Aussagen zur Realisierbarkeit der geplanten Kontaktfugeninjektion sind nach Einschätzung der Prüfer daher beschränkt auf das Steinkohlengebirge, d.h. ein Nachweis für die Übertragbarkeit der Technologie auf das Salzgebirge ist noch nicht erbracht.

#### **Forderung F3:**

Die Übertragbarkeit der Injektionstechnologie auf die im ERA Morsleben anstehenden Verhältnisse ist zu belegen.

#### **Forderung F4:**

Es sind geeignete Verfahren zur Kontrolle des Injektionserfolges in den Bauablauf zu integrieren. Eine Möglichkeit zur Überprüfung der angestrebten Einspannung des Baukörpers ist nach Einschätzung der Prüfer die Installation von mindestens 3 Druckmesszellen jeweils in



Bauwerksmitte im Bereich der Kontaktfuge. Die zugehörigen Messleitungen können mit den Injektionsleitungen vor dem Verschluss des Befahrungs- und Injektionsrohres im Baukörper entfernt werden. Für den zumindest indikativen Nachweis einer ausreichend geringen Kontaktfugenpermeabilität nach erfolgter Injektion wird eine Fluiddruckbeaufschlagung der Injektionsleitungen als geeignet erachtet.

**Forderung F5:**

Die materialtechnologischen Eigenschaften der verwendeten Injektionsmittel sind zu dokumentieren.

Der gemäß Ausführung in U09 mit  $p = 10$  bar vorgegebene Injektionsdruck wird messtechnisch im Bereich der Injektionspumpen erfasst. Bedingt durch hydraulische Reibungsverluste ist der in der Kontaktfuge anstehende Verpressdruck deutlich geringer als der Injektionsdruck der Pumpen. In U09 wird ohne weitere Erläuterungen die Normalspannung in der Kontaktfuge gleichmäßig verteilt zu 4 bis 7 bar (0,4 bis 0,7 MPa) angesetzt.

**Forderung F6:**

Angesichts der Bedeutung des in der Kontaktfuge anstehenden Verpressdruckes für die Nachweise zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit sind nach Einschätzung der Prüfer zahlenmäßige Ausführungen zur Einschätzung der Druckverluste zwischen Injektionspumpe und Kontaktfuge erforderlich.

## 5 Verschlussbauwerke im Steinsalz

### 5.1 Angaben des Antragstellers

Ausführungen zur Konzeptplanung, zur bautechnischen Realisierung, zu den verwendeten Materialien und zum Nachweis von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der im Steinsalz zu errichtenden Verschlussbauwerke finden sich in den Unterlagen U02 – U06, U08, U11 und U12. Zur Abgrenzung der im Steinsalz zu errichtenden Streckenabdichtungen gegen die in Abschnitt 4 behandelten temporären Abdichtungsbauwerke verwendet der AS die Bezeichnung „Streckenabdichtungen mit hohen Anforderungen“. Geplant ist im Rahmen der Stilllegung des ERA Morsleben insgesamt 21 Streckenabdichtungen mit hohen Anforderungen im Steinsalz zu errichten, um die mit radioaktiven Abfällen belegten Grubenbaue gegen einen potenziellen Zutritt von Lösungen abzudichten. In Einzelfällen sind lokal Kalibänder an den Abdichtungsstandorten im Streichen vorhanden. Sie werden im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises behandelt. Die Kalibänder erfordern eine spezielle Vorbehandlung der Oberflächen vor der Einbringung der Dichtelemente. Eine grundsätzlich andere Bauwerksauslegung ist nicht vorgesehen. Bezüglich der Lokation der Streckenabdichtungen und ihre Integration in das Verschlusskonzept wird auf die Ausführungen in Abschnitt 3 des Prüfberichtes und Bild 3.1 verwiesen. Zum Inhalt der vorstehend genannten Unterlagen bleibt festzuhalten:

#### ***U02 – Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und Materialkennwerte M2:***

Die Unterlage beinhaltet eine umfangreiche Dokumentation der an Salzbeton M2 (328kg/m<sup>3</sup> Zement, 328kg/m<sup>3</sup> Steinkohlenflugasche, 267kg/m<sup>3</sup> Wasser, 1072kg/m<sup>3</sup> Steinsalzzuschlag) durchgeführten Materialuntersuchungen. Dokumentiert werden rheologische Untersuchungen, Konsistenzmessungen, Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten und zur Bildung von Überschusslösung sowie physikalische Untersuchungen zu den mechanischen, hydraulischen und thermischen Eigenschaften des Materials. Im Ergebnis der Untersuchungen wird ausgeführt:

- Das rheologische Verhalten der Suspension folgt dem Fließgesetz von Herschel-Bulkley. Die Mindestdruckverluste betragen nach einer Stationierungszeit von 30 - 90 Minuten je nach verwendeter Rohrnennweite 0,6 bis 1,2 bar/100m.
- Die Druckverluste sind in etwa linear abhängig vom Wassergehalt der Rezeptur.

- Die Untersuchungen zum Ausbreitmaß nach DIN 1048 zeigen nach Abbindezeiten von maximal 90 Minuten Zahlenwerte von 65 und 70 cm und belegen damit ein gemäß Ausbreitklasse F6 (Ausbreitmaß  $\geq 63$  cm) als sehr fließfähig eingestuftes Material.
- Das gemäß Aussage in U02 nach der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ bestimmte Setzfließmaß wurde abhängig vom Wassergehalt zu 40cm bis 68 cm bestimmt.
- Der für die Einschätzung der Firstanbindung der Suspension ermittelte Fließwinkel des Salzbetons beträgt 0,7 Grad bzw. 1,25%.
- Anzeichen für Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen konnten auch bei Wassergehaltsabweichungen von -4% bis +10% nicht beobachtet werden.
- Die im Rahmen eines Freifallversuches durchgeführte visuelle und digitale Bildanalyse des Salzbetons zeigte einen gleichmäßigen Kornaufbau des Versatzkörpers.
- Kernbohrungen in den Versatzkörper des Freifallversuches bestätigen eine formschlüssige Anbindung des Versatzmaterials an das Salzgebirge und den Mauerwerksstoß. Der RQD-Wert der Salzbetonbohrkerne beträgt 100%.
- Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung haben gezeigt, dass die Bildung von Überschusslösung in den ersten 8 bis 24 Stunden nach Ausbringen des Salzbetons erfolgt. Die maximale Höhe der Überschusslösung beträgt 6 bis 12mm und ist unabhängig von der Füllhöhe (Untersuchungsbereich: Füllhöhe 0,17m bis 6,11m) des Salzbetons. Vier Tage nach Ausbringen des Salzbetons konnte in 9 von 12 Technikumsversuchen keine Überschusslösung nachgewiesen werden.
- Die nach DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.1 ermittelte Dichte des Salzbetons beträgt im Mittel von 38 bei 20°C und 65% relativer Luftfeuchtigkeit gelagerten Proben  $\rho = 1965$  kg/m<sup>3</sup>. Der Mittelwert von 15 bei 40°C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 30% gelagerten Proben wurde gemäß Aussage in U02 zu  $\rho = 1970$  kg/m<sup>3</sup> bestimmt.
- Der nach DIN 1048, Teil5, Abschnitt 7.5 ermittelte Elastizitätsmodul steigt mit zunehmender Abbindedauer an und beträgt nach einer Lagerungszeit von 28 Tagen im Mittel 25680 MPa.
- Die nach DIN 1048, Teil5 bestimmte Querkontraktionszahl des Salzbetons beträgt 0,33.
- Untersuchungen zur einaxialen Druckfestigkeit des Salzbetons nach DIN 1048, Teil 5, Abschnitt 7.2 belegen eine mit der Abbindedauer zunehmende Druckfestigkeit. Dokumentiert sind in U02 einaxiale Druckfestigkeiten von ca. 1,5 MPa nach drei Tagen Abbindedauer bis zu 33 MPa nach 530 Tagen Abbindedauer. Der Mittelwert der 28-Tage Druckfestigkeit wird zu 24,1 MPa angegeben.

- Triaxialversuche nach DIN 18137, Teil 2 zeigen eine mit der Minimalspannung und der Verformungsrate zunehmende Bruchfestigkeit.
- Die einaxiale Zugfestigkeit nach DIN 1048, Teil 5 beträgt nach einer Abbindedauer von 56 Tagen im Mittel 2 MPa. Nach einer Abbindedauer von 90 Tagen wird eine mittlere Zugfestigkeit von 3 MPa bestimmt.
- Das im Rahmen von 5 einaxialen Versuchen ermittelte Kriechverhalten des Salzbetons belegt eine mit zunehmender Axialspannung zunehmende und mit zunehmender Abbindedauer abnehmende Kriechrate des Salzbetons.
- Untersuchungen zum Schwindverhalten gemäß Heft 422 DAfStb zeigen gemäß Aussage in U02, dass der Schwindprozess nach einer Abbindedauer von 50 Tagen weitgehend abgeschlossen ist und das Endschwindmaß mit ca. 1,1mm/m angegeben werden kann.
- Die Porosität des Salzbetons wurde zu 17,8% bis 19,0% bestimmt.
- Die im Triaxialversuch an getrockneten Proben ermittelte Gaspermeabilität des Salzbetons ist geringfügig manteldruckabhängig und beträgt nach einer Abbindedauer von 92 Tagen ca.  $1\text{E}^{-18}$  m<sup>2</sup> bis  $5\text{E}^{-18}$  m<sup>2</sup>. Die Gaspermeabilität klimatisiert gelagerter Salzbetonproben beträgt abhängig vom Manteldruck ca.  $6\text{E}^{-20}$  m<sup>2</sup> bis  $9\text{E}^{-21}$  m<sup>2</sup>.
- Eine Permeabilität des Salzbetons gegenüber NaCl- und Q-Lösung war nicht nachweisbar.
- Zwei Versuche zur Bestimmung der Hydratationstemperatur im adiabatischen Kalorimeter belegen eine von der Anfangstemperatur abhängige Temperaturerhöhung um  $\Delta T = 47,7\text{K}$  bzw.  $\Delta T = 41,1\text{K}$ .
- Die nach DIN 51007 mittels Differentialthermoanalyse ermittelte spezifische Wärmekapazität des Salzbetons beträgt im Mittel  $c = 0,93$  J/(gK).
- Für die nach DIN 52612 bestimmte Wärmeleitfähigkeit wird als Mittelwert aus 4 Messungen ein Zahlenwert von  $\lambda = 1,14$  W/(mK) angegeben.
- Der nach DIN 51045 bestimmte Wärmeausdehnungskoeffizient des Salzbetons beträgt  $4,8 \cdot 10^{-5}$  1/K bei Aufheizung und  $3,2 \cdot 10^{-5}$  1/K in der Abkühlungsphase.

### ***U03 - Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Konzeptplanung und Nachweisführung***

Aufbauend auf einer kurzen Beschreibung der grundsätzlichen Zielstellungen des Stilllegungskonzeptes in Kap. 2 der Unterlage (weitgehende Vollverfüllung, hydraulische Trennung der Einlagerungsgrubenbaue West-Südfeld und Ostfeld von der Restgrube,

querschnittsgemittelter hydraulischer Anfangswiderstand der Abdichtungsbauwerke von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ ) werden die Standorte der geplanten Abdichtungsbauwerke bzgl. Lokation, Geologie und Abmessung skizziert. Im Ergebnis wird ausgeführt, dass an den ausgewählten Standorten Abdichtungen realisiert werden können, in einigen Strecken jedoch *für die Herrichtung der Zugänglichkeit und Gewährleistung der Arbeitssicherheit ein hoher Aufwand erforderlich* ist. Kap. 3 beinhaltet grundsätzliche Ausführungen zum Planungskonzept der Abdichtungen. Als konzeptionelle Charakteristika der Abdichtungsbauwerke werden genannt:

- Keine Trennung von Dichtelement und Widerlager (*Auf Grund der geologischen und bergbaulichen Situation ist die zur Verfügung stehende Länge für die Abdichtungen z.T. gering*)
- Einfache Konstruktion (*sägezahnartige u.ä. Konstruktionen sind zu vermeiden*)
- Verwendung von Materialien, für die im Salzbergbau eine technisch-wissenschaftliche Basis vorhanden ist (*für den Anwendungsfall müssen die Grundlagen einer mathematisch technischen Beschreibung vorhanden sein, technische Verwertbarkeit als Massenbaustoff muss gewährleistet sein, hinreichende Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit für den Betrachtungszeitraum muss gegeben sein*)
- Konstruktionsprinzip: Vollversatz ggf. mit Nachinjektion (*In Bezug auf die Abdichtungsposition ist zu zeigen, dass der Druck durch die auflaufende Konvergenz im zugrunde gelegten Betrachtungszeitraum ausreicht, um eine hinreichend geringe Permeabilität in der Auflockerungs- bzw. Kontaktzone zu gewährleisten.*)
- Segmentweiser Aufbau der Abdichtungen (*Für die Abdichtungen ist die Erstellung von hintereinander angeordneten Segmenten vorgesehen. Die Segmentlänge entspricht dabei den kleinsten sinnvoll anzuordnenden Längen von 15 – 30m, die als hydraulischer Widerstand wirksam werden sollen. Darüber hinaus gehende Abdichtungslängen werden durch plastische Fugen ... voneinander getrennt.*)
- Nachschnitt und Ausrundung der Streckenkontur zur Entfernung der Auflockerungszone (*Die Streckenkontur im Salz bzw. im Anhydrit wird auf ca. 20 – 50 cm nachgeschnitten.*)

Kapitel 4 der Unterlage beinhaltet Ausführungen zum Sicherheitsnachweiskonzept. Dazu wird zunächst gezeigt, dass im Rahmen einer Modellvorstellung, bei der die Kontaktzone zwischen Salzbeton und Gebirge als Trennriss abgebildet wird, die Einhaltung der Anforderung  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  lokal nicht gezeigt werden kann. Als Konsequenz wird ausgeführt: *Deshalb*

*sind genauere Untersuchungen erforderlich, die die Modellvorstellung belegen, dass die Kontaktzone keine besondere Schwächezone darstellt und die Permeabilitätsanforderung erfüllt. Es ist davon auszugehen, dass ein qualitativ hochwertiger kohäsiver Verbund zwischen Salzbetonkörper und Streckenkontur erzielt werden muss, um die Permeabilitätsanforderung zu erfüllen.* Begründet wird vorstehende Aussage in U03 durch überschlägige Berechnungen zur Durchflussrate bei Ansatz des Trennrissmodells und bei Ansatz des *Darcy'schen* Strömungsmodells. Danach kann *eine ausreichend geringe Durchflussrate für die Kontaktzone ... nur gezeigt werden, wenn eine ausreichende Vorspannung bzw. eine ausreichend geringe Permeabilität der Kontaktzone in Folge eines kohäsiven Verbundes zwischen Kontaktzone und umgebender Streckenkontur nachgewiesen werden kann.* In der Konsequenz vorstehend zitiert Aussagen dokumentiert Kap. 5 die für einen rechnerischen Nachweis von Standsicherheit und Dichtigkeit nach Einschätzung des AS zu führenden Einzelnachweise und Nachweiskriterien. Als Einzelnachweise sind danach zu führen:

- *Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes*
- *Nachweis der Lagesicherheit*
- *Nachweis der Rissbeschränkung*
- *Nachweis der Langzeitstabilität / Dauerhaftigkeit*

Im Rahmen der Einzelnachweise werden chemische Beanspruchungen durch gesättigte Salzlösungen, mechanische Beanspruchungen durch Eigengewicht, Gebirgsdruck und Lösungsdruck, thermische Beanspruchungen in Folge Hydratationswärme, materialtechnisch induzierte Beanspruchungen in Folge Schwinden und Kriechen des Salzbetons sowie bautechnische Beanspruchungen durch Verformungsbehinderungen zwischen Bauwerk und Baugrund behandelt. Unter Berücksichtigung der genannten Beanspruchungen werden sowohl für das Szenario „lange trockenes Endlager“ (kein Fluidruck innerhalb von 30000a) als auch für das Szenario „zugelaufenes Endlager“ (Zulauf innerhalb von 2500a) die als relevant erachteten Bemessungssituationen bzw. Bauzustände in Form von Gefährdungsbildern zusammengestellt und die den Gefährdungsbildern zugeordneten Nachweise und Nachweiskriterien erläutert. Kap. 6 dokumentiert schließlich für die nördliche Verbindungsstrecke 15YKA26R001 auf der 3. Sohle (-332 m NN) des Zentralteils die rechnerische Nachweisführung. Gemäß Aussage in U03 *besteht die Abdichtung nur aus einem einzigen Segment und stellt eine der auslegungsrelevanten Abdichtungen dar.* Mit Bezug auf die Ausführungen zu U06 bleibt hier anzumerken, dass zum Zeitpunkt der Erstellung der Unterlage U03 gemäß Aussage des AS in der Verbin-

dungsstrecke 15YKA26R001 die kürzeste und damit auch die auslegungsbezogen relevante Abdichtung des Systems anzuordnen war, *folglich wurde die Nachweisführung für ein Referenzbauwerk auf die Randbedingungen dieser Lokation aufgebaut. Im Zuge der weiteren Bearbeitung wurde jedoch festgestellt, dass auf der tiefer liegenden 4. Sohle an einer Lokation im Ostquerschlag ebenfalls nur eine Abdichtungslänge von 26m realisierbar ist, sodass mit U06 ein ergänzender Nachweis geführt wurde.*

Kapitel 6 dokumentiert aufbauend auf einer Beschreibung des Berechnungsmodells, der verwendeten Materialmodelle und Materialkennwerte die Ergebnisse von insgesamt fünf analysierten Berechnungsfällen BF0 bis BF4 (mechanische Berechnungen BF1 – BF4; thermische Berechnung BF0). Im Ergebnis der thermischen Berechnung BF0 wird gezeigt, dass das aus der Betontechnologie übernommene Temperaturkriterium zur Vermeidung hydratationsbedingter Risse (max.  $\Delta T$  innerhalb des Betonkörpers  $< 20^{\circ}\text{C}$ ) nur bei einer Einbringtemperatur von  $T < 2,4^{\circ}\text{C}$  d.h. nur bei geeigneter Kühlung der Salzbetonmischung erreichbar ist. Darauf hingewiesen wird, *dass die erforderliche Kühlung des Salzbetons ggf. entfallen oder verringert werden kann, wenn ein genaueres Modell für das Materialverhalten von Salzbeton zur Anwendung kommt, das eine thermomechanische Kopplung unter Berücksichtigung von Kriech- bzw. Relaxationsprozessen beinhaltet*, sodass durch eine Gegenüberstellung zulässiger und berechneter Spannungen im Salzbetonkörper ein zum Temperaturkriterium alternativer Nachweis auf Basis eines Spannungskriteriums geführt werden kann. Ein derartiger alternativer Nachweis wird gemäß Aussage in U03 derzeit erarbeitet.

Die in U03 dokumentierten mechanischen Berechnungsfälle BF1 und BF2 beschreiben das Tragverhalten für das Szenario eines über 30.000a trockenen Endlagers. Im Berechnungsfall BF1 wird für den Salzbeton aufbauend auf der hydratationsabhängigen Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit ein elastoplastischer Ansatz nach *Drucker-Prager* verwendet, im Berechnungsfall BF2 wird der Salzbeton mit dem Stoffmodell BGRa (Kriechklasse 0) als kriechfähiges Material abgebildet. Die in BF1 und BF2 simulierte Betriebsgeschichte ist charakterisiert durch:

- a) Primärspannungszustand
- b) Elastische modellierter Ausbruch der Strecke
- c) Kriechberechnung bis zum Nachschnitt der Auflockerungszone
- d) Elastisch modellierter Ausbruch der Auflockerungszone

- e) Kriechberechnung ( $\Delta t = 1$  Monat zur Simulation der Standzeit zwischen Nachschnitt Auflockerungszone und Einbau Abdichtung)
- f) Einbau Salzbeton (Aktivierung *Drucker-Prager* bzw. Kriechmodell)
- g) Kriechberechnung bis  $t = 30000a$

Darauf hinzuweisen ist, dass gemäß Ausführung in U03 *für die mechanischen Berechnungen eine konstante Temperatur angenommen und diese in den Stoffgesetzen für das Kriechen und das Hydratationsmodell berücksichtigt wird*. Begründet wird die Vernachlässigung der Temperaturentwicklung in Folge Hydratation durch die Aussage, *dass durch die vorlaufenden Temperaturberechnungen gezeigt wird, dass der Temperatureinfluss vernachlässigt werden kann*. Die in U03 weiterhin dokumentierten Berechnungsfälle BF3 und BF4 unterscheiden sich von BF1 durch die Berücksichtigung eines zwischen  $t = 100a$  und  $t = 2500a$  nach Herstellung des Abdichtungsbauwerkes (BF3) bzw. zwischen  $t = 2400a$  und  $t = 2500a$  nach Herstellung des Abdichtungsbauwerkes von 0 auf 6 MPa ansteigenden einseitig angreifenden Fluiddruckes (BF4).

Für die Bewertung der rechnerisch ermittelten Beanspruchungen werden gemäß Ausführung in U03 herangezogen:

- a) Festigkeitskriterium (Salzbeton):

Für den Zeitraum bis ca. 100a nach Herstellung des Abdichtungsbauwerkes erfolgt der Nachweis der Rissbeschränkung durch die Gegenüberstellung der auf Basis des Hydratationsmodells abgeleiteten Bruchbedingung nach *Drucker-Prager* mit den rechnerisch ermittelten Spannungen im Salzbeton.

- b) Dilatanzkriterium (Steinsalzgebirge):

Gegenüberstellung der Dilatanzfestigkeit nach *Hunsche* mit den rechnerisch ermittelten Spannungen

- c) Effektives Dilatanzkriterium (Steinsalzgebirge):

Die rechnerisch ermittelten Spannungen für das trockene Endlager werden unter Ansatz eines fiktiven Porendruckes von 6 MPa reduziert und mit der Dilatanzfestigkeit verglichen.

- d) Fluidkriterium (Steinsalzgebirge):

Vergleichende Gegenüberstellung der im Salzgebirge berechneten minimalen Hauptspannung mit dem potentiellen Lösungsdruck von  $p = 6$  MPa



Im Ergebnis der Auswertungen wird ausgeführt: Für die mechanischen Berechnungsfälle BF1, BF2 und BF4 wird durch die Einhaltung der Kriterien gezeigt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Risse entstehen bzw. in der Auflockerungszone kein Risswachstum erfolgt. Auch für den Berechnungsfall BF3 lässt sich feststellen, dass der Nachweis der Rissbeschränkung geführt werden kann, wenn man den zeitlichen Verlauf des Druckanstiegs berücksichtigt.

***U04 - Verfüllen von Strecken mit hoher Anforderung – Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton und Nachweiskonzept für das südliche Wetterrolloch)***

U04 dokumentiert rechnerische und experimentelle Untersuchungen zum Nachweis der sogenannten *Rissfreiheit* bzw. *Rissbeschränkung* der in den *Strecken mit hohen Anforderungen* und im *südlichen Wetterrolloch* planmäßig zu errichtenden Abdichtungsbauwerke. Mit dem hypothetischen Ansatz, dass eine Abkühlung der Verschlussbauwerke nach Hydratation des Salzbetons in thermisch induzierten Zugrissen mit der möglichen Konsequenz einer Verminderung des hydraulischen Widerstandes resultiert, ist es Ziel der Unterlage aufzuzeigen, dass die Materialeigenschaften des eingesetzten Baustoffs und die Verbundeigenschaften zwischen Baustoff und Salzgebirge in Verbindung mit einer Injektion des Ringraums zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge geeignet sind, den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit der Abdichtungsbauwerke zu führen. Das hierzu in U04 vorgestellte Nachweiskonzept basiert methodisch auf vier Teilnachweisen wie folgt:

- (1) Laborativer Nachweis, dass die hydrationsabhängige Zugfestigkeit des Salzbetons deutlich größer ist als die hydrationsabhängige Zugfestigkeit des Kontaktbereiches Salzbeton-Salzgebirge (→ Aufreißen der Kontaktfuge).
- (2) Rechnerischer Nachweis, dass bei Ansatz der unter (1) ermittelten Materialeigenschaften ein potentiell Versagen des Verbundsystems „Abdichtungsbauwerk-Salzgebirge“ grundsätzlich auf die Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge beschränkt ist bzw. permeabilitätserhöhende Längsrisse im Abdichtungsbauwerk ausgeschlossen werden können.
- (3) Rechnerischer Nachweis, dass die potentiell in der Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge induzierten Risse durch die nachträgliche Injektion mit einem Injektionsdruck von mindestens 2 MPa verschlossen werden können.

- (4) Verbal-argumentativer Nachweis, dass durch das Aufkriechen des Gebirges langfristig der hydraulische Widerstand des Verbundsystems erhöht wird.

Zu (1) - Laborativer Nachweis, dass die hydrationsabhängige Zugfestigkeit des Salzbetons deutlich größer ist als die hydrationsabhängige Zugfestigkeit des Kontaktbereiches Salzbeton-Salzgebirge:

Der Nachweis unter (1) erfolgt auf der Grundlage probabilistischer Betrachtungen zur Versagenswahrscheinlichkeit, indem die hydrationsabhängige Zugfestigkeit des Salzbetons als Widerstand  $R$  und die hydrationsabhängige Haftzugfestigkeit zwischen Salzbeton und Salzgebirge als maximal mögliche Beanspruchung  $E$  definiert werden. Durch die mathematische Verschneidung der experimentell belegten Streuungen von  $R$  und  $E$  wird die Versagenswahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit, dass die Haftzugfestigkeit in der Kontaktfuge größer ist als die Zugfestigkeit im Salzbeton berechnet. Im Ergebnis der Auswertungen wird ausgeführt, dass *die Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung im Betonkörper für beliebige Altersstufen  $t_e \geq 10$  Tage weniger als 0,02% beträgt* (d.h. in 2 von 10000 Fällen besteht die Wahrscheinlichkeit eines Versagens), *wenn man für die beiden Eingangsgrößen Normalverteilungen zugrunde legt.*

Zu (2) - Rechnerischer Nachweis, dass bei Ansatz der unter (1) ermittelten Materialeigenschaften ein potentiell Versagen des Verbundsystems „Abdichtungsbauwerk-Salzgebirge“ grundsätzlich auf die Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge beschränkt ist bzw. permeabilitätserhöhende Längsrisse im Abdichtungsbauwerk ausgeschlossen werden können:

Für den Nachweis unter (2) wird auf der Grundlage rechnerischer Untersuchungen gezeigt, dass während der Hydrationsphase die maximale Schubbeanspruchung immer am Außenrand des Salzbetonkörpers ansteht, sodass auch eine potentielle Überschreitung der Schubfestigkeit zu einem Versagen im Saumbereich des Abdichtungsbauwerkes führt. Das für die rechnerischen Untersuchungen verwendete FE-Berechnungsmodell bildet einen prismatischen Betonkörper von 5,5m Breite x 4,6m Höhe x 26,0m Länge mit ausgerundeten Ecken ab. Sowohl das angrenzende Steinsalzgebirge als auch der Betonkörper werden linear-elastisch ohne Berücksichtigung der hydrationsabhängigen Wärme- und Festigkeitsentwicklung modelliert. Zur Begründung wird ausgeführt: *Plastische Materialeigenschaften müssen in der hier beschriebenen Untersuchung nicht angesetzt werden, da lediglich der qualitative Verlauf der*

*Schubspannungen beziehungsweise der einachsigen Vergleichsspannung von Bedeutung ist, um den Ort zu bestimmen, an dem das Versagen auftritt. Im letzten Bauzustand wird der Dammkörper gleichmäßig erwärmt, was zu einem Zwang im Bauwerk und im angrenzenden Gebirge führt. Eine Untersuchung mit exakter Temperaturverteilung, die den Zwang im Bauwerk selbst untersucht, ist an dieser Stelle nicht notwendig. Die Schubfestigkeit in der Fuge zwischen Salzgebirge und Salzbeton wird in U04 auf der Grundlage theoretischer Überlegungen eingeschätzt. Bezüglich einer experimentellen Festlegung wird ausgeführt: *Versuche zur Bestimmung der Schubfestigkeit in der Fuge zwischen Salzgebirge und Salzbeton sind komplizierter und weniger belastbar als Versuche zur zentralen Zugfestigkeit. Eine Beurteilung der Schubfestigkeiten aufgrund von Experimenten stellt sich daher als schwierig dar.* Nachdem gemäß Aussage in U04 durch die vorstehend skizzierten Nachweise unter (1) und (2) gezeigt ist, dass sich Risse in der Fuge zwischen Salzgebirge und Salzbetonbauwerk aufgrund der Zwangsbedingungen eher ausbilden als im Salzbetonkörper selbst, werden für den Nachweis der Rissfreiheit bzw. Rissbeschränkung des Betonkörpers numerische Berechnungen mit dem 2,5D-Temperaturprogramm HEAT 2,5D (Femmasse) zur Simulation der Herstellung der Streckenverschlüsse ausgeführt. Das für die thermomechanischen Berechnungen verwendete Berechnungsmodell bildet unter Ausnutzung der Bauwerkssymmetrie ein Abdichtungsbauwerk von 5,7m Breite x 4,6m Höhe x 25m Länge mit angrenzendem Salzgebirge ab. Das Salzgebirge wird in einer Mächtigkeit von 10m berücksichtigt. Die Modellabmessungen betragen 12,85m Breite x 24,6m Höhe x 25m Länge. Darstellungen zur Diskretisierung des Berechnungsmodells und Angaben zur Anzahl der verwendeten Knotenpunkte und Elemente sind in U04 nicht enthalten. Zur Belastungsgeschichte wird lediglich ausgeführt, dass die *Betoniergeschwindigkeit durch eine lagenweise Anordnung von horizontalen FE-Lamellen in Abhängigkeit von der Zeit abgebildet wurde.**

Die Berücksichtigung der hydratationsabhängigen Zug- und Druckfestigkeit sowie des hydratationsabhängigen Steifemoduls des Salzbetons erfolgt gemäß Aussage in U04 in Form eines Polygonzuges, bestehend aus Wertepaaren des wirksamen Betonalters mit den zugehörigen Materialparametern.

Eine Berücksichtigung des Kriechverhaltens des Salzbetons erfolgt im Rahmen der rechnerischen Untersuchungen gemäß Aussage in U04 durch so genannte Maxwellketten, die das vom Prüfalter abhängige visko-elastische Verformungsverhalten berücksichtigen. Grundlage für

die Quantifizierung des Kriechverhaltens des Salzbetons sind gemäß Aussage in U04 Zugkriechversuche an Prüfkörpern unterschiedlichen Alters. Eine Dokumentation der Zugkriechversuche erfolgt in U04 nicht. Die Darstellung beschränkt sich vielmehr auf eine tabellarische und graphische Zusammenstellung der ermittelten Kriechzahlen ( $\rightarrow$  Kriechzahl  $\varphi = \frac{\varepsilon_{ges} - \varepsilon_s - \varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}}$  mit  $\varepsilon_{ges}$  = Gesamtdehnung;  $\varepsilon_s$  = Schwinddehnung;  $\varepsilon_{el}$  = elastische Anfangsdehnung in Folge Belastung).

Bezüglich der für das umgebende Steinsalzgebirge in U04 angesetzten thermischen und elastischen Materialkennwerte bleibt zunächst festzuhalten, dass mit Ausnahme eines geringfügig von  $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  auf  $4,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  reduzierten Wärmeausdehnungskoeffizienten die sonst üblichen Materialkennwerte angesetzt wurden. Vorstehende Aussage gilt jedoch ausdrücklich nicht für die mechanischen Materialeigenschaften des umgebenden Salzgebirges. Hierzu wird ausgeführt: *Das Salzgebirge wurde in der Simulation mechanisch als linear elastisch angenommen. Kriechen bzw. Relaxation wurden nicht berücksichtigt.*

Im Ergebnis der rechnerischen Untersuchungen wird ausgeführt, *dass es nahezu ausgeschlossen ist, das Bauwerk unter den vorgegebenen Randbedingungen (Temperatur, Frischbetontemperatur, Behinderungsgrad Bauwerk-Gebirge) rissfrei herzustellen, wenn in den Berechnungen ein vollständiger Verbund unterstellt wird. Die Versuche erbringen den Nachweis, dass es gerechtfertigt ist, in der Berechnung eine geschwächte Verbundzone zwischen Salzbetonkörper und Gebirge mit reduzierten Festigkeitseigenschaften anzusetzen. Dies hat zur Folge, dass die Konturzone frühzeitig durch Rissbildung versagt... Die Zwangsbehinderung wird durch diese Risse in der Auflockerungszone nachhaltig verringert, sodass die Rissgefahr im Salzbetonkörper ... reduziert wird.*

Zu (3) - Rechnerischer Nachweis, dass die potentiell in der Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge induzierten Risse durch die nachträgliche Injektion mit einem Injektionsdruck von mindestens 2 MPa verschlossen werden können:

Unter Bezug auf Teilnachweis (3) werden in Kapitel 5 Ausführungen zur Injektion der Saumzone zwischen Betonkörper und Salzgebirge dokumentiert. Für den Teilnachweis zu (3) wird gezeigt, dass bei einem Injektionsdruck von  $p_{injektion} = 2,0 \text{ MPa}$  (Anfangsdruck) das Fluidkriterium im Lauf der Zeit eingehalten wird, wenn eine maximale Zuflussrate von  $260 \text{ m}^3/\text{a}$  ( $\rightarrow$  Fluiddruckaufbau) und eine Konvergenzrate von  $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$  ( $\rightarrow$  Kontaktdruckaufbau)

angesetzt werden. Ob der Nachweis zu (3) durch eine Berechnung geführt wurde, bei der der Injektionsdruck im Rahmen der numerischen Simulation als Einwirkung berücksichtigt wird, oder lediglich durch eine Abschätzung, bei der der Injektionsdruck den elastisch-plastisch berechneten Spannungen überlagert wird, ist in U04 nicht ausgeführt.

Zu (4) – Verbal-argumentativer Nachweis, dass durch das Aufkriechen des Gebirges langfristig der hydraulische Widerstand des Verbundsystems erhöht wird:

Der Teilnachweis zu (4) erfolgt schließlich verbal-argumentativ durch Analogieschlüsse zum Asse-Vordamm und Ausführungen zur langfristigen Verheilung dilatant beanspruchter Gebirgsbereiche im Saumbereich des Abdichtungsbauwerkes.

### ***U05 - Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen – Konzept- und Systembeschreibung***

U05 beschreibt zunächst das grundsätzliche Verfüll- und Verschlusskonzept für das ERA Morsleben. Wie vorstehend bereits ausgeführt, ist danach beabsichtigt, durch eine weitgehend vollständige Verfüllung des Grubengebäudes mit hydraulisch abbindendem Versatz die Integrität der geologischen Barrieren im jetzigen Zustand zu gewährleisten und für den Fall potentiell zutretender Lösungen mögliche Umlösevorgänge zu minimieren. Zusätzlich zur weitgehenden Vollverfüllung des Grubengebäudes ist geplant, einen möglichen Kontakt von Lösungen mit abgelagerten Abfällen einerseits und einen möglichen Austritt kontaminierter Lösungen aus den Einlagerungsbereichen andererseits durch qualifizierte Abdichtungen weitgehend zu behindern. Hierzu sind gemäß Aussage in U05 die Einlagerungsbereiche West-Süd-Feld und Ostfeld hydraulisch von der Restgrube zu trennen. Eine Abdichtung der weiteren Einlagerungsbereiche Nordfeld, Zentralfeld und Untertagemessfeld (UMF) ist nach Aussage in U05 wegen der dort vorliegenden Abbaukonfiguration und der geomechanischen Verhältnisse nicht möglich. Erforderlich für die hydraulische Trennung der Einlagerungsbereiche West-Süd-Feld und Ostfeld von der Restgrube ist gemäß den Ausführungen in U05 die Errichtung von insgesamt 22 Streckenabdichtungen. Die Unterlage listet die Standorte der 22 Abdichtungen (20 Abdichtungen im Steinsalz, 1 Abdichtung im Anhydrit, 1 Abdichtung teilweise im Kalisalz) tabellarisch auf und zeigt sohlrißliche Darstellungen zur Lokation der Streckenabdichtungen im Grubengebäude. Als hydraulische Anforderung an die Abdichtungsbauwerke nennt die Unterlage einen *querschnittsgemittelten hydraulischen Widerstand* von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$ . Die Auslegung der Abdichtungsbauwerke erfolgt für das Szenario maximal möglicher

Lösungsdruck als einseitige Belastung. Als Nachweise werden gemäß Aussage in U05 in separaten Unterlagen erbracht:

- \* *der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes,*
- \* *der Nachweis der Langzeitsicherheit,*
- \* *der Nachweis der Rissbeschränkung sowie*
- \* *der Nachweis der erforderlichen Dauer der Funktionstüchtigkeit.*

Bezüglich der Konstruktion der Streckenabdichtungen wird ausgeführt, dass eine Abdichtung aus bis zu 10 ca. 25 m langen Abdichtungssegmenten besteht, die hintereinander angeordnet und durch plastische Fugen voneinander getrennt werden. *Mindestens ein Abdichtungssegment pro Streckenabdichtung wird injiziert. Durch die Injektion des Saumbereiches mit einem Injektionsdruck von ca. 2 MPa wird sichergestellt, dass ein sofortiger formschlüssiger Verbund zwischen Abdichtung und Gebirge hergestellt wird.* Die zur Überwachung der qualitätsgesicherten Bauwerkserstellung geplanten Maßnahmen werden in Abschnitt 5 der Prüfunterlage dokumentiert.

#### ***U06 - Numerische Untersuchungen zur Übertragbarkeit der exemplarischen Nachweisführung der Streckenabdichtungen von der 3. Sohle auf die 4. Sohle***

U06 beinhaltet im Wesentlichen eine Ergänzung zu U05 „Verfüllung von Strecken mit hoher Anforderung – Konzept und Systembeschreibung“. Gemäß Ausführung in U06 war *zum Zeitpunkt der Erstellung der Unterlage U05 die kürzeste und damit relevante Abdichtung des Systems die nördliche Verbindungsstrecke zwischen den Kalilagern B und C auf der dritten Sohle mit einer Länge von ca. 26m. Folglich wurde die Nachweisführung für ein Referenzbauwerk auf die Randbedingungen dieser Lokation aufgebaut. Im Zuge der weiteren Bearbeitung wurde jedoch festgestellt, dass auf der tiefer liegenden 4. Sohle an einer Lokation im Ostquerschlag ebenfalls nur eine Abdichtungslänge von ca. 26m realisierbar ist.* Mit Hilfe von Vergleichsberechnungen zur 3. Sohle wird in U06 gezeigt, *dass die numerische Modellierung im Wesentlichen die gleichen Ergebnisse liefert wie die Berechnungen zur 3. Sohle.* Im Ergebnis der rechnerischen Untersuchungen wird ausgeführt, *dass der Ausnutzungsgrad auf der 4. Sohle zwar erwartungsgemäß höher ist als auf der 3. Sohle, der Sicherheitsnachweis sich aber für beide Lokationen in gleicher Weise führen lässt.*

### ***U08 - Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton von Streckenverfüllungen***

Die Ausführungen in U08 sind weitgehend identisch mit Kap. 4 der Unterlage U04. Dokumentiert werden experimentelle und numerische Untersuchungen zur Abschätzung der Rissgefahr im Salzbeton während der Erhärtung. Auf eine wiederholende Darstellung wird unter Verweis auf die Ausführungen zu U04 verzichtet.

### ***U11 – Injektion von Abdichtungssegmenten mit Feinstsuspensionen***

U11 dokumentiert grundlegende material- und bautechnologische Untersuchungen zur Abdichtung der Kontaktfuge zwischen Salzgebirge und Abdichtungsstruktur durch Injektion von Feinstsuspensionen. Zur Veranlassung der Untersuchungen wird ausgeführt: *Der zunächst formschlüssig eingebrachte Salzbeton unterliegt nach bisherigen auf Laborversuchen resultierenden Erkenntnissen einem autogenen Schwinden und einer thermischen Kontraktion. Als Folge kann eine Fuge zum anstehenden Steinsalz nicht ausgeschlossen werden.* Aufbauend auf den in U02 dokumentierten Laboruntersuchungen an Salzbeton M2 wird für das Schwindmaß ein Maximalwert von 1‰ angesetzt, sodass sich bei einem abzudichtenden Streckenquerschnitt von 5m Höhe und 5m Breite *an den beiden seitlichen Flanken eine etwa 2,5 mm breite und an der Firste eine 5 mm hohe „Kontaktfuge“* ausbilden kann. Zur Erfüllung der Forderung nach einer „gemittelten Anfangspermeabilität“ (→ integrale Permeabilität vor dem Aufkriechen des Gebirges) von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  bzw.  $k_f \approx 10^{-11} \text{ m/s}$  ist gemäß Aussage in U11 beabsichtigt, durch Injektion der Kontaktfuge mit Feinstsuspension den Dammkörper aus Salzbeton mit dem umgebenden Salzgebirge zu verbinden. Als mögliche Injektionsmittel werden in U11 die in der Geotechnik vielfach eingesetzten und standardisiert verfügbaren Feinstbindemittel MIKRODUR R-U und Ultrafin 12 hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Wesentlich für den Injektionserfolg ist gemäß Ausführung in U11, dass es aus technischen und physikalischen Gründen nicht möglich ist, *mit einer feststoffhaltigen Suspension eine sich theoretisch auf 0 mm verjüngende Kluft vollständig aufzufüllen.* Die vor dem Hintergrund vorstehender Aussage für die Kontaktfugeninjektion entwickelte Modellvorstellung zeigt Bild 5.1. Danach ist die Kontaktfuge charakterisiert durch einen vollständig verfüllbaren Abschnitt oberhalb einer insbesondere von der Korngröße des Suspensionsmittels abhängigen Kluftweite, durch einen als so genannte Kluftwurzel bezeichneten nicht verfüllbaren Abschnitt unterhalb einer von der Korngröße des Suspensionsmittels abhängigen Kluftweite und durch einen dazwischen lokalisierten nur teilweise verfüllbaren Abschnitt.

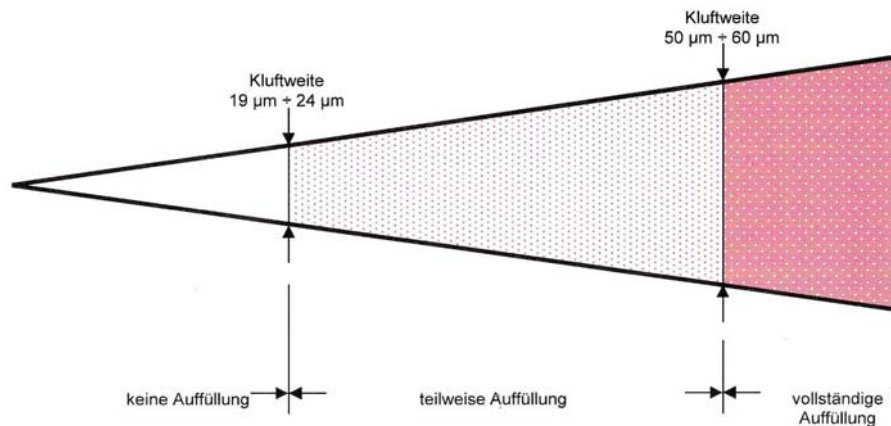


Bild 5.1: Modellvorstellung einer zu verpressenden Kluft in der Kontaktzone /U11/

Die Grenzen zwischen den vorstehend skizzierten Abschnitten werden vom repräsentativen maximalen Korndurchmesser  $d_{95}$  der eingesetzten Feinstbindemittel bestimmt. Er gibt an, welcher Anteil (in Massen-%) der Korngrößen des trockenen Feinstbindemittels gleich oder kleiner als  $d_{95}$  ist. In U11 untersucht wurden die Materialien MIKRODUR R-U mit einem Wert von  $d_{95} = 9,5 \mu\text{m}$  und Ultrafin 12 mit  $d_{95} = 12 \mu\text{m}$ . *Damit die zur Verpressung der Kontaktfuge vorgesehene Feinstbindemittelsuspension aus abdichtungstechnischen Gründen einen möglichst hohen Feststoffanteil ausweist, wurde der Wasser-/Bindemittel-Wert zu 1 gewählt.* Mit dem Ziel, das Lösungspotential der Suspension gegenüber dem anstehenden Steinsalzgebirge zu reduzieren, können gemäß Aussage in U11 mindestens etwa 30% des Anmachwassers durch eine gesättigte Salzlösung substituiert werden. Weitere gemäß Aussage in U11 noch nicht abgeschlossene Untersuchungen zur Abhängigkeit der Fließfähigkeit der Feinstbindemittelsuspension vom Salzgehalt des Anmachwassers haben gezeigt, dass sogar etwa 80 Massen-% - 90 Massen-% der Anmachflüssigkeit durch gesättigte Salzlösung ersetzt werden können.

Zur Gewährleistung einer ausreichenden Fließfähigkeit der Suspension wird in U11 eine Marsh-Zeit von etwa 40s vorgegeben. Wesentlichen Einfluss auf die Reichweite der Suspension in den Klüften und auf die Anlösung des Salzgesteins der Kluftufer hat darüber hinaus das Absetzverhalten der Suspension (Suspensionsstabilität). Als Grenzwerte für das Absetzmaß der frisch aufbereiteten Suspension werden in U11 daher vorgegeben: 2 Volumen-% nach einer Standzeit der frisch aufbereiteten Suspension von 2 Stunden und 5% nach einer Standzeit von 4 Stunden.



Für die Festigkeits- und Permeabilitätseigenschaften des Feinstbindemittels werden eine einaxiale Druckfestigkeit von  $\beta_{1u} = 6 \text{ N/mm}^2$  (DIN 18136; Baugrund-Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch) und eine Wasserdurchlässigkeit  $k_f \leq 10^{-11} \text{ m/s}$  (DIN 18130; Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes) gefordert. Neben den vorstehend skizzierten Anforderungen an die rheologischen und physikalischen Materialeigenschaften werden in U11 als allgemeine Anforderungen an die Verpresstechnik bzw. die Verpresstechnologie genannt:

- Die Verpresstechnik muss sicherstellen, *dass die Kontaktfuge möglichst vollständig mit dem Injektionsmaterial aufgefüllt und abgedichtet wird.*
- *Nach Abschluss der Injektionsarbeiten dürfen keine durchgehenden Bauteile in Längsrichtung des Abdichtungselements verbleiben.*
- *Es müssen mehrfache, zeitlich aufeinander folgende Injektionen von denselben Einpresspunkten aus möglich sein.*
- Möglicherweise in der Kontaktfuge vorhandene gasförmige oder wässrige Phasen müssen durch die Verpressung abgepresst und nach außen geführt werden können.

Die zur Überprüfung der vorstehend skizzierten Anforderungen durchgeführten Materialuntersuchungen werden in Kapitel 3 der Unterlage U11 dokumentiert. Danach haben die Untersuchungen an Feinstbindemittel vom Typ MIKRODUR R-U ( $d_{95} = 9,5 \text{ }\mu\text{m}$ ) gezeigt, dass das Material *über die erforderliche Aufbereitungs- und Verarbeitungsfähigkeit sowie einen erkennbaren Haftverbund zum Steinsalz verfügt, aber die erforderliche Stabilität bei Lagerung in Leitungswasser oder Steinsalzlösung nicht gegeben ist. Die Probekörper zerfielen innerhalb weniger Tage in mehrere zusammenhängende Teile. Aufgrund der Ergebnisse wurde das Feinstbindemittel MIKRODUR R-U zunächst von den weitergehenden Untersuchungen zur Durchlässigkeit und zur Langzeitsicherheit zurückgestellt.*

Die an Feinstbindemittel vom Typ Ultrafin 12 ( $d_{95} = 12 \text{ }\mu\text{m}$ ) durchgeführten Laboruntersuchungen haben *eine anforderungskonforme Aufbereitungs- und Verarbeitungsfähigkeit nachgewiesen. Die abgebundene Suspension blieb sowohl in Leitungswasser als auch in gesättigter Steinsalzlösung stabil.* Die einaxiale Druckfestigkeit von Proben, bei denen 30 Massen-% des Anmachwassers durch eine gesättigte Steinsalzlösung ausgetauscht wurden, beträgt nach einer Aushärtungszeit von 56 Tagen  $\beta_{1u} = 12 \text{ MPa}$ . Erste Untersuchungen zur Lösungsp-

meabilität zeigen gemäß Aussage in U11 eine Durchlässigkeit in der Größenordnung von  $K = 5 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ .

Kapitel 4 der Unterlage U11 beschreibt Untersuchungen zur Injektionsfähigkeit von Kluftsystemen. Bestimmend für den Injektionserfolg von Mikroklüften mit Kluftweiten  $D_{\text{Kluft}} < 100 \text{ } \mu\text{m}$  (0,1 mm) ist danach das Verhältnis  $N = D_{\text{Kluft}}/d_{95}$ . *„Ab einem Verhältnis  $N$  oberhalb von 5 bis 8 kann von einer vollständigen Verfüllung ausgegangen werden. Sobald die letztgenannten Verhältniswerte unterschritten werden, setzen sich Partikel aus der Suspension als sogenanntes Sperrkorn fest. Anschließend bildet sich zunächst in der näheren Umgebung des Sperrkorns ein sogenannter Filterkuchen aus, der die Suspension daran hindert, die Kluft weiter auszufüllen.“* (U11, S. 20). *„Allgemein kann ...von einer wirksamen Verpressung bis herab auf eine Kluftweite von dem 5- bis 8-fachen des charakteristischen Durchmessers  $d_{95}$  ausgegangen werden.“* (U11, S. 20/21). *Dies entspricht für die untersuchten Feinstbindemittel mit charakteristischen Korndurchmessern von  $d_{95} = 9,5 \text{ } \mu\text{m}$  beziehungsweise  $d_{95} = 12 \text{ } \mu\text{m}$  zumindest rechnerisch Kluftweiten in Größenordnungen zwischen  $48 \text{ } \mu\text{m}$  und maximal  $96 \text{ } \mu\text{m}$ .*

Gemäß Aussage in U11 ist jedoch darauf hinzuweisen, *dass die Hydratation des Feinstbindemittels trotz des üblichen Einsatzes von verzögernd wirkenden Zusatzmitteln zumindest bei einem Teil der dispergierten Partikel unmittelbar nach dem Anmischen der Suspension einsetzt. Dies führt zur sofortigen Bildung von Hydratationsprodukten und als Folge zu einem Anwachsen einzelner Zementpartikel.*

Das in Kapitel 5 der Unterlage U11 dokumentierte Injektionskonzept ist bautechnisch charakterisiert durch die Anordnung von separat und mehrfach injizierbaren Ringleitungen im Abstand von etwa 0,75 m (der Abstand soll in Technikumsversuchen noch präzisiert werden). Die geplante Möglichkeit einer Mehrfachinjektion jeder Ringleitung erfordert jeweils 2 Leitungs-Zuführungen, eine Injektionsleitung und eine Spülleitung pro Injektionsring. Unter Berücksichtigung der geplanten Segmentlänge einzelner Abdichtungsbauwerke von ca. 25m resultieren hieraus gemäß Ausführung in U11 etwa 30 Ringleitungen pro Segment, die - gemeinsam mit eventuellen Mess- und Kontrollleitungen - in einem zentralen Hüllrohr untergebracht werden müssen. Das Hüllrohr muss entsprechend den Ausführungen in U11 nach Abschluss der Injektionen frei gebohrt und verschlossen werden. Der erforderliche Durchmesser

des Hüllrohres wird in U11 zu ca. 20cm eingeschätzt. Die weiterhin in Kapitel 5 der Unterlage U11 dokumentierten Ausführungen zum Injektionskonzept beinhalten Erläuterungen zur technischen Konfiguration der Injektionsanlage (Injektionsschläuche, Mischer, Pumpen etc.), zur Injektionsabfolge und zur Vorbereitung des Gebirges an der Einbaustelle des Dammkörpers.

Kapitel 6 der Unterlage U11 beschreibt eine vereinfachte geometrische Modellvorstellung, mit deren Hilfe die erreichbare Systempermeabilität der injizierten Querschnittsabdichtung rechnerisch abgeschätzt werden kann. Ausgehend von den das Abdichtungsbauwerk charakterisierenden Elementen

- anstehendes Gebirge mit ALZ,
- Kontaktfuge und
- Dammkörper

wird die integrale Permeabilität des Abdichtungsbauwerkes aus den Permeabilitäten der einzelnen Elemente rechnerisch abgeleitet. Die rechnerische Abschätzung der Kontaktfugenpermeabilität erfolgt unter Berücksichtigung der Permeabilität des Feinstbindemittels, der Permeabilität nicht verfüllter Kluftwurzeln, der Spaltweite der Kluftwurzeln, der Länge potenziell nicht verfüllter Teilabschnitte des Abdichtungssegments, der Öffnungsweite und Rauigkeit der Risswandungen und der Geometrie der nicht verfüllten Kluftwurzeln. Permeabilitätsbeeinflussende Effekte aus dem Aufkriechen des Salzgebirges, aus einem Anlösen des Salzgebirges durch die ungesättigte Anmachflüssigkeit und aus Beton- und/oder Injektionsmittelkorrosion werden nicht berücksichtigt. Im Ergebnis der rechnerischen Einschätzungen wird ausgeführt:

*Demnach kann als Ergebnis der durchgeführten Modellrechnungen insgesamt festgehalten werden, dass sich die Anforderung einer integralen Permeabilität von  $K_i \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  erfüllen lässt, auch wenn von offenen Spalten im Bereich der am unteren Rand der Kontaktfuge erwarteten Kluftwurzeln ausgegangen wird.*

Im abschließenden Kapitel 7 der Unterlage U11 werden schließlich zur baubegleitenden Überwachung und Kontrolle für erforderlich erachtete Maßnahmen der Qualitätssicherung zusammengestellt und erläutert.

## ***U12 – Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz***

U12 beschreibt die Anforderungen an die rheologischen, thermodynamischen, mechanischen und hydraulischen Materialeigenschaften des Salzbetons für Streckenabdichtungen im Steinsalz sowie die an die Ausgangsstoffe der Salzbetonrezeptur gestellten Anforderungen. Aufbauend auf einer kurzen Charakterisierung der in den verschiedenen Bau- und Betriebsphasen der Streckenabdichtungen relevanten Bemessungssituationen werden die an die Materialeigenschaften gestellten Anforderungen im jeweiligen Sachzusammenhang erläutert und begründet. Zusammengefasst werden in U12:

- Anforderungen an die Ausgangsstoffe (→ Rezeptur, Korngrößenverteilung, chemisch-mineralogische Zusammensetzung)
- Anforderungen an die Förderbarkeit und Verarbeitbarkeit (→ Fließfähigkeit, hydraulische Förderfähigkeit, Beschränkung von Sedimentations- und Absetzerscheinungen, Beschränkung von An- und Umlöseprozessen an der Streckenkontur, Begrenzung der Überschusslösung, Betonage frisch in frisch)
- Thermodynamische Anforderungen (→ adiabatische Temperaturerhöhung bei Hydratation, Wärmeausdehnungskoeffizient, Einbautemperatur)
- Mechanische Anforderungen (→ Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Haftzugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Dilatanzfestigkeit, Schwinddehnung)
- Hydraulische Anforderungen (→ Permeabilität, Porosität)
- Chemische Anforderungen (→ Korrosion, Umlösekapazität)

Das abschließende Kapitel 5 der Unterlage U12 dokumentiert schließlich eine Zusammenstellung von Prüfungen und Nachweisen, die im Rahmen von Eignungsprüfungen, Baustellen-erstprüfungen und Güteüberwachung zum Nachweis der Einhaltung der Anforderungen beabsichtigt sind.

## **5.2 Bewertung Verschlussbauwerke im Steinsalz**

### **5.2.1 Gesamtkonzeption**

Die mit U02 bis U06, U08, U11 und U12 vorgelegten Unterlagen zu den Streckenabdichtungen im Steinsalz vermitteln einen insgesamt umfassenden Eindruck von der zentralen Bedeutung der Streckenabdichtungen innerhalb des Verschlusskonzeptes, von den Anforderungen, die an die Leistungsfähigkeit der Streckenabdichtungen gestellt werden, von den Möglichkei-

ten und Herausforderungen der bautechnischen Herstellung, von den erforderlichen Materialeigenschaften der planmäßig vorgesehenen Baustoffe, von den geführten Nachweisen zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit und schließlich von den geplanten Maßnahmen zur Kontrolle und Überwachung einer qualitätsgesicherten Bauwerkserstellung. Die Gesamtstruktur der Unterlagen wird als im Grundsatz geeignet eingeschätzt, die durch den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis vorgegebenen Zielstellungen eines auf mindestens ca. 30000 Jahre ver- bzw. weitgehend behinderten Zutritts von Lösungen aus der Restgrube in die Ablagerungsbereiche des Süd-West-Feldes und des Ostfeldes zu realisieren. Die in Abschnitt 2 zusammengestellten grundsätzlichen Anforderungen an geotechnische Barrieren werden unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen des ERA Morsleben als im Grundsatz insgesamt erfüllt bewertet, d.h. die den grundlegenden Anforderungen nicht vollumfänglich entsprechende Kombination von Dichtelement und Widerlager, die Verwendung eines vor dem Hintergrund natürlicher Analoga nicht belegbar langzeitsicheren Abdichtungsmaterials und der Verzicht auf eine diversitäre Ausführung der Streckenverschlüsse (→ Diversität gegeben durch Abdichtung südliches Wetterrollloch in Verbindung mit Streckenverschlüssen) sind durch die vom AS vorgelegten Untersuchungen und Planungen nach Einschätzung der Prüfer hinreichend berücksichtigt bzw. begründet durch den radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis nicht erforderlich. Soweit im Rahmen der Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung, d.h. ohne eigene, von der Vorgehensweise des AS unabhängige rechnerische Untersuchungen zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit möglich, wird die Gesamtstruktur der Unterlagen zu den Streckenverschlüssen im Steinsalz als in sich schlüssig und nachvollziehbar bewertet.

Unter Berücksichtigung des in den Unterlagen dokumentierten Planungsstandes werden die zu den Streckenabdichtungen im Steinsalz vorgelegten Unterlagen als inhaltlich vollständig und die aufgeführten Nachweise und die Nachweiskonzeption als im Grundsatz dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend bewertet.

Dessen ungeachtet sind im Rahmen einer detaillierten Prüfung der die Streckenabdichtungen im Steinsalz behandelnden Einzelunterlagen die nachfolgend zusammengestellten Hinweise, Empfehlungen und Forderungen erarbeitet worden. Hierbei zu berücksichtigen ist, dass die im Rahmen der in situ Versuche zur bautechnischen Machbarkeit und zur Funktionalität der Streckenabdichtungen im Steinsalz vorgesehenen Untersuchungen im Rahmen des vorliegen-

den Prüfberichtes nur untergeordnet bezüglich der konzeptionellen Planungen und Zielstellungen berücksichtigt werden konnten, da die für eine abschließende Bewertung der Streckenabdichtungen im Steinsalz erforderlichen Ergebnisse des in situ Versuches noch nicht vorliegen. Einige der in den nachstehenden Abschnitten des Prüfberichtes zusammengestellten Hinweise, Empfehlungen und Forderungen sind daher nicht im Sinne eines sachlichen Mangels zu werten, sondern dem aktuellen Planungs- und Erkenntnisstand geschuldet.

## **5.2.2 Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis**

Die in U03 mit BF1 und BF2 bezeichneten mechanischen Berechnungen beschreiben das Tragverhalten der Streckenabdichtungen für das Szenario eines über 30000a trockenen Endlagers. Im Berechnungsfall BF1 wird für die Tragfähigkeit des Salzbetons aufbauend auf der hydrationsabhängigen Entwicklung von Druck- und Zugfestigkeit ein elastoplastischer Ansatz nach Drucker-Prager verwendet, im Berechnungsfall BF2 wird der Salzbeton mit dem Stoffmodell BGRa (Kriechklasse 0) als viskoses Material abgebildet. Gemäß Ausführung in U03 wird dabei *für die mechanischen Berechnungen eine konstante Temperatur angenommen und diese in den Stoffgesetzen für das Kriechen und das Hydrationsmodell berücksichtigt*. Begründet wird die Vernachlässigung der Temperaturentwicklung in Folge Hydratation durch die Aussage, *dass durch die vorlaufenden Temperaturberechnungen gezeigt wird, dass der Temperatureinfluss vernachlässigt werden kann*. Die Logik vorstehender Einschätzung des AS erschließt sich den Prüfern vorbehaltlich der noch für erforderlich erachteten eigenen, von der Vorgehensweise des AS unabhängigen rechnerischen Untersuchungen nicht. Nach Einschätzung der Prüfer resultieren aus dem Eintrag der Hydrationswärme in das Berechnungsmodell inhomogene Temperaturfelder, die auch bei Ansatz gleicher Wärmeausdehnungskoeffizienten für Salzbeton und Salzgebirge in Folge unterschiedlicher Steifigkeiten von Salzbeton und Salzgebirge in thermisch induzierten Spannungen resultieren, die im Rahmen der Nachweisführung zu berücksichtigen sind. Eine analoge Aussage gilt für den Einfluss unterschiedlicher Temperaturen auf das exponentiell von der Temperatur abhängige Kriechverhalten des Steinsalzgebirges. Eine Berücksichtigung der in Folge der Hydratation des Salzbetons im umgebenden Gebirge induzierten Erwärmung resultiert demnach in einer erhöhten Kriechfähigkeit des Salzgebirges und führt in der Konsequenz zu einem entsprechend intensivierten Aufkriechen des Gebirges auf die Dammbaukonstruktion. Im Ergebnis vorstehender Ausführungen bleibt daher danach zu fragen, warum der AS im Rahmen seiner Nachweisführung ohne Not auf eine weitgehend realitätsnahe Abbildung des Tragverhaltens

verzichtet. Hinzu kommt, dass aus den Maßnahmen zur vorgezogenen Verfüllung ein entsprechend validiertes Modellierungs- und Simulationsinstrumentarium vorliegt.

**Forderung F7:**

Die aus der Hydratation des Salzbetons resultierenden thermischen Beanspruchungen der Verschlussbauwerke sind im Rahmen der rechnerischen Nachweise zu Standsicherheit- und Gebrauchstauglichkeit zu berücksichtigen.

Im Ergebnis der in U03 dokumentierten rechnerischen Untersuchungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Streckenabdichtungen wird ausgeführt: Für die mechanischen Berechnungsfälle BF1, BF2 und BF4 *wird durch die Einhaltung der Kriterien gezeigt, dass innerhalb des Betrachtungszeitraumes keine Risse entstehen bzw. in der Auflockerungszone kein Risswachstum erfolgt. Auch für den Berechnungsfall BF3 lässt sich feststellen, dass der Nachweis der Rissbeschränkung geführt werden kann, wenn man den zeitlichen Verlauf des Druckanstiegs berücksichtigt.* Nach Einschätzung der Prüfer ist mit Bezug auf vorstehend zitierte Aussagen ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die Einschränkung „*innerhalb des Betrachtungszeitraumes*“ der Tatsache geschuldet ist, dass der Betrachtungszeitraum lediglich den Zeitraum nach Einbau des Abdichtungskörpers berücksichtigt. Die im Zeitraum zwischen dem Nachschnitt der Auflockerungszone und dem Einbau der Abdichtung resultierenden Überschreitungen der Dilatanzfestigkeit des konturnahen Salzgebirges werden in der rechnerischen Nachweisführung nicht berücksichtigt. Die Zulässigkeit dieser Dilatanzbereiche (S. 104: *Rechnerisch reichen diese Zonen ca. 10cm ins Gebirge (siehe Anhang 9 bis 12). Im Sohlbereich der östlichen Stirnfläche beträgt die Tiefe des potentiell geschädigten Bereichs ca. 20 cm (Anhang 11 und 12)*) wird im Sinne des Gebrauchstauglichkeitsnachweises auf der Grundlage vergleichender Betrachtungen zur Permeabilität der Saumzone im Bereich des Asse-Vordammes und zur Injizierbarkeit analog zu den hydratationsbedingten Rissen in der Kontaktfuge zwischen Salzbeton und Salzgebirge verbal-argumentativ begründet.

Nach Einschätzung der Prüfer ist im Rahmen einer rechnerischen Simulation des realen Betriebsablaufes insbesondere der Fragestellung nachzugehen, wie sich die vom AS in U03 nicht berücksichtigten transienten Kriecheigenschaften von Salzbeton und Salzgebirge sowie die von der Temperatur abhängigen stationären Kriecheigenschaften auf den Spannungszustand des Verbundtragsystems bzw. dessen Gebrauchstauglichkeit auswirken. Voraussetzung

hierfür ist eine Bestimmung der transienten Kriechparameter aus den an Steinsalzprüfkörpern des ERA Morsleben durchgeführten Kriechversuchen und eine Einschätzung der Temperaturabhängigkeit des Kriechvermögens. Dabei zu berücksichtigen ist, dass durch den Konvergenzprozess eine deviatorische Entlastung im konturnahen Salzgebirge resultiert, sodass in der Konsequenz danach zu fragen ist, ob die im Rahmen der rechnerischen Modellierungen verwendeten Stoffmodelle geeignet sind, das Kriechverhalten bei Entlastung zu erfassen.

Auch wird für eine das reale in situ Tragverhalten hinreichend physikalisch abbildende rechnerische Analyse und Bewertung der Standsicherheit und Dichtheit der Streckenverschlüsse im Steinsalz die Durchführung thermisch-mechanisch-hydraulisch gekoppelter Berechnungen empfohlen. Vorstehende Aussage gilt auch und insbesondere für die rechnerische Berücksichtigung der sich nach dem Nachschnitt der Streckenkontur ausbildenden Dilatanzzone. Die Dilatanzzone ist charakterisiert durch eine gegenüber dem nicht dilatant verformten Gebirge erhöhte Sekundärpermeabilität, sodass der Prozess einer in die dilatant verformte Konturzone zwischen anstehendem Salzgebirge und Abdichtungs konstruktion eindringenden Lösung im Szenario „Fluidzutritt“ eine rechnerische Berücksichtigung der mechanisch-hydraulisch gekoppelten Wechselwirkungen erforderlich macht.

**Forderung F8:**

Berücksichtigung der transienten und von der Temperatur abhängigen Kriecheigenschaften des Steinsalzgebirges.

**Forderung F9:**

Rechnerische Analyse der Tragfähigkeit und Dichtheit der Streckenverschlüsse unter Berücksichtigung mechanisch-hydraulisch gekoppelter Prozesse im dilatant beanspruchten Konturbereich der Streckenabdichtungen.

Schließlich wird darauf hingewiesen, dass von den Prüfern im Rahmen des Stilllegungsnachweises für das ERA Morsleben erwartet wird, dass angesichts der Unterschiede in Teufenlage, Geologie und geometrischer Konfiguration für jedes Abdichtungsbauwerk ein Nachweisdokument angelegt und in diesem Rahmen auch ein standortbezogener Nachweis geführt wird. Die in U03 dokumentierte pauschalierende Übertragung der Ergebnisse eines Referenzlastfalles auf andere Standorte wird als geeignet erachtet, die grundsätzliche Machbarkeit der Stre-



ckenabdichtungen im Sachzusammenhang zu belegen. Vorstehende Aussage gilt jedoch ausdrücklich nicht für die abschließend im Rahmen der Stilllegung zu führenden Nachweise. Dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend ist nach Einschätzung der Prüfer für jedes Abdichtungsbauwerk ein standortbezogener Nachweis mit Berücksichtigung und Dokumentation der lokationsspezifischen Randbedingungen zu führen.

**Forderung F10:**

Anlegen eines individuellen Nachweisdokumentes für jedes Abdichtungsbauwerk und Durchführung eines standortbezogenen rechnerischen Nachweises zu Standsicherheit und Dichtheit für jedes Abdichtungsbauwerk.

Bezüglich der rechnerischen Richtigkeit der in P195 dokumentierten Berechnungen bleibt darauf hinzuweisen, dass exemplarische Verifikationsberechnungen der Prüfer die Berechnungsergebnisse des AS bestätigen, sofern gleiche Materialparameter, Stoffmodelle und Lastfälle simuliert werden. Dessen ungeachtet kann eine abschließende Beurteilung der rechnerischen Richtigkeit jedoch erst nach Abschluss eigener, von der Vorgehensweise des AS unabhängiger Berechnungen und Bewertungen erfolgen.

Bezüglich der in U04 dokumentierten rechnerischen und experimentellen Untersuchungen zur Rissfreiheit bzw. Rissbeschränkung der Abdichtungsbauwerke bleibt zunächst festzuhalten, dass der AS im Grundsatz ein in sich geschlossenes Nachweiskonzept dokumentiert. Die Plausibilität des auf den vier Teilnachweisen

- (1) Laborativer Nachweis, dass die hydratationsabhängige Zugfestigkeit des Salzbetons deutlich größer ist als die hydratationsabhängige Zugfestigkeit des Kontaktbereiches Salzbeton-Salzgebirge,
- (2) Rechnerischer Nachweis, dass bei Ansatz der unter (1) ermittelten Materialeigenschaften ein potentiell Versagen des Verbundsystems „Abdichtungsbauwerk-Salzgebirge“ grundsätzlich auf die Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge beschränkt ist bzw. permeabilitätserhöhende Längsrisse im Abdichtungsbauwerk ausgeschlossen werden können,
- (3) Rechnerischer Nachweis, dass die potentiell in der Kontaktfuge zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge induzierten Risse durch die nachträgliche Injektion verschlossen werden können und

- (4) Verbal-argumentativer Nachweis durch Analogiebetrachtung, dass durch das Aufkriechen des Gebirges langfristig der hydraulische Widerstand des Verbundsystems reduziert wird,

aufbauenden Nachweiskonzeptes wird durch die Prüfer im Grundsatz bestätigt. Die im Rahmen des Nachweiskonzeptes verwendeten Teilnachweise beruhen jedoch in einigen wesentlichen Detailfragen auf Annahmen, die nicht belegt werden und/oder auf der Basis verbal-argumentativer Betrachtungen geführt werden. Hierzu gehören insbesondere die Ausführungen zur Ausbildung dilatanter Gebirgsbereiche im Saumbereich der Abdichtungsbauwerke, Annahmen zur Schubfestigkeit des Materialverbundes Salzbeton-Gebirge, rechnerische Idealisierungen zum Verbundtragverhalten visko-elastischer Salzbeton – visko-elastisches Salzgebirge, rechnerische Idealisierungen zur Ausbildung thermisch induzierter Spannungen im Verbundsystem Abdichtungsbauwerk-Gebirge unter dem Einfluss eines hydratationsbedingten Wärmeeintrags sowie die entkoppelte Berücksichtigung mechanischer und hydraulischer Belastungen. Auch bleibt darauf hinzuweisen, dass Teile der den Nachweisführungen zugrunde liegenden experimentellen Untersuchungen lediglich in Form tabellarischer Zusammenstellungen ohne Dokumentation von Versuchstechnik und Versuchsauswertung beschrieben werden. Ob das vom AS in U04 vorgestellte Nachweiskonzept abschließend geeignet im Sinne der zu führenden Nachweise ist bzw. ob und gegebenenfalls welche Teilnachweise ergänzt, modifiziert oder geändert werden müssen, kann durch die Prüfer erst nach Durchführung eigener, von der Vorgehensweise des AS unabhängiger Berechnungen abschließend beurteilt werden. Vorstehende Einschätzung begründet sich insbesondere vor dem Hintergrund, dass der AS einzelne, für die Dichtheit bzw. Gebrauchstauglichkeit der Streckenabdichtungen wesentlichen Fragestellungen mit unterschiedlichen und jeweils stark idealisierten Teilmodellen untersucht, die Richtigkeit seiner aus den Teilmodellen abgeleiteten Schlussfolgerungen aber nicht durch eine rechnerische Analyse unter Berücksichtigung der tatsächlich gleichzeitig ablaufenden und sich gegenseitig beeinflussenden physikalischen Prozesse belegt. In der Konsequenz behandeln die Unterlagen U03 und U04 jeweils ausgewählte Teilaspekte der rechnerischen Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Streckenabdichtungen. Die für einen abschließenden Nachweis erforderliche Zusammenführung der Teilaspekte in einer thermisch-mechanisch-hydraulisch gekoppelten Berechnung unter Berücksichtigung der abstrahiert-realen Betriebsgeschichte (Bauablauf / Bauzustände) erfolgt jedoch nicht. Damit bleibt bezüglich der in U04 dokumentierten rechnerischen Untersuchungen analog zur Bewertung von U03 auf die Forderungen F9 und F10 zu verweisen. Ohne den Erkenntniszuwachs

durch die in U04 dokumentierten rechnerischen Analysen negieren zu wollen, erschließt sich die Übertragbarkeit der an Teilmodellen mit Ansatz linear-elastischer Stoffmodelle für das Salzgebirge und den Salzbeton ermittelten grundsätzlichen Abhängigkeiten zum thermomechanischen Tragverhalten auf die realen Abdichtungsbauwerke nicht bzw. nicht abschließend.

Bezüglich der in U04 fehlenden Darstellungen zur Diskretisierung des für die thermomechanischen Berechnungen verwendeten Berechnungsmodells und der nicht dokumentierten Zugkriechversuche wird auf Hinweis H2 und Forderung F11 verwiesen.

**Hinweis H2:**

In U04 fehlt eine Darstellung der Diskretisierung des für die thermomechanischen Berechnungen verwendeten Berechnungsmodells.

**Forderung F11:**

Die in U04 für die Quantifizierung des Kriechverhaltens des Salzbetons verwendeten Zugkriechversuche an Prüfkörpern unterschiedlichen Alters sind zu dokumentieren.

Eine Gegenüberstellung der in U04 verwendeten thermischen Materialkennwerte mit den in U02 für Salzbeton M2 ermittelten Materialparametern zeigt Tab. 5.1. Danach wurde in den rechnerischen Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Betonkörper ein deutlich von den experimentellen Befunden abweichender Wärmeausdehnungskoeffizient angesetzt. Eine Begründung hierfür konnte aus den vorgelegten Unterlagen nicht ersehen werden. Bezüglich der Auswirkungen des von  $3,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  auf  $2,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  reduzierten Wärmeausdehnungskoeffizienten bleibt darauf hinzuweisen, dass eine Reduktion des Wärmeausdehnungskoeffizienten in einer Reduktion der thermisch induzierten Spannungen resultiert.

	U02	U04
Rohdichte	1965 kg/m <sup>3</sup>	1970 kg/m <sup>3</sup>
Spezifische Wärmekapazität:	0,93 J/(kg·K)	1,841 J/(m <sup>3</sup> ·K)
Wärmeleitfähigkeit:	1,14 W/(m·K)	1,14 W/(m·K)
<u>Wärmeausdehnungskoeffizient:</u>	<u><math>3,20 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}</math></u>	<u><math>2,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}</math></u>

Tab. 5.1: Gegenüberstellung der in U02 für Salzbeton M2 angegebenen Materialkennwerte mit den in U04 verwendeten Materialkennwerten

### **Hinweis H3:**

Der in U04 für die rechnerischen Untersuchungen verwendete Wärmeausdehnungskoeffizient für Salzbeton ist nicht identisch mit dem gemäß U02 im Rahmen laborativer Untersuchungen ermittelten Wert.

### **5.2.3 Technische Realisierbarkeit**

Die bautechnische Realisierbarkeit der Streckenabdichtungen mittels hydraulischer Fernförderung wird auf der Basis der vorliegenden Erfahrungen und technischen Möglichkeiten aus dem Kammerversatz mit Salzbeton im Rahmen der vorgezogenen Verfüllmaßnahmen als gegeben betrachtet. Eine analoge Aussage gilt nach Einschätzung der Prüfer für die gebirgschonende Entfernung der ALZ. Von signifikanter Bedeutung für die technische Realisierbarkeit ist nach Einschätzung der Prüfer, ob bzw. inwieweit die in U11 dokumentierten Planungen zur Injektion der Kontaktfuge zwischen bautechnischer Konstruktion und umgebenden Salzgebirge den Anforderungen entsprechend realisiert werden kann. Das Injektionskonzept wird als insgesamt plausibel eingeschätzt. Grundsätzliche Bedenken an der Eignung des Injektionskonzeptes können aus den in U11 dokumentierten Ausführungen nicht entnommen werden. Dessen ungeachtet sind - bedingt durch den planenden Charakter der Unterlage U11 – einige für eine erfolgreiche Realisierung des Injektionskonzeptes wesentliche Fragestellungen noch nicht beantwortet. Zu nennen sind diesbezüglich:

Warum beschränken sich die Untersuchungen auf MIKRODUR R-U und ULTRAFIN 12  
Nach Kenntnis der Prüfer sind mit z.B. MIKRODUR R-X ( $d_{95} = 6 \mu\text{m}$ ), Hersteller Dyckerhoff, auch feinkörnigere Baustoffe industriell verfügbar.

### **Forderung F12:**

Angesichts der in U11 skizzierten Zielstellung einer weitgehenden Verfüllung der Kluftwurzeln ist zu fordern, weitere Feinstbindemittel mit Korndurchmessern  $d_{95} < 12 \mu\text{m}$  in die Untersuchungen einzubeziehen.

Gemäß L06, Teil 2, S. 591 ist der W/B – Wert bei Feinstzementinjektionen im Allgemeinen höher als bei herkömmlichen Zementinjektionen. Dessen ungeachtet wird in U11 ein an der unteren Grenze des in L06 empfohlenen Wertebereiches lokalisierter W/B – Wert von  $W/B = 1$  verwendet. Der Grund für diese Vorgehensweise erschließt sich den Prüfern nicht.

### **Empfehlung E3:**

Die Rezepturenentwicklung für die Feinstzementinjektionen sollte nachvollziehbar erläutert werden.

Unabhängig von der NaCl-Konzentration der Anmachflüssigkeit (Wasser bzw. NaCl-Lösung unterschiedlicher Konzentration) muss die Suspension definierte rheologische Anforderungen erfüllen. Der Zusammenhang zwischen den rheologischen Anforderungen einerseits und der NaCl-Konzentration andererseits wird in U11 nicht quantitativ angegeben und nicht systematisch untersucht. U11, S.10 kann lediglich entnommen werden, dass *die Marsh-Zeit unmittelbar nach Aufbereitung der Feinstbindemittelsuspension auf etwa 40s begrenzt* wird. Bei Verwendung von Feinstmittelsuspensionen mit höheren Salzgehalten in der Anmachflüssigkeit sind gemäß Aussage in U11 *die Marsh-Zeiten gegebenenfalls noch anzupassen*.

### **Empfehlung E4:**

Die bereits in U11 angezeigten Untersuchungen zur Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften der Suspension vom Salzgehalt der Anmachflüssigkeit sollten systematisch durchgeführt und dokumentiert werden.

Im Rahmen der Ausführungen zur Injektionsfähigkeit von Kluftsystemen in Kap. 6.1.4 der Unterlage U11 wird ausgeführt: *Ab einem Verhältnis  $N$  ( $N = D_{\text{Kluft}}/d_{95}$ ) oberhalb von 5 bis 8 kann von einer vollständigen Verfüllung ausgegangen werden. Sobald die letztgenannten Verhältniswerte unterschritten werden, setzen sich Partikel aus der Suspension als sogenanntes Sperrkorn fest. Anschließend bildet sich zunächst in der näheren Umgebung des Sperrkorns ein sogenannter Filterkuchen aus, der die Suspension daran hindert, die Kluft weiter auszufüllen.*“ (U11, S. 20). Und weiter: *„Allgemein kann ...von einer wirksamen Verpressung bis herab auf eine Kluftweite von dem 5- bis 8-fachen des charakteristischen Durchmessers  $d_{95}$  ausgegangen werden.“* (U11, S. 20/21).

Dessen ungeachtet wird für die weiteren Abschätzungen in U11 von einer Verfüllbarkeit bis hinab zu  $50 \mu\text{m} = 0,05 \text{ mm}$  für das nicht verwendbare Material MIKRODUR R-U und bis hinab zu  $65 \mu\text{m} = 0,065 \text{ mm}$  für das Material Ultrafin 12 ausgegangen.

**Forderung F13:**

Die Ausführungen zur Injezierfähigkeit von Kluftsystemen sind in sich schlüssig zu formulieren. Die Diskrepanz zwischen der Forderung, dass die Anforderungen an das Bauwerk nur erfüllbar sind, wenn Spaltweiten bis  $\leq 50 \mu\text{m}$  durch die Injektion vollständig verfüllt werden (Ergebnis (a) in U11, S. 50), und den tatsächlichen effektiven maximalen Korndurchmessern der verfügbaren Feinstbindemittel ist zu klären.

**Empfehlung E5:**

Die Forderung nach einer baubegleitenden Prüfung des für die Leistungsfähigkeit der Injektion signifikant relevanten Wertes  $d_{95}$  ist in die Qualitätssicherung aufzunehmen. Eine analoge Aussage gilt für die insitu Durchlässigkeitsprüfung der Kontaktfuge nach erfolgter Injektion.

Unter Bezug auf die in U11 dokumentierten Ausführungen zum Injektionskonzept bleibt nach Einschätzung der Prüfer darauf hinzuweisen:

**Forderung F14:**

Für die geplanten Technikums- und in-situ-Versuche sind prüffähige Konzepte zu erstellen.

**Forderung F15:**

Zur Dokumentation der Machbarkeit von mehr als 30 Verfüll- und Spülleitungen sowie Mess- und Kontrollleitungen in einem Hüllrohr, das später für die Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit des Dammbauwerkes entfernt werden muss, ist ein gegenständlicher Nachweis im Rahmen von Technikums- und in-situ-Versuchen zu erbringen.

**Forderung F16:**

Zur Lösefähigkeit der Anmachflüssigkeit vor dem Abbinden des Injektionsmittels und in den abgepressten Bereichen der Kluftwurzeln sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## **6 Verschlussbauwerke im Steinsalz – in-situ Versuch**

### **6.1 Angaben des Antragstellers**

Gemäß der mit U01 vom AS vorgelegten „Planungsstudie für einen in-situ-Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton“ ist beabsichtigt, die baupraktische Realisierung der Streckenabdichtungen im Steinsalz im Rahmen eines so genannten „Handhabungsversuchs“ zu erproben. Der in U01 dokumentierte Handhabungsversuch beinhaltet gemäß Aussage des AS keinen in situ Gebrauchstauglichkeitsnachweis. Als grundlegende Voraussetzungen werden für den Handhabungsversuch in U01 genannt:

- (a) Der Salzbeton besitzt ein ausgeprägtes chemisches (autogenes) Schwinden beim Abbinden.
- (b) Beim Abbinden des Salzbetons entsteht Hydratationswärme, die beim Abkühlen des Betonkörpers zu Rissen im Betonkörper und in der Kontaktzone Bauwerk – Gebirge führen kann.
- (c) Die Kontaktzone Bauwerk – Gebirge ist eine Schwächezone der Querschnittsabdichtung / des Gesamtbauwerkes.
- (d) Im Bauwerk entstehende Spannungen führen ausschließlich in dieser Kontaktzone zu Rissen, die die Funktionalität des Gesamtbauwerkes bestimmen können.
- (e) Die in der Kontaktzone entstehenden Risse (s. Buchstabe (d)) können mit Hilfe von Injektionsmaßnahmen verschlossen werden, solange nicht das auflaufende Steinsalzgebirge durch die Kriechverformungen selbständig diese Risse dicht verschließt.
- (f) Im Salzbetonkörper selbst entstehen keine hydraulisch relevanten Risse.
- (g) Die Einbringtemperatur des Salzbetons spielt für die Rissbildung außerhalb der Kontaktzone keine Rolle.
- (h) Die Injektion der Kontaktzone muss mindestens in einem Segment der gesamten Abdichtung erfolgen.

Auf der Basis der Gültigkeit der Voraussetzungen (a) bis (h) werden in U01 als Arbeitsschritte für die Ausführung des Handhabungsversuches festgelegt:

- Permeabilitätsmessungen in den Konturbereichen der Strecke am ausgewählten Standort für das Versuchsbauwerk (Abdichtungssegment) vor dem Nachriss der Konturen des Standortes mit einer Nachrisstiefe, die durch vorauslaufende Permeabilitätsmessungen ermittelt wird;

- „Ausrundung“ der Ecken des voraussetzungsgemäß rechteckigen Streckenquerschnittes;
- Konturieren der nachgeschnittenen Einbauabschnitte durch Einfräsen von Nuten für die Injektionsleitungen und Herstellen einer sowohl zur Streckenmitte als auch in Achsrichtung des gesamten Einbauabschnittes zur Verfüllseite hin leicht ansteigenden Firstkontur;
- Aufstellen der laugenseitigen Schalung;
- Einbau der ringförmigen Injektionsleitungen; Einbau sämtlicher Messelemente sowie Einbau der Versorgungs- und Entlüftungsleitungen in ein Hüllrohr sowie Einbau von Trennblechen oder Trennfolien in Querrichtung im Sinne von Sollbruchstellen als zusätzliche Sicherheit im Falle der Entstehung von Querrissen;
- Aufstellen der luftseitigen Schalung;
- Einbau des Dammkörpers durch kontinuierliches Einpumpen der Salzbeton-Suspension „nass in nass“;
- Rückbau der luftseitigen Schalung;
- Injektion der Ringleitungen mit Kunstharzen bzw. mineralischem Feinstbindemittel;
- Entfernen des Hüllrohres und aller darin enthaltenen Leitungen durch Überbohren mit anschließendem Verpressen der entstandenen Bohrung mit Druck zur Erzeugung einer Vorspannung bis zum Abbinden des Verfüllgutes in der Bohrung;
- Einbau einer „plastischen Fuge“ aus Salzgrus oder Salzbricketts als Verbindungselement zwischen einzelnen Abdichtungselementen.

Als Versuchziele werden genannt:

Ziel 1 Demonstration der bautechnischen Realisierbarkeit eines Abdichtungselementes der beschriebenen Art, ohne Berücksichtigung eventueller Wechselwirkungen zwischen dem Abdichtungselement und dem umgebenden Gebirge. Die Lokation des Versuchsortes ist deshalb – abgesehen von der Forderung, dass er sich im Steinsalz befinden soll und der Durchörterungsgrad in der Umgebung geeignet ist - von untergeordneter Bedeutung;

Ziel 2 Der Handhabungsversuch dient ausschließlich der Verifizierung der technisch/technologischen Realisierbarkeit der Errichtung eines derartigen Bauwerkes unter in situ Bedingungen und der Erreichbarkeit der geforderten Festigkeits-, Verformungs- und Permeabilitätsparameter des Baukörpers und des Kontaktbereiches.



- Ziel 3 Der Handhabungsversuch soll an einem Bauwerk von ca. 25 m Länge und 20 m<sup>2</sup> Querschnitt durchgeführt werden.
- Ziel 4 Vor dem Betonieren, d.h. nach Errichten der lösungsseitigen Schalung und dem Einbau der Injektionsleitungen, sollen alle Temperatur-, Spannungs- und Verformungsmessgeber, d.h. auch jene, die im Innern des Betonkörpers angeordnet sind, eingebaut werden.
- Ziel 5 Nachweis des Erreichens und des Aufrechterhaltens der Vorspannung bei der Injektion bis zum Abbinden des Injektionsmittels.

Schließlich werden technisch-technologische Kontrollparameter angegeben, die beim Handhabungsversuch vorrangig überprüft werden sollen. Dazu gehören u.a.:

- Parameter der ALZ,
- Einbau der Mess- und Injektionstechniken,
- Kontinuität des Betoneinbaus,
- Realisierung des Injektionsdruckes von 20 bar,
- Temperatur-, Spannungs- und Verformungsdaten bei der Bauwerkerrichtung und beim Abbinden,
- erreichte Parameter des Salzbetons: Festigkeit, Verformbarkeit, Permeabilität,
- Beschaffenheit der Kontaktfuge: Permeabilität, Formschluss, „Kluftverheilung“ durch Injektion,
- Erarbeitung und Qualifizierung eines Qualitätsmanagementsystems.

Die weiteren Ausführungen beinhalten Angaben zur Versuchsdurchführung (Abschnitt 4), zu den geplanten Messungen (Abschnitt 5) sowie zum Qualitätssicherungskonzept (Abschnitt 6) und zur Dokumentation der Ergebnisse (Abschnitt 7).

## **6.2 Bewertung in situ Versuch Streckenverschlussbauwerke**

Eine erste Bewertung der mit U01 vorgelegten Unterlage erfolgte im Rahmen der „Adhoc-Stellungnahme im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA Morsleben“, L01. Weiterhin durchgeführte Erörterungen zum insitu Versuch Streckenverschluss sind dokumentiert durch die Fachgesprächsprotokolle L06 und L08 sowie ein Schreiben des Lehrstuhls für Deponietechnik und Geomechanik bezüglich der begleitenden Begutachtung des insitu Versuchs, L09. Danach ist beabsichtigt, sowohl die jeweils aktuellen Planungen wie

auch die jeweils aktuellen Zwischenergebnisse zumindest formal aus der Stellungnahme zum Prüfkomplex „Verfüllen und Verschließen von Strecken“ herauszulösen, um angesichts der zeitkritischen Terminierung des Versuches eine zeitnahe Bewertung zu gewährleisten. Vor diesem Hintergrund beschränken sich die nachfolgenden Bewertungen im Wesentlichen auf grundsätzliche Anmerkungen der Prüfer, wie sie u.a. bereits in L01 dokumentiert sind.

Unter Verweis auf die Ausführungen in L01 ist nach Einschätzung der Prüfer die gemäß U01 beabsichtigte vollständige Trennung der technisch/technologischen Handhabung vom Nachweis der Funktionalität zumindest eines Segmentes eines Abdichtungsbauwerkes im Großversuch nicht zweckmäßig. Die in der Planungsstudie dafür angegebene Begründung *„Ein langzeitlicher Nachweis der Dichtwirkung und prognostizierten Permeabilitätsentwicklung am Gesamtsystem (Satzbetonkörper, injizierte Kontaktfuge und Wirtsgestein) unter Belastung (einseitige Druckbeaufschlagung des Abdichtungssegments) ist beim in-situ-Versuch nicht vorgesehen und ist auch wegen der dafür erforderlichen langen Beobachtungszeiten nicht möglich“* stellt allein auf die Unmöglichkeit ab, mit einem Funktionalitätsversuch das Tragverhalten abzubilden und zu belegen, das sich in Verbindung mit der Gebirgskonvergenz erst nach großen Zeiträumen ergibt. In dieser Argumentation fehlt jedoch der Gesichtspunkt, dass dadurch der Kurzzeit-Nachweis der Funktionalität eines Abdichtungssegmentes nicht überflüssig wird.

Es ist erfahrungsgemäß nicht ausreichend, aus der punktuell gemessenen Permeabilität an Proben aus dem Baukörper sowie der punktuell an Kernproben aus der Kontaktzone und an punktuell an Proben aus dem umgebenden Gebirge gemessenen Permeabilitäten auf die integrale Anfangspermeabilität des gesamten Segmentes und seiner unmittelbaren Umgebung zu schließen. Auch ist grundsätzlich von einer Wechselwirkung zwischen Bauausführung und Gesamtverhalten des Segmentes auszugehen, so dass die isolierte Untersuchung der bautechnischen Machbarkeit einerseits und der Funktionalität andererseits als nicht abschließend geeignet eingeschätzt wird.

Die Prüfer halten es deshalb für zweckmäßig und notwendig, den vorgesehenen Handhabungsversuch mit dem Anfangs-Funktionalitätsnachweis eines Abdichtungssegmentes zu verknüpfen. Das ließe sich leicht realisieren, wenn der Handhabungsversuch in einem Streckenstummel durchgeführt würde und zwischen dem Ende des Segments und dem Strecken-

ende eine Belastungskammer eingebaut würde. Mit einer solchen Anordnung ließen sich alle Zielstellungen des Handhabungsversuches, die in der Planungsstudie angegeben werden, erfüllen und zugleich durch Belastungsaufgabe nach Abschluss des eigentlichen Handhabungsversuches und mittels der ohnehin vorgesehenen messtechnischen Überwachung der Verhaltensweise sowie der bestimmenden Parameter des Segmentes und seiner unmittelbaren Gebirgsumgebung die Anfangs-Funktionalität bestimmen und belegen.

**Forderung F17:**

Integration eines Funktionalitätsnachweises in den Handhabungsversuch.

Gemäß Ausführung in U01 ist geplant, Permeabilitätsmessungen in der Kontaktzone des anstehenden Gebirges vor dem Nachriss der Streckenkontur des Versuchsstandortes durchzuführen und die ermittelten Messergebnisse als Grundlage für die Nachrissarbeiten am Einbaustandort heranzuziehen. In U01 nicht angegeben wird, ab welchem Wert der punktuell gemessenen Permeabilität das Ende der ALZ und der Beginn des intakten Gebirges festgelegt wird. Auch erfolgt keine explizite Aussage dahingehend, ob es sich bei den Permeabilitätsmessungen um Messungen der Gas- oder der Lösungspemeabilität handelt. Aus dem Gesamtzusammenhang ist zu vermuten, dass es sich um Gaspermeabilitätsmessungen handelt und dass das gebirgsseitige Ende der ALZ bei Erreichen einer Gaspermeabilität von  $k \leq 10^{-18} \text{ m}^2$  festgelegt wird. Diese Verfahrensweise basiert auf der Annahme, dass es in der Zeit zwischen dem Entfernen der ALZ durch Nachrissarbeiten und dem Einbau des Salzbetonkörpers (nach  $U04 \leq 1$  Monat) nicht zur erneuten Ausbildung einer ALZ kommt. Ein rechnerischer Nachweis auf der Grundlage der lokationsbezogenen Dilatanzfestigkeit der anstehenden Salzgesteine wird zur Bestätigung v.g. Einschätzung für notwendig erachtet.

**Forderung F18:**

Rechnerische Nachweis, ob bzw. inwieweit ein Nachriss der Streckenkontur zur erneuten Ausbildung dilatant verformter Gebirgsbereiche führt.

Ungeklärt ist im Rahmen der Ausführungen zum Entfernen der ALZ, was unter dem „Ausrunden der Ecken“ des ca. 20 m<sup>2</sup> großen rechteckigen Querschnittes zu verstehen ist. Aus den bekannten Spannungsverteilungen um rechteckige Grubenbaue bei Ansatz eines näherungsweise isostatischen Primärspannungszustandes ist davon auszugehen, dass im mittleren Be-

reich der Stöße rechteckiger Strecken die Ausdehnung der ALZ am größten ist. Damit würde der Durchmesser eines nach dem Nachriss nahezu kreisförmigen Grubenbaues durch diese Maximalausdehnung der ALZ in den Streckemitten bestimmt werden. Im Widerspruch zu diesen Überlegungen steht allerdings der in U01 dargestellte Bauwerksentwurf (Bild 6.1). Gemäß Bild 6.1 ist im Bereich der Firste und der Stöße die „Ausrundung der Ecken“ nach dem vorstehend skizzierten Prinzip erfolgt, nicht jedoch im Bereich der Sohle. Damit bleibt ungeklärt, wie die ALZ im Bereich der Sohle entfernt wird. Die im oberen Querschnittsbereich vermiedenen Ecken sind im Bereich der Sohle noch vorhanden.

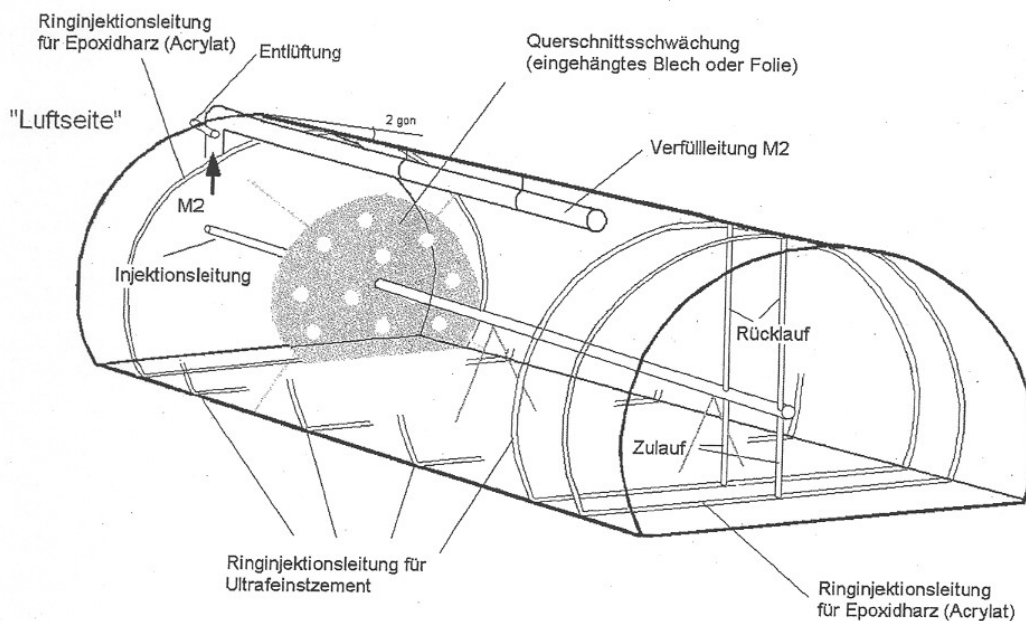


Bild 6.1: Geplanter Bauwerksentwurf (U01)

### Forderung F19:

Geometrisch präzise Darstellung des Bauwerksentwurfes.

Die gemäß Ausführung in U01 beabsichtigte Verlegung der Injektionsleitungen in Nuten erschließt sich den Prüfern nicht. Durch die Nutenverlegung erscheint die direkte Injektion in die Kontaktzone nach Einschätzung der Prüfer keinesfalls besser als beim Verlegen der Injektionsleitungen auf dem glatten, nachgeschnittenen Streckenstoß.

### **Empfehlung E6:**

Die beabsichtigte Verlegung der Ringleitungen in radial ausgefrästen Nuten sollte hinsichtlich Notwendigkeit und Zielstellung erörtert werden.

Nach der Errichtung der laugenseitigen Schalung ist gemäß Ausführung in U01 beabsichtigt, die Injektionsleitungen, alle Messelemente, das Hüllrohr zur Aufnahme der Versorgungs- und Entlüftungsleitungen sowie vermutlich auch die Messleitungen und das Verfüllrohr einzubauen. Da die Mehrzahl der Messelemente (Sensoren für Temperaturen, Spannungen, Verformungen) im Inneren des Salzbetonkörpers positioniert werden müssen, sind geeignete und insbesondere statisch stabile Vorrichtungen für die Positionierung der Sensoren in dem zunächst noch luftgefüllten Innenraum erforderlich, die weder das ungestörte Einfließen des Salzbetons behindern, noch durch den Betonstrom beschädigt werden dürfen. Die Signalleitungen müssen ebenfalls vor der Betonverfüllung in das Hüllrohr eingebunden werden. Technischen Vorstellungen hierfür sind in U01 nicht angegeben.

### **Forderung F20:**

Technische Ausführungen zur konstruktiven Realisierung der Einbauten für Versorgungs- und Entlüftungsleitungen, Messsensoren und Messleitungen.

Eine zu F20 analoge Aussage gilt grundsätzlich auch für die vorgesehenen „Querschnittsschwächungen“ zur Vermeidung potenzieller Schrumpfrisse im Betonkörper. Die durch die „Querschnittsschwächungen“ senkrecht zur Längsachse des Dammbauwerkes orientierten Risse könnten nach Einschätzung der Prüfer für die zur Abdichtung der Kontaktfuge geplanten Injektionen zugänglich sein. Die Funktionalität der „Querschnittsschwächungen“ ist ohne den geforderten Funktionsnachweis nicht überprüfbar. Hilfreich wäre diesbezüglich eine in U01 ausgeschlossene Aufwältigung des Versuchsbauwerkes nach Abschluss der Untersuchungen.

### **Empfehlung E7:**

Aufwältigung des Versuchsbauwerkes nach Abschluss der Untersuchungen zur Untersuchung der Wirkungsweise von „Querschnittsschwächungen“.

In der Planungsstudie U01 fehlt eine Angabe der tolerierbaren Maximalzeit (0,5 Std.?) für eine technologisch bedingte Unterbrechung der Baustoffförderung sowie eine Verfahrensweise, wenn störungsbedingt Unterbrechungen auftreten, die größer sind als diese Maximalzeit.

**Forderung F21:**

Die maximal zulässige zeitliche Unterbrechung der Baustoffförderung sowie die Verfahrensweise bei betriebsbedingter Überschreitung der maximal für zulässig eingeschätzten Unterbrechung sind festzulegen.

U01 beinhaltet keinen Nachweis bzgl. der Leistungsfähigkeit und Eignung der Injektionsmaterialien im salinaren Milieu und in Anwesenheit von Salzlösungen. Eine Alternative zum Injektionsgut Feinstzement könnte nach Einschätzung der Prüfer auch das Injektionsgut 2K-Bitumen darstellen, das im Rahmen des Vorhabens CARLA entwickelt wurde. Bezüglich des aktuellen Planungsstandes zum Injektionsmaterial und zur Injektionstechnik wird auf die Ausführungen zu U11 in Abschnitt 5.2.3 des vorliegenden Prüfberichtes verwiesen. Bezüglich des hier nicht weiter dokumentierten Planungsstandes zur Lokation des insitu Versuches, zur bautechnischen Realisierung, zur messtechnischen Instrumentierung sowie zu rechnerischen und laborativen Voruntersuchungen wird auf die begleitende Prüfung bzw. die im Rahmen der begleitenden Prüfung geführten Fachgespräche und die zugehörigen Unterlagen verwiesen.

## **7 Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit**

### **7.1 Angaben des Antragstellers**

Im Zuge der Stilllegungsmaßnahmen ist entsprechend den Ausführungen des AS zum Verschlusskonzept in U03 auf der 4. Sohle im Zugangsbereich zum Ostfeld ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit zu errichten. Die Planung dieses Bauwerkes wird in der Unterlage U10 (*Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton; K-UTEC, P266, Stand 17.09.2008*) dokumentiert.

Aufbauend auf einleitenden Ausführungen zur Zielstellung und grundsätzlichen Methodik der Vorgehensweise beinhaltet U10 in Kapitel 3 Erläuterungen zum Stand von Wissenschaft und Technik bei Verschlussbauwerken aus Magnesiabetonen. Kapitel 4 dokumentiert die aus dem Standort, dem Stilllegungskonzept und dem Langzeitsicherheitsnachweis resultierenden Anforderungen an das Abdichtungsbauwerk. Eine Charakterisierung der geologischen und gebirgsmechanischen Standortverhältnisse im Bereich des geplanten Abdichtungsbauwerkes erfolgt in Kapitel 5. Aufbauend auf einer Beschreibung der mechanischen und hydraulischen Materialeigenschaften des für die Querschnittsabdichtung im Hauptanhydrit planmäßig vorgesehenen Magnesiabetons vom Typ DBM2, seiner Verarbeitungseigenschaften und der Verbundfestigkeit Anhydrit-DBM2 in Kapitel 6 folgen in Kapitel 7 Ausführungen zur Standortvorbereitung, zum Bauwerksentwurf und zur Dimensionierung sowie zur bautechnischen Realisierung. Kapitel 8 dokumentiert die Nachweise zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit. Die Kapitel 9 und 10 beinhalten schließlich Ausführungen zur Qualitätssicherung und allgemeine bautechnische Hinweise.

Von besonderer Bedeutung für das geplante Abdichtungsbauwerk ist gemäß den Ausführungen in U10, dass bedingt durch die Nähe des Bauwerkes zu dem auf der lösungszutrittsgefährdeten westlichen Seite lokalisierten Kalilager E das Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit sowohl gegen reine NaCl-Lösung als auch gegen MgCl<sub>2</sub>-haltige NaCl-Lösung resistent auszuliegen ist. Um diese Forderung über den aus dem radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis abgeleiteten Zeitraum von ca. 30.000 Jahren zu gewährleisten, wird ein mehrteiliges Abdichtungsbauwerk konzipiert, dessen 1. Teil aus einem zementbasierten Konstruktionsmörtel besteht, der weitgehend resistent gegenüber reiner NaCl-Lösung ist (2 Dichtelemente an den je-

weiligen westlichen und östlichen Außenseiten des Gesamtbauwerks). Der 2. Teil besteht aus 4 Hauptdichtelementen aus einem MgO-Baustoff der Rezeptur DBM2 zwischen den außen liegenden Vordämmen. Diese MgO-Dichtelemente sind korrosionsstabil gegenüber einer NaCl-Lösung, die mehr als 50 g MgCl<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>O enthält.

Eine weitere Besonderheit des Abdichtungsbauwerkes resultiert aus der standortspezifischen Randbedingung. Seine Lokation im Hauptanhydrit bedingt, dass auch langfristig keine Verbesserung der Standsicherheit und Durchlässigkeit in Folge eines Aufkriechens des Gebirges auf das Dammbauwerk angesetzt werden kann und somit die langfristig geforderte Gebrauchstauglichkeit (Dichtheit) bereits unmittelbar nach dem Einbau sicher gewährleistet werden muss. Auch ist zu berücksichtigen, dass die thermodynamische Stabilität des MgO-Baustoffes als gegeben eingeschätzt wird, wenn im abgebundenen Zustand chemisch die so genannte 3:1:8 Phase vorliegt ( $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ ). Die 3:1:8 Phase entsteht aus der unmittelbar nach Baustoffherstellung vorhandenen 5:1:8 Phase ( $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ ) durch Phasenneubildungs- und Phasenumbildungsprozesse. Nach derzeitigen Erkenntnissen kann die Überführung der 5:1:8 Phase in die 3:1:8 Phase über die Ausgangsrezepturen der Suspension gefördert und in begrenztem Maß gesteuert werden. Vermutet wird, dass die Phasenumbildung von der Art des eingesetzten MgO abhängig ist und sich u. U. auch im Kontakt mit MgCl<sub>2</sub>-Lösung (insbesondere wenn CaCl<sub>2</sub>-Anteile vorhanden sein sollten) entwickelt. Die genauen Umbildungsvorgänge sind derzeit jedoch noch nicht vollständig geklärt.

Der Abbindeprozess des MgO-Baustoffes ist charakterisiert durch eine signifikant exotherme Reaktion, die bei unkontrollierter Entwicklung zu thermisch induzierten Rissen während der nachfolgenden Abkühlung führen kann. Die resultierenden Temperaturen können durch die Rezeptur, die chemische Aktivität der verwendeten MgO-Variante und durch andere technische Maßnahmen (z.B. Zuschlagstoffe) beeinflusst werden.

Schließlich kann der Baustoff unter bestimmten Voraussetzungen beim Abbinden eine Volumenexpansion entwickeln, die im eingebauten Zustand einen Kristallisationsdruck hervorruft. Als Auslegungsanforderungen an das Abdichtungsbauwerk werden in U10 zusammengestellt:

Funktionszeitraum:	mindestens 30.000 Jahre
Maximaler Fluiddruck:	6 MPa (Aufbau innerhalb von 50 Jahren)



Gebirgsdruck:	anisotrop; vertikal 11,0 MPa; horizontal 7,0 MPa
Querschnittsfläche/Gesamtlänge:	22,5 m <sup>2</sup> / 150 m
Anfangspermeabilität:	$k \leq 10^{-18}$ m <sup>2</sup> (querschnittsgemittelt), kann bei Korrosion um 4 Größenordnungen abnehmen
Korrosionsbeständigkeit:	stabil gegen gesättigte NaCl-Lösung und IP21-Lösung

Darüber hinaus wird ausgeführt, dass das in Richtung Ostfeld lokalisierte Abdichtungssegment neben der geforderten Langzeitabdichtung auch die Anforderungen einer temporären Abdichtung (Funktion 12 Jahre, 80 m Überstauhöhe, möglichst hohe Korrosionsstabilität) gewährleisten muss.

Die in Kapitel 5 der Unterlage U10 dokumentierten geologischen Standortverhältnisse können unter Hinzuziehung ergänzender Ausführungen der Prüfer wie folgt charakterisiert werden: Der geplante Standort für das Abdichtungsbauwerk befindet sich auf der 4. Sohle (-372 m NN) des Ostquerschlages zwischen den Streckenmetern 900 und 1050. Er liegt im Bereich der westlichen Anhydritflanke der Ostmulde zwischen Kalilagerteil E im Westen und den Abbauen des Ostfeldes im Osten. Im Westen grenzt das Abdichtungsbauwerk unmittelbar an eine DGL-Schichtenfolge, die eine potentielle Wegsamkeit darstellt, Bild 7.1.

Der gebänderte Deckanhydrit (z2DA) steht im Ostquerschlag der 4. Sohle ab dem Streckenmeter 879,5 m an und ist zwischen 1,8 und 2,2 m mächtig. Ihm liegt der Graue Salzton (z3GT) bis etwa zum Meter 895 m auf. Der Deckanhydrit ist vollständig, der Graue Salzton überwiegend verbaut. Der Salzton ist von bis zu 1 cm mächtigen und 10 cm langen Fiederklüften durchzogen, die mit Steinsalz und Carnallit verheilt sind (→ Foto Mo 003/02 in U17). Das Leine-Karbonat (z3LK) steht im 4. Hauptquerschlag / -372 m NN-Sohle beim Streckenmeter 889,0 – 889,8 an. Das Gestein ist von Haarklüften durchzogen. Einzelne größere Klüfte bis 10 cm enthalten idiomorphen Halit und Carnallit. Der Schichteinfall der DGL-Formation erfolgt mit etwa 40 Grad.

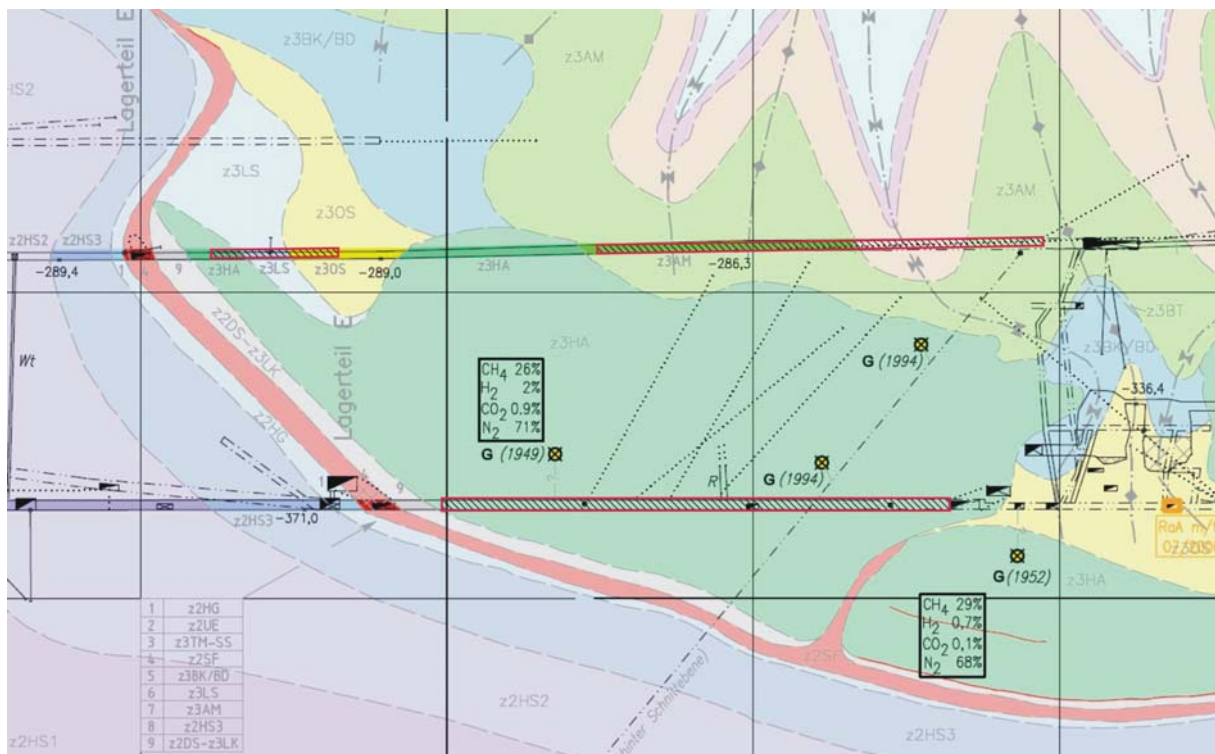


Bild 7.1 Geologischer Schnitt 3.1 U15 mit den Abdichtungsbauwerken zum Ostfeld auf der 2. und 4. Sohle

Östlich der DGL schließt sich der Hauptanhydrit (z3HA) an (Streckenmeter 889,8 bis 1053,5), der nahezu in seiner vollständigen Ausdehnung über die –372 m NN-Sohle abgedichtet werden soll. Östlich schließen die Schichten des Liniensalzes (z3LS) an. Im Hangenden des geplanten Bauwerkes steht der Hauptanhydrit mit einer Mächtigkeit von ca. 55 m bis maximal 90 m an. Darüber folgen die Schichten des Anhydritmittelsalzes (z3AM), des Tonmittelsalzes/Schwadensalzes (z3TM-SS) und des Zechsteins (z4). Bild 7.1 zeigt einen Ausschnitt des geologischen Schnitttrisses 3.1, in dem die geplanten Standorte der Abdichtungsbauwerke auf der 4. und der 2. Sohle gekennzeichnet sind. Im Liegenden des Ostquerschlages fällt der Hauptanhydrit nach Osten ein und erreicht dort eine Mächtigkeit von 40 m. Darunter folgen die Schichten vom Decksteinsalz (z2DS) bis zum Leine-Karbonat (z3LK), das Kaliflöz Staßfurt (z2SF) und das Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2HS). Die horizontale Ausdehnung des Hauptanhydrits bezüglich des geplanten Standortes beträgt in nördlicher Richtung ca. 200 m und in südlicher Richtung mehr als 200 m.

Der Hauptanhydrit z3AH wird basierend auf sedimentären Gefügeunterschieden, die durch die Verteilung von magnesitischen Bereichen hervorgerufen werden, in 13 Einheiten (z3HA 1 bis z3HA 13) gegliedert. Alle stratigraphischen Untereinheiten sind am Standort der –372 m NN-Sohle in unterschiedlichen Mächtigkeiten ausgebildet (U16). Der Flaser- und Bänderanhydrit (z3HA9) ist mit ca. 80 Streckenmetern (951,5 bis 1031,5 m) am mächtigsten. Das Anhydritgestein ist feinkristallin. Dunkelgraue Bündel und Bänder umfließen hellgraue Anhydritblasten bis 1 cm Größe. Es ist durchsetzt von bis zu 5 mm großen roten Carnallit-Nestern, deren Anteil zum Liegenden abnimmt.

Der Hauptanhydrit ist im Abdichtungsbereich geklüftet. Die Klüfte sind geschlossen. Einlagerungen bzw. Klüftfüllungen mit > 10 mm Mächtigkeit werden nicht angegeben. Die Abstände der überwiegend steil einfallenden Klüfte betragen i. d. R. mehrere Meter. Das Maximum der Klüft-Streichrichtungen liegt bei 45 Gon E /245 Gon W und der Haupteinfallwinkel beträgt 77 Gon. Der Winkel zwischen der Achse des Hauptquerschlages und dem Hauptstreichen der Klüfte beträgt 40 Gon, so dass die i. d. R. geschlossenen Klüfte meist linienförmig an der Stoßoberfläche des Querschlages austreichen. Foto Mo 004/08 (U17) zeigt eine dm-weite Klüftfolge im Bänderanhydrit (z3HA11: 1038,0 bis 1052,5 m , Foto 1046 m), die mit weißlich bis gelbbraunem Carnallit gefüllt ist.

Im Bereich der Streckenabdichtung befinden sich mehrere teils ältere Bohrungen zur Erkundung des Anhydrits und zur Gewinnung von Prüfkörpern. Es handelt sich um 17YEQ01 RB001 bis RB004, die von der 4. Sohle jeweils um 85 m im Winkel von 45 bis 70 Grad ansteigend nach Osten gestoßen wurden. Die drei Bohrungen RB001, RB003 und RB004 schließen das Hangende des Hauptanhydrits (z3HA) auf, das Anhydritmittelsalz (z3AM), in der RB003 bis zum Anhydritmittel 4 (z3AM4/ha) (U15, U16). Der vertikale Abstand der RB001 und RB003 zur 2. Sohle beträgt weniger als 10 m. Die genaue Lage und der Zustand von drei Bohrungen in der Firste des Streckenabschnittes wurden erst im Sommer 2009 ermittelt.

Bezüglich der weiterhin in Kapitel 5 U10 dokumentierten Ausführungen zu den gebirgsmechanischen Standortverhältnissen bleibt festzuhalten:

Die mechanischen und hydraulischen Kennwerte des Hauptanhydrits werden als Ergebnisse von Labor- und in-situ-Versuchen den bereits geprüften Verfahrensunterlagen entnommen.

*Parameter für die Festigkeit auf den Klüften des Anhydrits liegen nicht vor“* (U10, S. 35). Eine analoge Aussage gilt gemäß U10 für die Zugfestigkeit des Anhydrits. In Ermangelung vorstehender Kennwerte werden zur Charakterisierung der Verbandsfestigkeit in U10 die im Labor an ungeklüfteten Proben ermittelten Nachbruchfestigkeiten verwendet. Bezüglich der physikalischen Modellierung der Klüfte wird in Kapitel 5 U10 ausgeführt, dass die Klüfte im Berechnungsmodell „verschmiert“ durch so genannte ubiquitous joints berücksichtigt werden. Die Hauptkluftrichtung wird im Berechnungsmodell mit 77 Gon einfallend und 40 Gon zur Streckenachse orientiert berücksichtigt. Als Materialparameter für den Hauptanhydrit werden genannt:

Bruchfestigkeit: Kohäsion  $c_{\text{bruch}} = 22,8 \text{ MPa}$  ; Reibungswinkel  $\varphi_{\text{bruch}} = 40^\circ$

Restfestigkeit: Kohäsion  $c_{\text{rest}} = 2,4 \text{ MPa}$ ; Reibungswinkel  $\varphi_{\text{rest}} = 44^\circ$

Für die Zugfestigkeiten wird generell  $\sigma_z = 0,2 \text{ MPa}$  angenommen.

Die in den Verfahrensunterlagen mitgeteilten Gebirgspermeabilitäten (integral gemessen in > 200 m langen Bohrlöchern) variieren zwischen  $10^{-16} \text{ m}^2$  und  $< 10^{-20} \text{ m}^2$ .

Bezüglich der Rezeptur des MgO-Baustoffs DBM 2 (L04) (U10, S. 39) wird in Kapitel 6 ausgeführt, dass die Voraussetzungen für eine bevorzugte Bildung der 3:1:8 Phase gegeben sind. Über die chemische Aktivität der zu verwendenden MgO-Varianten wird keine Aussage gemacht. Die Zusammensetzung der MgO-Rezeptur wird wie folgt angegeben:

	[Ma-%]	[g/l Suspens.]
MgO	10,5	236
Quarzsand	34,4	773
Anhydritmehl	29,4	660
Mikrosilika	4,5	101
MgCl <sub>2</sub> -Lösung (390 – 430 g/l)	20,8	467
Fließmittel	0,4	9

Von besonderer Bedeutung für die Funktionalität der Abdichtungselemente ist entsprechend den einleitenden Ausführungen das so genannte Quellverhalten bzw. besser der bei Aushärtung des Materials resultierende Kristallisationsdruck. Er wurde in Laborversuchen an Prüfkörpern im nicht eingespannten Zustand nach einer Standzeit von 90 d über die Volumendehnung ( $2,1 \pm 0,3 \text{ Vol.}\%$ ) und im eingespannten Zustand durch radiale Kristallisationsdrücke von 2,0 MPa bzw. 3,0 MPa bestimmt (2 Prüfkörper). In einem Technikumsversuch an einem liegenden Zylinder mit einem Durchmesser von  $d = 1 \text{ m}$  und einer Länge von  $l = 2 \text{ m}$  wurde an 3 Messstellen die in Bild 7.2 gezeigte Entwicklung des Kristallisationsdruckes beobachtet.

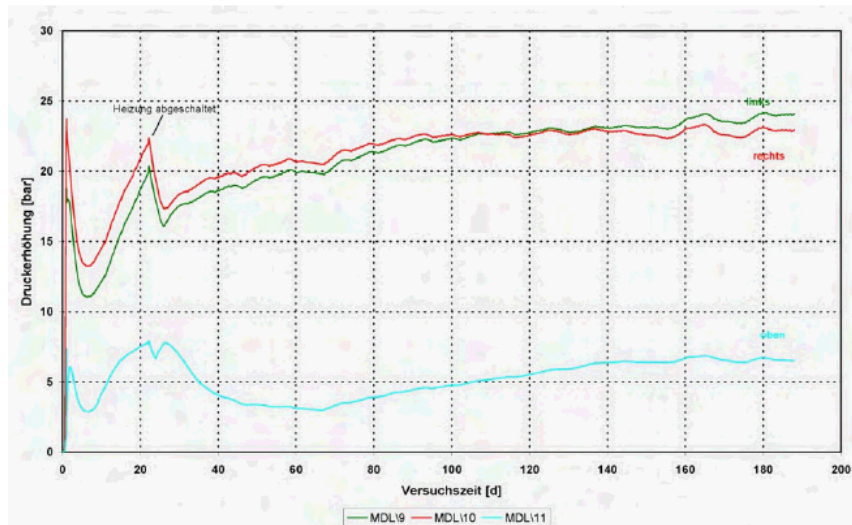


Bild 7.2 Ergebnisse der Quelldruckmessungen am Prüfkörper des Technikumsversuches: rote und grüne Kurven: Drucksensoren „links“ bzw. „rechts“; hellblaue Kurve: Drucksensor: „oben“ (U10, Abb. 2)

Entsprechend der Darstellung in Bild 7.1 wurden an den Sensoren „rechts“ und „links“ Kristallisationsdrücke von effektiv ca. 23 bar und am Sensor „oben“ ein Kristallisationsdruck von 7 bar gemessen. Die an kleinmaßstäblichen Prüfkörpern im Laborversuch ermittelten Kristallisationsdrücke wurden damit an 2 von 3 Messstellen im Technikumsversuch bestätigt. An der dritten Messstelle wurden sie nicht erreicht. Eine Begründung für diese Differenzen kann gemäß Aussage in U10 nicht angegeben werden.

Die an Prüfkörpern des Technikumsversuches ermittelten Gaspermeabilitäten variieren gemäß Aussage in U10 zwischen  $k = 4,3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  und  $k = 1,8 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ .

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften des MgO-Betons werden des Weiteren genannt:

Kohäsion  $c = 16,8 \text{ MPa}$ ;

Einaxiale Druckfestigkeit:  $\sigma_D = 55,3 \text{ MPa}$ .

Kompaktionsmodul:  $K = 1 \text{ GPa}$

Verbundfestigkeit der Kontaktfläche DBM2/Hauptanhydrit:  $\sigma_z = 0,28 \text{ MPa}$ .

Als Rechenwert für die Nachweise zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit werden gemäß U10 für die Kontaktfläche Anhydrit-DBM2 angesetzt:  $\sigma_z = 0,19$  MPa,  $c = 0,29$  MPa und  $\varphi = 70^\circ$ . Der hohe Wert für  $\varphi$  wird nicht als Gleitreibungswinkel, sondern als Folge des Abscherens von Unebenheiten auf der zwangsweise vorgegebenen unebenen Scherfläche gedeutet.

Für die Vordichtungen des Anhydritverschlussbauwerkes soll gemäß Ausführung in U10 ein kommerziell verfügbarer Konstruktionsmörtel der Firma Quick-Mix vom Typ Z 01.8 (L-NW/HS) eingesetzt werden. Er ist bedingt durch den Einsatz von Hochofenzement charakterisiert durch eine langsame Anfangserhärtung (L), eine niedrige Hydratationswärme (NW) und einen hohen Sulfatwiderstand (HS). Als mechanische und hydraulische Kennwerte werden für den Konstruktionsmörtel genannt:

Prismatische Prüfkörper (40 x 40 x 160mm):

7d-Festigkeitswert:  $45,5 \pm 6,7$  MPa

14d- Festigkeitswert:  $56,3 \pm 6,1$  MPa

28d- Festigkeitswert:  $61,1 \pm 5,4$  MPa

Zylindrische Prüfkörper (  $d = 100$ mm,  $h = 200$ mm)

28d- Festigkeitswert:  $69,0 \pm 1,6$  MPa

E-Modul:  $24,3$  GPa

Dehnung bei  $\sigma_u = 0,5$  MPa:  $0,0019$  mm

Dehnung bei  $\sigma_u = 23$  MPa:  $0,0947$  mm

Biegezugfestigkeit 28d:  $8,2 \pm 0,3$  MPa

Dehnung/Schwindung:  $0,1-0,4$ Vol% über 28d bei  $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$

Gaspermeabilität:  $4,1 \times 10^{-19} - 3,8 \times 10^{-19} \text{ m}^2$

Lösungspemeabilität:  $3,2 \times 10^{-20} - 3,1 \times 10^{-20} \text{ m}^2$  (NaCl-Lösung)

$4,0 \times 10^{-20} - < 2,0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$  (Q-Lösung)

Das in U10 dokumentierte Grundkonzept für das Abdichtungsbauwerk zeigt Bild 7.3. Die grundrissliche Lage des Abdichtungsbauwerkes im Grubengebäude des ERA Morsleben ist in Bild 7.4 visualisiert.

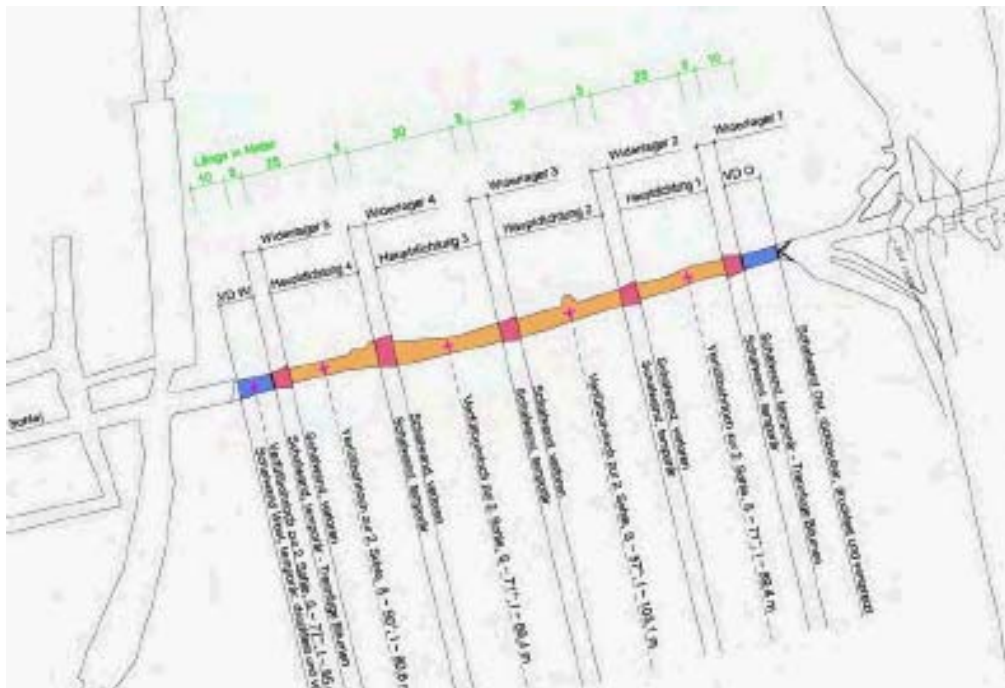


Bild 7.3 Grundkonzept des Abdichtungsbauwerkes: blau (westliches und östliches Ende) Vordämme W und O; ocker: 4 Hauptdämme aus DBM 2, beidseits eingespannt in Widerlager (rot); (U10, Abb.3)

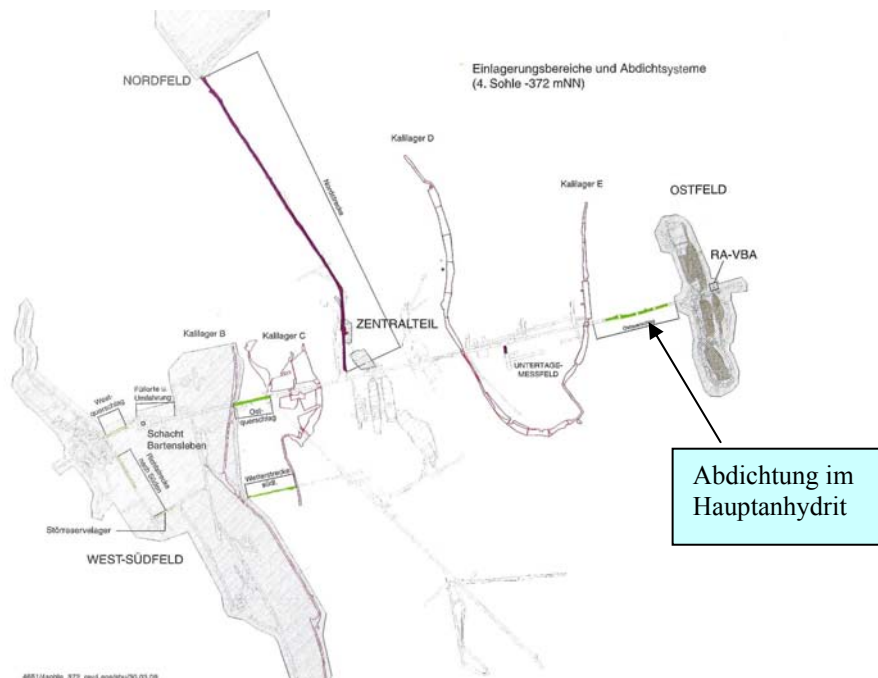


Bild 7.4: Lage der Abdichtung im Hauptanhydrit auf der 4. Sohle

Zur Charakterisierung des Planungskonzeptes wird in U10, S. 51 ausgeführt: *„Das Grundkonzept für das Abdichtungsbauwerk geht von einem dichten und gegenüber den potenziellen Zutrittsfluiden unlöslichen Gebirge aus. Die ggf. vorhandenen aufgelockerten und geschädigten konturnahen Gebirgsbereiche werden durch geeignete Maßnahmen entfernt.*

*Der hydraulische Widerstand wird durch einen geringpermeablen Magnesiabeton mit einem Quellpotenzial gewährleistet. Der mechanische Lastabtrag des Fluiddrucks wird durch die entsprechende Anbindung des Dammkörpers an das Gebirge sowie durch die mechanischen Eigenschaften des Magnesiabetons (Quelldruck, Steifigkeit) erreicht. Das Abdichtungsbauwerk vereinigt damit zugleich Lastabtrags- und Dichtungsfunktionen.*

*Durch das Quellverhalten des Magnesiabetons erfolgen eine Überdrückung der Kontaktfuge und Einprägung einer Druckeinspannung. Dadurch wird die wirksame Abdichtung des Kontaktbereiches zwischen Magnesiabeton und Anhydritgebirge gegen den Fluiddruck erreicht.*

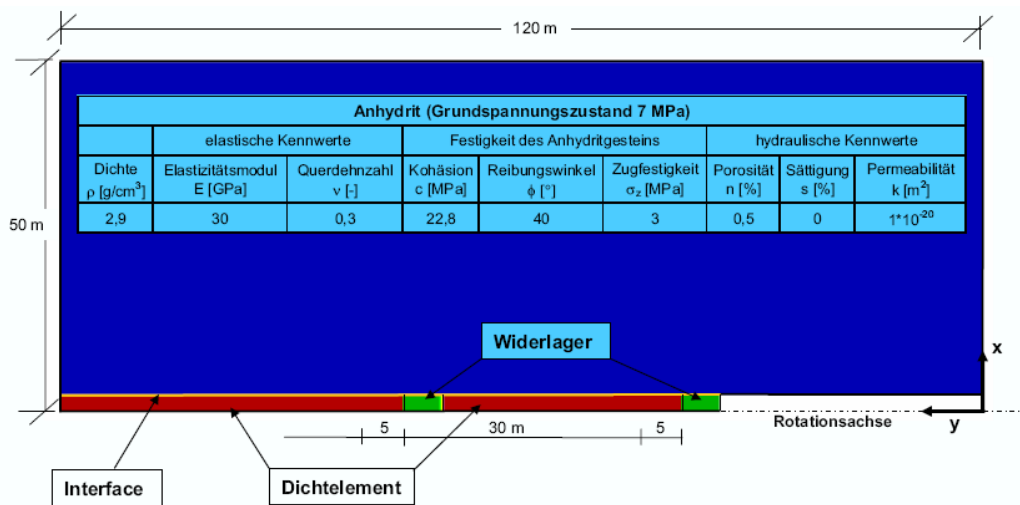
*Für das Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit wird die gesamte zur Verfügung stehende Länge von 155 m genutzt. Das Abdichtungsbauwerk selbst besteht aus 4 Hauptdichtelementen und 5 Widerlagern jeweils aus Magnesiabeton der Rezeptur DBM 2 sowie aus 2 Vordämmen aus einem zementgebundenen Konstruktionsmörtel, die an den Stirnseiten angeordnet sind. Die Vordichtungen wirken als „quasi diversitäres“ Dichtsystem gegenüber nicht auszuschließenden NaCl-Lösungen. Die dem Ostfeld zugewandte Vordichtung (VD O) übernimmt zusätzlich die Aufgaben einer temporären Abdichtung gegen Fluide aus der Verfüllung des Einlagerungsbereichs Ostfeld.“*

Im Rahmen der Ausführungen zur Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Abdichtungsbauwerkes werden in Kapitel 8 der Unterlage U10 die Lastfälle “trockene Grube” und “geflutete Grube” betrachtet. Für den Lastfall “trockene Grube” wird konservativ eingeschätzt, dass *im ungünstigsten, jedoch nur theoretisch denkbaren Fall, der Betonkern einaxial mit dem theoretischen Überlagerungsdruck von 11 MPa beansprucht wird.* Da die für den MgO-Beton angesetzte einaxiale Druckfestigkeit von  $\sigma_D = 55,3$  MPa um den Faktor 5 größer ist als der maximal mögliche Überlagerungsdruck von 11 MPa wird eingeschätzt, dass



hierdurch keine Gefährdung für das Bauwerk entstehen kann. Dabei wird gemäß Aussage in U10 unterstellt, dass *der Nachweis des Erhalts der Einbaupermeabilität für den Lastfall “trockene Grube” geführt ist, wenn die einaxiale Druckfestigkeit des MgO-Betons größer ist, als der theoretische Überlagerungsdruck von 11 MPa.*

Die Nachweise zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für den Lastfall “geflutete Grube” erfolgen auf der Grundlage mechanisch-hydraulisch gekoppelter numerischer Berechnungen. Hierzu werden ein rotationssymmetrisches Funktionsmodell sowie ein dreidimensionales Berechnungsmodell verwendet. Das rotationssymmetrische Funktionsmodell umfasst in der radialen Ausdehnung 50m und in Achsrichtung 120m. Die Modellabmessungen, die berücksichtigten Homogenbereiche und die verwendeten Materialparameter zeigt Bild 7.5. Ausführungen zur Diskretisierung (Anzahl der Zonen, Anzahl der Knoten) können der Unterlage U10 nicht entnommen werden.



MgO-Beton (Vorspannung 1 MPa)									Festigkeit Interface		
Dichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	elastische Kennwerte		Festigkeit			hydraulische Kennwerte			Kohäsion c [MPa]	Reibungs- winkel $\phi$ [°]	Zugfestigkeit $\sigma_z$ [MPa]
	Anfangskompaktions- modul K [GPa]	Querdehnzahl v [-]	Kohäsion c [MPa]	Reibungswinkel $\phi$ [°]	Zugfestigkeit $\sigma_z$ [MPa]	Porosität n [%]	Sättigung s [%]	Permeabilität k [m <sup>2</sup> ]			
2,17	1	0,22	16,8	27,4	2,4	19	75	1*10 <sup>-18</sup>	0,29	70	0,19

Bild 7.4: Rotationssymmetrisches Funktionsmodell mit Kennwerten für den Referenzlastfall a (Anlage 8.1 / U10)

Ziel der mit dem rotationssymmetrischen Berechnungsmodell durchgeführten Berechnungen ist es gemäß Aussage in U10 nachzuweisen, dass sich die beim Einbau erreichte Permeabilität des Abdichtungssystems infolge der mechanischen Belastungen aus dem Gebirge und dem Fluiddruck nicht verschlechtert. Die Berechnungen starten, nachdem die Einflüsse aus Temperatur und Quellen weitgehend abgeklungen sind. Werden im Verlauf der Berechnungen keine Überschreitungen der Bruchfestigkeit im konturnahen Gebirge, im Baustoff und im Kontaktbereich ausgewiesen, wird geschlussfolgert, dass auch keine Erhöhung der Permeabilität zu erwarten ist, so dass der Nachweis der Funktionsfähigkeit bzw. Gebrauchstauglichkeit damit geführt ist. Der Nachweis der Standsicherheit ergibt sich .... durch die Auswertung der Axialverschiebungen, d.h. gemäß Ausführung in U10, dass der Nachweis der Standsicherheit geführt ist, wenn im Kontaktbereich zwischen Betonkörper und Gebirge durch die Berechnungen keine Festigkeitsüberschreitungen ausgewiesen werden.

Mit dem rotationssymmetrischen Berechnungsmodell werden insgesamt 7 Lastfälle untersucht. Ausgehend von einem in Anlehnung an die Ergebnisse von Spannungsmessungen vorgegebenen isotropen Primärspannungszustand von  $p_G = 7 \text{ MPa}$  wird im ersten Bauzustand der Ostquerschlag ausgebrochen. Anschließend erfolgt im zweiten Bauzustand der Einbau des Abdichtungsbauwerkes (Dichtelemente und Widerlager). Zur Charakterisierung der Lastfälle wird ausgeführt:

- Lastfall a: Referenzlastfall; Vorgabe einer Vorspannung von 1 MPa im Dichtelement; keine Vorspannung im druckseitigen Widerlager; kein Verbund zwischen druckseitigem Widerlager und Anhydrit; Fluiddruck auf druckseitiges Widerlager und Gebirgskontur des offenen Streckenbereiches; Fluiddruckaufbau über 50 Jahre von 0 MPa auf 6 MPa.
- Lastfall b: wie Referenzlastfall, jedoch Permeabilität der konturnahen 20cm des Hauptanhydrits auf  $k = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  erhöht (Lastfall a:  $k = 1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ).
- Lastfall c: wie Referenzlastfall, jedoch Permeabilität der konturnahen 20cm des Hauptanhydrits auf  $k = 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  erhöht (Lastfall a:  $k = 1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ).
- Lastfall e: wie Referenzlastfall, jedoch Fluiddruckaufbau über einen Zeitraum von 5 Jahren auf 6 MPa.
- Lastfall g: wie Referenzlastfall, jedoch Permeabilität des MgO-Betons auf  $k = 1 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  reduziert (Lastfall a:  $k = 1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ).

Lastfall h: wie Referenzlastfall, jedoch Kompaktionsmodul des MgO-Betons auf  $K = 0,5$  GPa reduziert (Lastfall a:  $K = 1$  GPa).

Lastfall i: wie Referenzlastfall, jedoch Vorspannung des Dichtelementes auf 0,5 MPa reduziert (Lastfall a: Vorspannung 1 MPa).

Im Ergebnis der Berechnungen wird ausgeführt: *Zusammenfassend wird aus den Ergebnissen der Berechnungen geschlussfolgert, dass die beim Einbau erreichte Permeabilität während des Durchströmungsvorgangs im Bereich des Dichtelementes und des Kontaktbereiches bei Gewährleistung einer Vorspannung im Dichtelement von ca. 1 MPa erhalten bleibt. Festigkeitsüberschreitungen werden rechnerisch weder im Bereich der Kontaktfläche Dichtelement/Hauptanhydrit noch im Dichtelement selbst ausgewiesen.*

Für die dreidimensionalen gekoppelten mechanisch-hydraulischen Berechnungen wurde das in Bild 7.5 gezeigte Berechnungsmodell verwendet. *Das Modell umfasst in der Breite und Höhe jeweils 100m und in Achsrichtung 80m.*

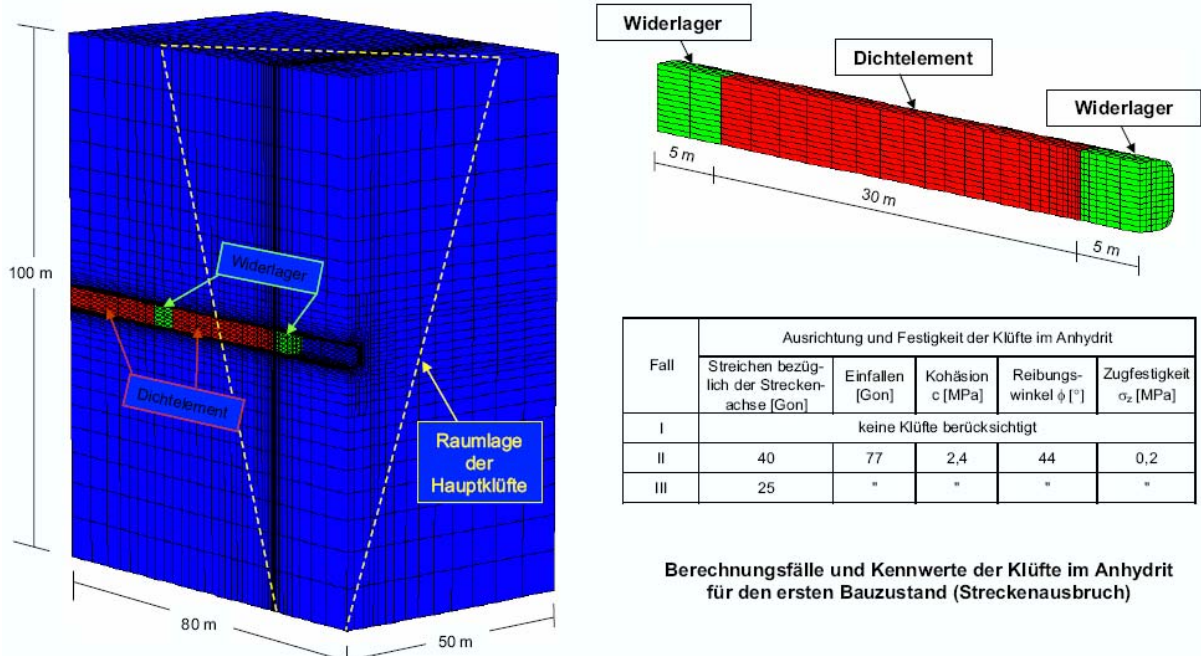


Bild 7.5: Dreidimensionales Berechnungsmodell und Berechnungsfälle für den ersten Bauzustand (Streckenausbruch), (Anlage 8.9, U10)

*Im Unterschied zum rotationssymmetrischen Berechnungsmodell wird bei dem dreidimensionalen Modell die Querschnittsgeometrie (4m x 5m) realitätsnah abgebildet und es können Klüfte in ihrer Raumlage “verschmiert” berücksichtigt werden. Ausführungen zur Diskretisierung (Anzahl der Zonen, Anzahl der Knoten) des 3D-Berechnungsmodells können der Unterlage U10 nicht entnommen werden.*

Besondere Zielstellungen der mit dem 3D-Berechnungsmodell durchgeführten rechnerischen Analysen sind gemäß Ausführung in U10 die Ermittlung der Gebirgsspannungen im konturnahen Hauptanhydrit nach dem ggf. erforderlichen Nachschnitt der Streckenkontur und während der Fluidruckbeaufschlagung sowie eine Bewertung des Kontaktbereiches MgO-Beton-Hauptanhydrit. Zu berücksichtigen hierbei ist, *dass der Kontaktbereich nicht durch ein Interface abgebildet ist (fester Verbund), sodass für die Bewertung die in den Konturelementen des Anhydrits wirkenden Spannungen ausgewertet werden müssen.*

Mit dem dreidimensionalen Berechnungsmodell werden insgesamt 3 Lastfälle untersucht. *Der Berechnungsablauf ist analog zum Berechnungsablauf am rotationssymmetrischen Modell. In Anlehnung an die Ergebnisse der Spannungsmessungen wird ein Grundspannungszustand von 7 MPa horizontal und 11 MPa vertikal simuliert. Zur Charakterisierung der Lastfälle wird ausgeführt:*

- Lastfall I: Kennwerte und Berechnungsablauf entsprechend Referenzlastfall a für das rotationssymmetrische Berechnungsmodell; Anhydrit nicht geklüftet
- Lastfall II: wie Lastfall I, jedoch *Klüfte im Hauptanhydrit mit ihrer Hauptkluftrichtung (Streichen 40 Gon, Einfallen 77 Gon) “verschmiert” im Modell simuliert.*
- Lastfall III: wie Lastfall II, jedoch Streichen der Klüfte entsprechend Nebenkluftrichtung mit 25 Gon simuliert.

Im Ergebnis der Berechnungen wird ausgeführt: *Die Ergebnisse der dreidimensionalen Berechnungen sind tendenziell mit denen am rotationssymmetrischen Modell vergleichbar. Auch hier wurden für den Fall II über den gesamten Berechnungszeitraum im Dichtelement und dem konturnahen Anhydrit im Bereich des Dichtelementes keine Festigkeitsüberschreitungen ausgewiesen. Die Schubbeanspruchungen für den Kontaktbereich sind mit denen am rotationssymmetrischen Modell vergleichbar. Dementsprechend wird aus den Ergebnissen der numerischen Berechnungen*

*geschlussfolgert, dass die beim Einbau erreichte Permeabilität während des Durchströmungsvorgangs im Bereich des Dichtelementes sowie des Kontaktbereiches und des konturnahen Anhydrits im Bereich des Dichtelementes bei Gewährleistung einer Vorspannung im Dichtelement von ca. 1 MPa erhalten bleibt.*

Eine wesentliche Voraussetzung für die Gültigkeit der Aussagen zu Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit ist die Langzeitbeständigkeit der Baustoffe, d.h. der Nachweis, dass die bei einem Lösungszutritt in das Abdichtungsbauwerk eintretenden Fluide nicht zu chemischen und geochemischen Prozessen führen, in deren Konsequenz die für erforderlich eingeschätzten Trag- und Dichtheitseigenschaften verletzt werden. Gemäß den Ausführungen in U10 wurden zur Nachweisführung der chemischen und geochemischen Langzeitbeständigkeit

- a) ausgehend von den Rezepturen die zu erwartenden Phasenbildungen und Restporenlösungen beim Abbinden auf thermodynamischer Grundlage berechnet,*
- b) mittels Pulverröntgendiffraktometrie (PXRD) der Phasenbestand abgebundener Proben ermittelt,*
- c) mittels thermischer Analyse die Bildungsformen von Wasser in den abgebundenen Proben untersucht,*
- d) aus den Ergebnissen von a) bis c) der Ausgangszustand für die Berechnungen festgelegt und*
- e) thermodynamische Berechnungen zu chemischen Veränderungen bei Durchströmung eines Segments durchgeführt.*

Die mit dem Programm CHEMDARCY durchgeführten Durchströmungsberechnungen erfolgten ausschließlich unter Berücksichtigung einer gesättigten NaCl-Lösung, da diese im Hinblick auf die geochemische Langzeitstabilität des MgO-Betons das größte Schädigungspotenzial aufweist. Für den MgO-Beton der Rezeptur DBM2 wurde konservativ eine Anfangspermeabilität von  $10^{-18} \text{ m}^2$  zugrunde gelegt, die etwa eine Größenordnung oberhalb der im Labor gemessenen Gaspermeabilitäten liegt. Der hydraulische Widerstand der Vordichtung aus dem zementgebundenen Konstruktionsmörtel wurde bei den Betrachtungen ebenfalls nicht berücksichtigt (konservativ).

Im Ergebnis der Berechnungen wird ausgeführt:

- *In den durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, dass die Abbindereaktion des vorgesehenen MgO-Betons der Rezeptur DBM2 tatsächlich fast ausschließlich die Sorelphase 3-1-8 liefert.*
- Berechnungen zur Durchströmung eines Dichtelementes von 25m Länge mit einer gesättigten NaCl-Lösung unter einem Fluiddruck von 6 MPa haben gezeigt, dass bei Ansatz einer Anfangsporosität von 20% abhängig von der verwendeten Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung Zeiträume von 4800 bzw. 11300 Jahren erforderlich sind, um die festigkeits- bzw. strukturbildende Sorelphase über 25m Länge zu zersetzen. Für das aus vier Segmenten zuzüglich des Widerlagers bestehende Abdichtungsbauwerk werden für die Gesamtdauer bis zur vollständigen Zersetzung der Sorelphase gemäß Aussage in U10 abhängig von der verwendeten Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung Zeiträume von etwa 25.900 Jahren bzw. 61.000 Jahren berechnet.
- *Mit zunehmender Zersetzung der Sorelphase steigt die Porosität und Permeabilität in den Dichtelementen an. Bei vollständiger Zersetzung der Sorelphase und der ungünstigsten angenommenen Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung erhöht sich die Permeabilität in den Dichtelementen aus MgO-Beton auf einen Wert von ca.  $10^{-17} \text{ m}^2$ .*

Nachdem gemäß Aussage in U10 durch die vorstehend skizzierten Nachweise die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit nach Einbau des Abdichtungsbauwerkes und die chemische und geochemische Langzeitstabilität nach Zutritt von NaCl-Lösung belegt wurden, beinhaltet Kapitel 8.4 der Unterlage U10 Ausführungen zum so genannten bautechnischen Nachweis. Er beinhaltet *insbesondere den Nachweis der Rissfreiheit der Dichtelemente, die Auswirkungen der Temperaturdehnungen sowie die bautechnische Machbarkeit. Risse können in einem Bauwerk auftreten, wenn die Bauteilzugfestigkeit (Bauwerkswiderstand) kleiner ist als die durch die Beanspruchungen hervorgerufenen Spannungen (Einwirkungen). Hieraus folgt im Umkehrschluss aber auch, dass keine Risse entstehen können, solange keine Zugspannungen vorhanden sind. Dementsprechend ist der Nachweis der Rissfreiheit erbracht, wenn sichergestellt ist, dass jeder Punkt im Betonkörper zu jedem Zeitpunkt bzw. in jedem Bauzustand überdrückt ist.* Unter Verweis auf die in Bild 7.2 gezeigten messtechnischen Beobachtungen zur Entwicklung des Kristallisationsdruckes bei Behinderung der Ausdehnung wird in U10 bzgl. der Entstehung thermisch induzierter Risse in Folge der Abkühlung des MgO-Betons nach Abschluss der Hydratation ausgeführt: *Der*

*MgO-Betonkörper, der in seiner Ausdehnung durch die Widerlager behindert ist, kann nur eine thermisch induzierte Druckspannung aufbauen, die bei Abkühlung wieder verloren geht. Darüber hinaus führen die chemischen Abbindereaktionen .. zu einer Volumendehnung, die ebenfalls bei Behinderung der Dehnung in eine Druckspannung überführt wird. D.h., wenn die durch das Quellen entstandenen Druckspannungen immer größer sind als der Spannungsverlust bei der Abkühlung, dann müssen die aus dem MgO-Beton hergestellten Dichtelemente rissfrei sein. Ein separater rechnerischer Nachweis zur Rissfreiheit ... ist aufgrund des Quellverhaltens des MgO-Betons bzw. immer vorhandenen Druckspannungen nicht erforderlich. In der Konsequenz vorstehender Einschätzung wird in U10 gefordert, dass die beim Abbinden des MgO-Betons auftretenden axialen Lasten durch die Widerlager abgetragen werden können. Der hierfür erforderliche mechanische Nachweis erfolgt für ein vereinfacht als kegelstumpfförmig angenommenes Widerlager, dessen Mantelfläche mit 6° geneigt ist, auf analytischer Grundlage. Im Ergebnis der analytischen Berechnungen wird ausgeführt, dass die Lage des MgO-Betonwiderlagers gewährleistet ist und weder im MgO-Beton noch im anstehenden Anhydritgebirge Festigkeitsüberschreitungen zu besorgen sind.*

In der zusammenfassenden ingenieurtechnischen Einschätzung der Unterlage U10 wird schließlich ausgesagt: *Unter Zugrundelegung aller Aspekte und den durchgeführten Modellrechnungen kann geschlussfolgert werden, dass das Abdichtungsbauwerk aus dem MgO-Beton der Rezeptur DBM2 den Erfordernissen hinsichtlich Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für einen Zeitraum von 30.000 Jahren gerecht wird.*

## **7.2 Bewertung Verschlussbauwerk im Hauptanhydrit**

### **7.2.1 Gesamtkonzeption**

Als wesentliche Merkmale des in U10 dokumentierten Grundkonzeptes für das Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit können zusammengestellt werden:

- (a) Das Gebirge ist inert gegenüber den angreifenden Fluiden; die ALZ ist – sofern sie überhaupt existiert - vollständig entfernt.
- (b) Die Funktion einer bereits unmittelbar nach dem Einbau wie auch langfristig wirksamen Abdichtung gegenüber IP21-Lösung ist planmäßig Aufgabe der Hauptdichtelemente; die Gewährleistung einer unmittelbar nach dem Einbau und auch langfristig wirksamen Abdichtung gegenüber NaCl-Lösung ist Aufgabe der Vordämme.

- (c) Die Hauptdichtelemente sichern zugleich die Dichtheit und den Lastabtrag. Damit besteht Redundanz (4 Hauptdichtelemente). Eine Diversität der Dichtfunktion ist nicht gegeben, da alle 4 Hauptelemente bzgl. der Wirkprinzipien identisch ausgeführt sind.
- (d) Voraussetzung für die langfristige Verhinderung der Umströmung durch die Kontaktzone des Abdichtungsbauwerkes ist die Entwicklung eines ausreichenden Quelldruckes des Baustoffes DBM 2 in den Hauptdammelementen.
- (e) Der östliche Vordamm erfüllt zugleich die Funktion einer temporären Abdichtung des Ostfeldes; er muss deshalb allein alle Anforderungen einer temporären Abdichtung für den Zeitraum von mindestens 12 Jahren erfüllen.

Von besonderer Bedeutung für die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Abdichtungsbauwerkes sind insbesondere:

- (A) Entwicklung und dauerhafte Aufrechterhaltung eines ausreichend großen Kristallisationsdruckes in den MgO-Hauptdichtelementen (DBM2);
- (B) Korrosionsstabilität der MgO-Hauptdichtelemente (DBM2) gegenüber IP21-Lösung
- (C) Realisierung der erforderlichen Einspannung der Hauptelemente durch die Widerlager
- (D) Langzeitstabilität der Vordämme (Konstruktionsmörtel) gegenüber NaCl-Lösung
- (E) Erfolgreiche Injektion der Kontaktfuge der Vordämme, um einen Zutritt von NaCl-Lösung zu den Hauptdichtelementen zu verhindern.

Sowohl die vorstehend mit (a) bis (e) skizzierte Grundkonzeption des Abdichtungsbauwerkes wie auch die aus der Grundkonzeption resultierenden Voraussetzungen (A) bis (E) für die Gewährleistung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit werden durch U10 in sich schlüssig, nachvollziehbar und soweit ohne eigene Berechnungen und Laboruntersuchungen prüfbar plausibel dargestellt. Insgesamt wird eingeschätzt, dass die in U10 dokumentierten Ausführungen dem Stand von Wissenschaft und Technik im Grundsatz entsprechen. Vorstehende Aussage gilt auch unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die vom AS vorgestellte Konzeption nicht alle einleitend zusammengestellten Anforderungen an geotechnische Barrieren vollständig erfüllt. Die fehlende Trennung von dichtenden und lastabtragenden Elementen ist nach Einschätzung der Prüfer hinreichend begründet durch die standortbezogen optimierte Länge der abdichtenden Hauptelemente und die Berücksichtigung der aus der fehlenden Trennung resultierenden Anforderungen an die lastabtragende Funktion der Abdichtelemente. Eine mit der Standzeit zunehmende Dichtwirkung kann angesichts der



im Hauptanhydrit fehlenden Konvergenz nicht realisiert werden. Die hieraus resultierenden Konsequenzen für die langfristige Gebrauchstauglichkeit sind durch die konzeptionellen Planungen des AS berücksichtigt (dauerhaft wirksamer Kristallisationsdruck).

Bezüglich der für geotechnische Barrieren geforderten Nachweise zur bautechnischen Machbarkeit und zur Funktionalität durch in situ Demonstrationsversuche bleibt darauf hinzuweisen, dass der AS diesen Fragestellungen z.Zt. im Rahmen eines umfangreichen Versuchsprogrammes im Bergwerk Bleicherode nachgeht. Eine Bewertung der Untersuchungen zu den insitu Versuchen in Bleicherode erfolgt im Rahmen des vorliegenden Prüfberichtes nicht.

Ungeachtet der insgesamt als positiv und den besonderen Anforderungen entsprechend eingeschätzten Ausführungen zum Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit sind auch und insbesondere unter Berücksichtigung des Planungsstandes die in U10 dokumentierten Ausführungen nach Einschätzung der Prüfer noch nicht ausreichend für einen abschließenden Nachweis der Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und der bautechnischen Realisierbarkeit. Die diesbezüglich im Rahmen der Plausibilitäts- und Konsistenzprüfung erarbeiteten Fragestellungen werden in den nachstehenden Abschnitten in Form von Hinweisen, Empfehlungen und Forderungen zusammengestellt und erläutert.

### **7.2.2 Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweis**

Die in U10, Kap. 5.1 dokumentierten Ausführungen zur geologischen Standortbeschreibung sind in Übereinstimmung mit den Primärunterlagen zur Geologie (U18-U20) und im Wesentlichen angemessen in den Planungen berücksichtigt. Auf die vielfach carnallitische Ausprägung der verheilten Klüfte und deren mögliche Auswirkung auf die Gebrauchstauglichkeit bzw. Dichtheit des Abdichtungsbauwerkes wird nach Einschätzung der Prüfer jedoch nicht ausreichend eingegangen.

#### **Forderung F22:**

Die Wechselwirkungen zwischen den in das Abdichtungsbauwerk eintretenden Lösungen und den carnallitischen Kluftfüllungen ist insbesondere hinsichtlich der Fragestellung einer evtl. langfristig möglichen geochemisch induzierten Umströmung des Bauwerkes in Folge von An- und Umlösungsprozessen zu analysieren.

Die in U10 Kap. 5.1 dokumentierten Ausführungen zur geologischen Standortbeschreibung beinhalten keine Hinweise zu den im nördlichen Stoss geteuften Bohrungen zur Prüfkörpergewinnung, den 4 Schrägbohrungen in der Firste und zum vermauerten Rolloch R (17YEQ01\_RL002). Angesichts ihrer Bedeutung für die Aussagen zur Dichtheit des Bauwerks sind nach Einschätzung der Prüfer entsprechende Informationen zu ergänzen. Vorstehende Aussage gilt insbesondere für die Firstbohrungen, die gemäß U19 bis zu 85 m weit in das Gebirge und damit bis in das hangende Anhydritmittelsalz oberhalb des Hauptanhydrits gestoßen wurden. Ungeachtet der Tatsache, dass mit den Unterlagen U13 – U16 die Planungen zur Verfüllung von Bohrungen im Grundsatz dokumentiert sind, fehlen nach Einschätzung der Prüfer in U10 zumindest Hinweise zur Existenz und Bedeutung der im Bereich des Abdichtungsbauwerkes aufgeschlossenen Bohrungen.

#### **Empfehlung E8:**

Die im Bereich des Abdichtungsbauwerkes aufgeschlossenen Bohrungen sollten angesichts ihrer Bedeutung für die Dichtheit des Bauwerks in die Ausführungen zur Standortcharakterisierung integriert werden.

Die in U10 dokumentierte chemische Stabilität der 3:1:8 - Phase der MgO-Baustoffe gegenüber angreifenden  $MgCl_2$ -haltigen Salzlösungen ist eine Voraussetzung für den Nachweis der langfristigen Gebrauchstauglichkeit. Ob bzw. inwieweit die Umwandlung der 5:1:8 - Phase in die chemisch bzw. geochemisch stabile 3:1:8-Phase mit einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Baustoffs verbunden ist, wird in U10 nicht dokumentiert. Nach Einschätzung der Prüfer fehlt ein belegter Hinweis dahingehend, ob und inwieweit die Festigkeits- und Verformungseigenschaften und insbesondere der Kristallisationsdruck bei Umwandlung der 5:1:8 - Phase in die 3:1:8-Phase erhalten bleiben.

#### **Forderung F23:**

Es ist nachzuweisen, ob und inwieweit die Festigkeits- und Verformungseigenschaften und insbesondere der Kristallisationsdruck bei Umwandlung der 5:1:8 - Phase in die 3:1:8-Phase erhalten bleiben.

Die in U10 dokumentierten Untersuchungen zur Analyse der chemischen Beständigkeit des MgO-Betons berücksichtigen ausschließlich saline Lösungen, die aus der Auflösung der anstehenden Salze resultieren. In den Grubenbauen befinden sich jedoch insbesondere durch die Verfüllung weitere Stoffe, die in Lösung gehen können (z. B.  $\text{Ca}^{++}$ -haltige Flüssigkeiten, evtl.  $\text{CaCl}_2$ ) und die sich nachteilig auf die Materialeigenschaften des MgO-Betons auswirken können.

#### **Forderung F24:**

Die Analyse der chemischen Beständigkeit des MgO-Betons ist bezüglich der Möglichkeit und ggf. der Konsequenzen Ca-haltiger oder sonstiger durch das Verfüllmaterial bedingter Lösungszusammensetzungen zu ergänzen.

Entsprechend den Ausführungen in U10 sind die mechanischen Eigenschaften und die Phasenbildung des MgO-Betons signifikant abhängig von den Varietäten der Ausgangsstoffe des MgO-Betons. In der Konsequenz sind die Abhängigkeiten zwischen der Varietät der Ausgangsstoffe und den resultierenden chemischen, mechanischen, hydraulischen und thermischen Materialeigenschaften hinsichtlich ihrer möglichen Bandbreite zu dokumentieren oder definierte und dann einzuhaltende Ausgangsstoffe und Rezepturen festzulegen. Abhängig von der gewählten Vorgehensweise sind entsprechende Kontrollen in das Qualitätssicherungssystem einzuarbeiten.

#### **Empfehlung E9:**

Die Abhängigkeiten zwischen der Varietät der Ausgangsstoffe des MgO-Betons und den resultierenden chemischen, mechanischen, hydraulischen und thermischen Materialeigenschaften sind hinsichtlich ihrer möglichen Bandbreite zu dokumentieren oder es sind definierte, unveränderliche Ausgangsstoffe und Rezepturen festzulegen.

Entscheidend für die Funktionalität der Hauptdichtelemente ist der im Rahmen des Abbindeprozesses im eingespannten MgO-Dammelement resultierende Kristallisationsdruck. Der Nachweis der zuverlässigen Bildung von Kristallisationsdrücken  $p_k \geq 2 \text{ MPa}$  ist durch die bisher vom AS vorgelegten Untersuchungen noch nicht ausreichend experimentell nachgewiesen worden. Vorstehende Aussage gilt entsprechend F23 auch bezüglich der langfristigen Aufrechterhaltung des Kristallisationsdruckes. Angesichts der signifikanten Bedeutung des

Kristallisationsdruckes für die Funktionalität des Gesamtbauwerkes sind nach Einschätzung der Prüfer in situ-Kontrollmessungen (z.B. Fugendruckmessungen in mindestens einem Querschnitt pro Hauptelement) durchzuführen. Entsprechende Festlegungen sind in die Qualitätssicherungsmaßnahmen aufzunehmen

**Forderung F25:**

In situ-Kontrolle des realisierten Kristallisationsdruckes.

Eine zum Kristallisationsdruck analog signifikante Bedeutung für die Funktionalität des Abdichtungsbauwerkes hat die Injektion der Kontaktfuge im Bereich der Vordämme. Das Qualitätssicherungsprogramm sollte vor diesem Hintergrund ergänzt werden durch eine Funktionalitätsprüfung der Wirksamkeit der Injektion. Notwendigkeit und technischer Umfang der In situ Kontrollen am Standort im ERAM sind gegebenenfalls im Ergebnis der aktuell begonnenen Technikums- und In situ Versuche in Bleicherode zu überprüfen oder zu präzisieren.

**Forderung F26:**

In situ-Kontrolle der Wirksamkeit der Injektion im Bereich der Vordämme.

Die Langzeitstabilität der Vordämme gegenüber NaCl-Lösung wird in U10 unter Verweis auf vorliegende Kenntnisse und Erfahrungen für den planmäßig verwendeten Konstruktionsmörtel CEM III/B vorausgesetzt.

**Hinweis H4:**

In U10 fehlen gegenständliche Belege für die chemische Langzeitstabilität des Konstruktionsmörtels unter NaCl-Lösungseinfluss.

Der rechnerische Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist gemäß Aussage in U10 erbracht, wenn die im Kontaktbereich ermittelten Beanspruchungen kleiner sind als die ermittelten Scher- und Zugfestigkeiten. Vorstehende Einschätzung des AS begründet sich auf der Vorstellung, dass die Einbaupermeabilität erhalten bleibt, wenn die rechnerisch resultierenden Beanspruchungen nicht zu einer Schädigung des Verbundsystems Abdichtungsbauwerk führen. Nach Einschätzung der Prüfer hierbei unberücksichtigt ist, dass auch eine Beanspruchung unterhalb der Scher- und Zugfestigkeiten, jedoch oberhalb der Dilatanzfestigkeiten zu einer

Schädigung und damit zu einer erhöhten Sekundärpermeabilität führen kann. In der Konsequenz ist auf laborativer Grundlage dann nachweislich zu belegen, dass die rechnerisch ermittelten Beanspruchungen kleiner sind als die Dilatanzscher- und Dilatanzzugfestigkeit des MgO-Betons bzw. des Materialverbundes MgO-Beton-Anhydritgebirge.

**Forderung F26:**

Laborativer Beleg der Dilatanzfestigkeit des MgO-Betons und der Dilatanzzugfestigkeit des Materialverbundes MgO-Beton-Anhydritgebirge.

Die in U10 dokumentierten mechanisch-hydraulisch gekoppelten Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit des Abdichtungsbauwerkes berücksichtigen ausschließlich die aus dem Porendruck resultierende mechanische Wirkung der infiltrierten Lösung. Eine zweiseitige Kopplung mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Porosität und Permeabilität erfolgt im Rahmen der numerischen Berechnungen nicht. Auch kann der Unterlage U10 nicht entnommen werden, in welcher Größe der für die rechnerische Ermittlung der effektiven Beanspruchung bedeutsame Biotsche Koeffizient angesetzt wurde.

**Hinweis H5:**

Die in U10 dokumentierten rechnerischen Nachweise besitzen nur insoweit Gültigkeit, als keine Wechselwirkungen zwischen den mechanischen und hydraulischen Zustandsfeldern berücksichtigt werden müssen.

Der Nachweis der gemäß dem radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis erforderlichen integralen Permeabilität des Abdichtungsbauwerkes beschränkt sich in U10 auf analytische Einschätzungen unter der Annahme jeweils konstanter Permeabilitäten für den MgO-Beton, die Kontaktfuge, die ALZ und das Anhydritgebirge. Eine Verifikation bzw. eine vergleichende Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Ergebnisse zur zeitabhängigen Aufsättigung des Abdichtungsbauwerkes und zur integralen Durchlässigkeit mit den analytischen Einschätzungen wird nicht mitgeteilt.

**Forderung F27:**

Für eine hinreichende Verifizierung der Aussagen zur Gebrauchstauglichkeit des Abdichtungsbauwerkes sind die analytisch und die numerisch ermittelten Ergebnisse zur

Aufsättigung und Durchströmung des geplanten Dammbauwerkes einander gegenüber zustellen.

**Forderung F28:**

Es ist zu begründen, warum auf eine diversitäre Auslegung der Hauptdichtelemente verzichtet wird.

**7.2.3 Technische Realisierbarkeit**

Die Ausführungen zur technischen Realisierbarkeit werden als im Grundsatz dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend eingeschätzt. Die rechnerischen Einschätzungen zum Einfluss der Permeabilität der ALZ und der Permeabilität der Kontaktzone auf die gemittelte integrale Permeabilität des Abdichtungsbauwerkes auf analytischer Grundlage haben gemäß Ausführung in U10 gezeigt, dass abhängig von den Permeabilitätseigenschaften der ALZ die Anforderungen an die integrale Permeabilität des Abdichtbauwerkes erreicht werden können, ohne die Kontaktfuge zwischen MgO-Beton und Anhydritgebirge injizieren zu müssen. In der Konsequenz kann gemäß Ausführung in U10 der Einbau des MgO-Betonkörpers von der 2. Sohle mit der daraus resultierenden hydrostatischen Vorspannung realisiert werden. Die Notwendigkeit einer Injektion reduziert sich damit auf die Vordämme aus konstruktivem Beton. Die Injektion der Vordämme soll gemäß Aussage in U10 entweder mit Epoxidharz oder Acrylat erfolgen. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Injektion zusammen mit der nach 28 Tagen für den Konstruktionsmörtel gemäß Datenblatt angesetzten Volumenzunahme von 0,2 bis 0,4 % dazu führt, dass die Kontaktfuge dicht ist, d.h. die Durchlässigkeit der Vordichtung ausschließlich durch die Dichtheit des Beton-Baukörpers gewährleistet wird. Die östliche Vordichtung erfüllt unter dieser Voraussetzung die Anforderungen einer temporären Abdichtung entsprechend dem Verfüllkonzept. Die vorausgesetzte Vorspannung von 0,5 MPa, die gemäß Aussage in U10 aus der Volumenzunahme des Konstruktionsmörtels beim Abbinden und einer injektionsbedingten „Vorspannung“ resultiert, wird nicht belegt.

**Hinweis H6:**

Es fehlt ein Beleg für die injektionsbedingte Vorspannung der Vordämme.

## 8. Abdichtung des südlichen Wetterrolllochs

### 8.1 Aussagen des Antragstellers

Ausführungen zur Abdichtung des südlichen Wetterrolllochs sind dokumentiert in Abschnitt 7 der Unterlage /U4/: P255 - Mauke, R.; Laske, D. (2007): *Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllen von Strecken mit hoher Anforderung – Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweiskonzept für das südliche Wetterrollloch* und in der Unterlage /U7/: P263 - Heimer, St.; Mohlfeld, M.; Scholzen, A. (2007): *Konzeptplanung und Nachweisführung für das Abdichten des südlichen Wetterrolllochs*. Gemäß den Ausführungen in P255 ist im Rahmen der hydraulischen Trennung von Zentralteil und Westsüdfeld neben den horizontalen Streckenverschlüssen ein vertikales Abdichtungsbauwerk zu errichten, das die zwischen der ersten und vierten Sohle anstehenden Wetterrolllöcher 12YER51\_RL003 und 09YEA52\_RL003 für einen Zeitraum von 20000 Jahren abdichtet, Bild 8.1.

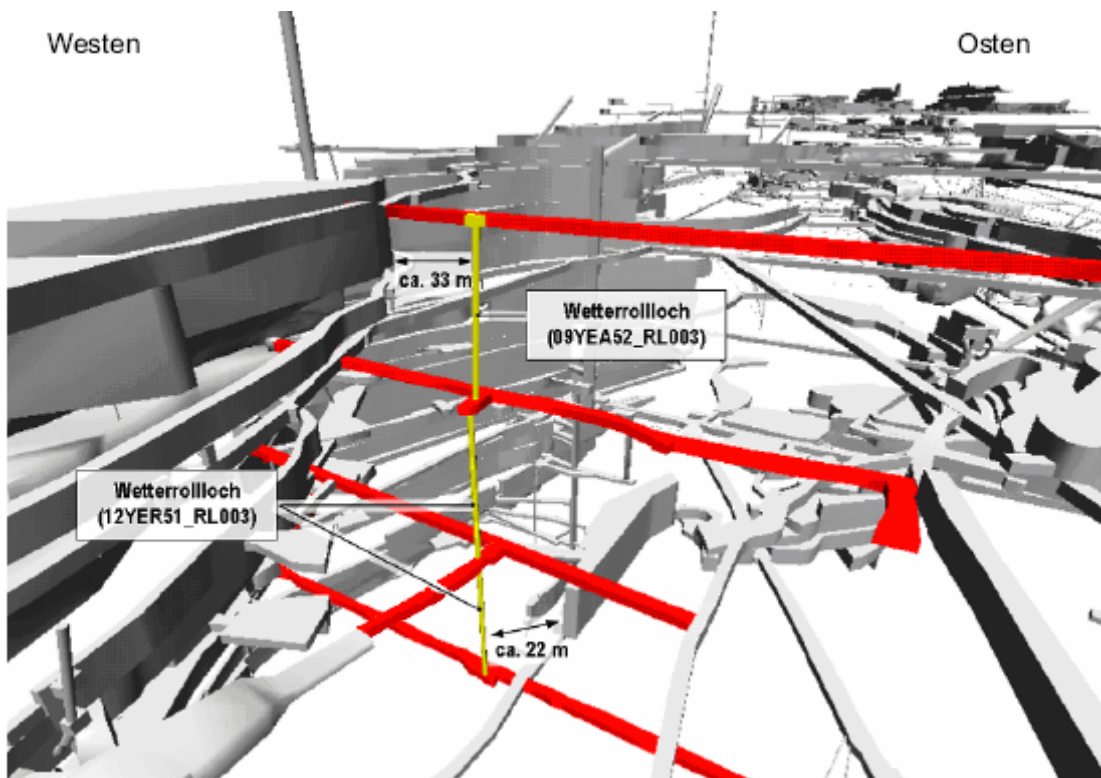


Bild 8.1: Lage des südlichen Wetterrolllochs im Grubengebäude ERA Morsleben /U4/

Der Aufbau des gemäß Bild 8.2 aus insgesamt drei Abdichtungssegmenten aufgebauten Bauwerks erfolgt innerhalb der einzelnen Segmente jeweils viergliedrig aus:

- (1) einem unteren Widerlager aus Hartgesteinsschotter zur Gewährleistung der Lagestabilität der sich nach oben anschließenden Filterlage,
- (2) einer Filterlage aus abgestuften Kiesen und Sanden, um ein Auslaufen des Bitumens aus dem darüber liegenden Dichtelement zu verhindern,
- (3) einem Dichtelement aus Schotter-Bitumen, bei dem der Schotter die tragende und das Bitumen die dichtende Aufgabe übernimmt und
- (4) einem oberen Widerlager aus Hartgesteinsschotter, der im Unterschied zum unteren Widerlager mit einer Sole-Zement-Flugaschen-Suspension vergossen wird. Das obere Widerlager dient der Lastabtragung bei Lösungszutritt von unten bzw. von oben und verhindert einen Aufstieg des Bitumens aus dem unterhalb angeordneten Dichtelement.

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgt gemäß Aussage in P255 getrennt für die einzelnen Abdichtungssegmente. Gefordert wird, dass *das Dichtelement im Vergleich zum Salzbeton eine deutlich geringere Permeabilität aufweisen muss*. Unter Bezug auf die Ausführungen zu den Schachtverschlussystemen in /U23/: *Rauche, H. et al. (2003): Nachweisführungen zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben* wird bezüglich der Permeabilität der Abdichtungssegmente ausgeführt:

*Das Bitumen kann als technisch dicht bezeichnet werden, sodass seine Permeabilität nach ordnungsgemäßem Einbau praktisch Null ist. Die Auflockerungszone des verfüllten Rollochs wird mit  $d = 0,40\text{m}$  angenommen. Gemäß /U23/ wird am Stoß bzw. am Rand der sich neu bildenden Auflockerungszone eine Permeabilität von  $k = 5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  zugrunde gelegt. Für das intakte Gebirge wird eine Permeabilität von  $k = 1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$  angenommen. Mit diesen Daten wird für die  $0,40\text{m}$  mächtige Auflockerungszone eine mittlere Permeabilität von  $4,28 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  berechnet. Bezüglich der Nachweise zur Standsicherheit und Setzungsstabilität wird unter Verweis auf die Unterlage P263 (siehe unten) ausgeführt: *Als wesentliches Ergebnis für den Standsicherheitsnachweis bleibt festzuhalten, dass der Lastabtrag in der Verfüllsäule zu jedem Zeitpunkt und für alle möglicherweise auftretenden Lastfälle gewährleistet ist.**



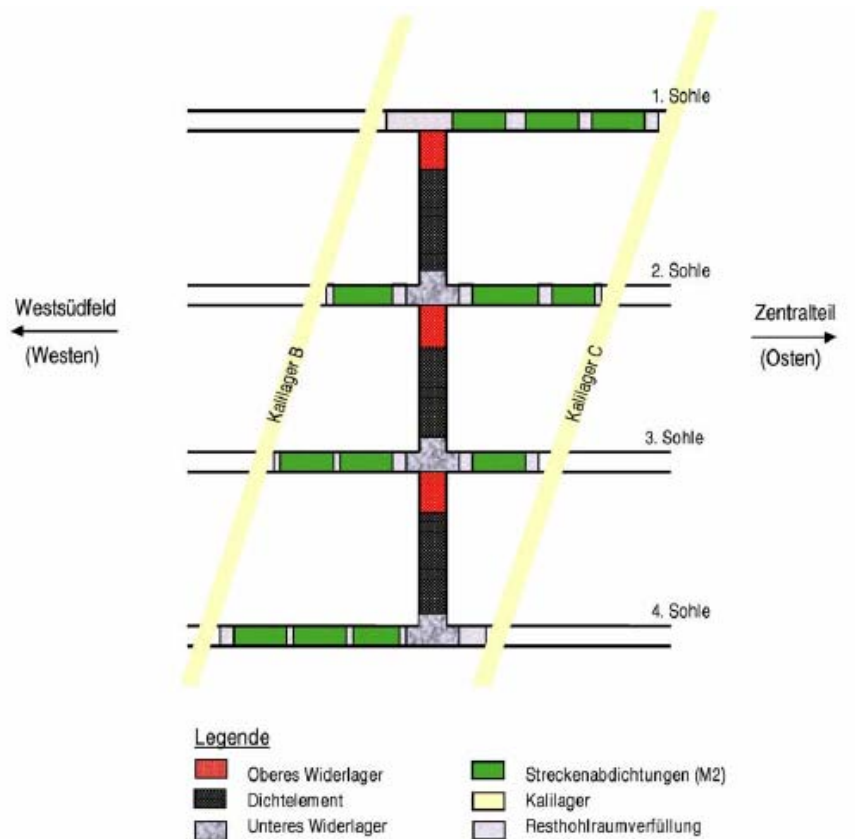


Bild 8.2: Prinzipskizze der geometrischen und geologischen Verhältnisse im Bereich des südlichen Wetterrolllochs /U4/

Über die bereits in /U4/ bzw. P255 dokumentierten Ausführungen zur Abdichtung des südlichen Wetterrolllochs hinaus dokumentiert /U7/ bzw. P263 die im Rahmen der Nachweisführung für das südliche Wetterrollloch durchgeführten rechnerischen Untersuchungen. Danach wurden als Einwirkungen die Lastfälle trockene Grube, einseitiger Lösungsdruck von unten, Lösungsdruck von unten und oben und einseitiger Lösungsdruck von oben analysiert. Die simulierte Betriebsgeschichte ist charakterisiert durch

- 1) isotroper Primärspannungszustand,
- 2) linear-elastisch modellierter Ausbruch der Wetterrolllöcher,
- 3) offene Standzeit bis  $t = 100a$  (viskos, BGRa),
- 4) linear elastisch modellierter Ausbruch Auflockerungszone + Aktivierung Verschlussystem,
- 5) Flutung Grubengebäude über 2800a,
- 6) Aufkriechen des Gebirges bis  $t = 20000a$ .

Die numerischen Berechnungen erfolgten mit dem Programm ANSYS für ein rotationssymmetrisches Berechnungsmodell. Die verwendeten Materialeigenschaften sind in der nachfolgenden Tab. 8.1 zusammengestellt.

Material	E-Modul MPa	Poissonzahl -	Dichte kg/m <sup>3</sup>	Spannungsexponent -	Vorfaktor 1/d
z2HS	25000	0,27	2200	5	1/167,1·10 <sup>-11</sup>
Schotter	200	0,32	1700		
Schotter+Bitumen	200	0,32	2114		
Schotter+Zement	200	0,32	2712		
Sand+Kies	100	0,30	2000		

Tab. 8.1: Materialkennwerte Modell südliches Wetterrollloch

Bezüglich der Kontaktbedingungen zwischen Abdichtungsbauwerk und Salzgebirge wird ausgeführt: *Schotter, Kiese und Sande sind typische kohäsionslose Materialien, sodass  $c=0$  zu wählen ist. Numerische Gründe hinsichtlich des Konvergenzverhaltens des Lösungsalgorithmus verlangen jedoch eine kleine Kohäsion, um während der iterativen Berechnung geringe ausgewiesene Zugspannungen akzeptieren zu können. Daher wird im Berechnungsprogramm zunächst  $c = 25 \text{ kPa}$  verwendet und beim post-processing verifiziert, dass die Ergebnisse zu allen (Zwischen-) Zeitpunkten keine Zugspannungen ausweisen.* Als Reibungswinkel für die im Berechnungsmodell als schubfest angesetzte Kontaktfuge zwischen Abdichtung und Salzgebirge werden in P263 verwendet:

Schotter	$\phi = 40^\circ$
Schotter+Bitumen	$\phi = 35^\circ$
Schotter+Zementstein	$\phi = 40^\circ$
Sand+Kies	$\phi = 25^\circ$
Fuge	$\phi = 31^\circ$

Die Dichtfunktion der Verschlusskonstruktion gilt gemäß Aussage in P263 dann als erfüllt, wenn die *Lagestabilität* nachgewiesen ist und *sich die Durchlässigkeit der parallel zum Dichtelement geschalteten potentiellen Wegsamkeit „Auflockerungszone“ im Vergleich zum Anfangszustand unmittelbar nach dem Einbau nicht erhöht.* Als Kriterien für den Nachweis der Lagestabilität werden genannt:

(1) Setzungsnachweis:

*Die Setzungen am oberen Rand des oberen Widerlagers müssen beschränkt bleiben. Zur Abschätzung der zulässigen Setzungen wird in P263 eingeschätzt, dass lokale Porositäts erhöhungen infolge Setzungen von weniger als einem Prozent der Anfangsporosität unerheblich sind, da sie sich im Rahmen der Ungenauigkeit beim Einbau bewegen. Eine Porositätsänderung von einem Prozent führt bei Ansatz einer Ausgangsporosität der Schottersäule von 41,4% und Ansatz eines konstanten Rollochquerschnittes gemäß Überschlagsberechnung in P263 zu einer Setzung von 0,1m.*

(2) Zulässige Schubspannung in der Fuge

*Die zulässige Schubspannung in der Fuge zwischen Verfüllsäule und anstehendem Gebirge darf nicht überschritten werden. Die jeweils zulässige Schubspannung wird gemäß der Mohr-Coulombschen Bruchhypothese aus der wirkenden Normalspannung und dem Reibungswinkel in der Kontaktfuge berechnet und den numerisch ermittelten Schubspannungen gegenübergestellt.*

(3) Zugspannungsnachweis

*In der Verfüllsäule dürfen keine Zugspannungen auftreten.*

(4) Nachweis gegen Auslaufen des Schotters

*Die Setzungsstabilität der Füllsäule ist nur dann gewährleistet, wenn ihr Auslaufen in die sich unten anschließenden Strecken ausgeschlossen ist. Diese Randbedingung wird bautechnisch durch die geplante Resthohlraumverfüllung erreicht, die offene Volumina im Bereich der Streckenabdichtungen ausschließt.*

(5) Dilatanz des Saumbereichs

*Über die Länge des Dichtelementes soll das Dilatanzkriterium nach Hunsche im anstehenden Salzgebirge über den gesamten Betrachtungszeitraum erfüllt sein.*

Aufbauend auf dem Nachweis der *Lagestabilität* der Verfüllsäule durch eine vergleichende Gegenüberstellung der numerischen Berechnungsergebnisse mit den vorstehend skizzierten Kriterien erfolgt in P263 ein vereinfachter Gebrauchstauglichkeitsnachweis auf der Basis des *Darcy'schen* Strömungsmodells. Dabei werden konstante Permeabilitäten für Abdichtungsbauwerk und Auflockerungszone sowie eine konstante Mächtigkeit der Auflockerungszone angesetzt und eine mittlere Permeabilität von  $k_m = 4,28 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$  berechnet. Gemäß Aussage in P263 *ist der Gebrauchstauglichkeitsnachweis damit geführt.*

Den Abschluss der Unterlage bilden allgemeine Angaben zur geplanten Bauausführung und zur Qualitätssicherung.

## **8.2 Bewertung Abdichtung südliches Wetterrolloch**

Im Ergebnis der vorstehend skizzierten Inhalte der Unterlagen P255 und P263 bleibt zunächst festzuhalten, dass der AS im Grundsatz zwar ein in sich geschlossenes Nachweiskonzept dokumentiert, die im Rahmen des Nachweiskonzeptes verwendeten Teilnachweise jedoch in einigen wesentlichen Detailfragen auf Annahmen beruhen, die nicht belegt werden und/oder auf der Basis verbal-argumentativer Betrachtungen geführt werden. Hierzu gehören insbesondere die Ausführungen zur Ausbildung dilatanter Gebirgsbereiche im Saumbereich der Abdichtungsbauwerke, Annahmen zur Schubfestigkeit des Materialverbundes Salzbeton-Gebirge, rechnerische Idealisierungen zum Verbundtragverhalten elastisch-viskoser Salzbeton – elastisch-viskoses Salzgebirge, rechnerische Idealisierungen zur Ausbildung thermisch induzierter Spannungen im Verbundsystem Abdichtungsbauwerk-Gebirge unter dem Einfluss eines hydratationsbedingten Wärmeeintrags sowie die entkoppelte Berücksichtigung mechanischer und hydraulischer Belastungen.

### **Forderung F29:**

Die rechnerischen Nachweise zur Standsicherheit und Funktionstüchtigkeit der Abdichtungselemente sind unter Berücksichtigung der anstehenden Materialeigenschaften von Gebirge und Abdichtungsmaterial unter Berücksichtigung der thermisch-mechanisch-hydraulisch gekoppelten Prozesse zu führen.

Auch bleibt auf der Grundlage der ersten Durchsicht von P255 festzuhalten, dass Teile der den Nachweisführungen zugrunde liegenden experimentellen Untersuchungen lediglich in Form tabellarischer Zusammenstellungen ohne Dokumentation von Versuchstechnik und Versuchsauswertung beschrieben werden bzw. die den Nachweisführungen zugrunde liegenden Materialeigenschaften auf der Grundlage von Literaturstudien eingeschätzt wurden.

### **Empfehlung E10:**

Die den Nachweisführungen zugrunde liegenden Materialeigenschaften sind zu belegen.

Ob das vom AS in P255 und P263 vorgestellte Nachweiskonzept geeignet im Sinne der zu führenden Nachweise ist bzw. ob und gegebenenfalls welche Teilnachweise ergänzt, modifiziert oder geändert werden müssen, kann durch die Prüfer erst nach Durchführung eigener Berechnungen beurteilt werden. Vorstehende Aussage gilt im Grundsatz auch für eine abschließende Beurteilung der Machbarkeit des vorgestellten Nachweiskonzeptes aus geomechanisch-geohydraulischer Sicht. Unter Verweis auf die Untersuchungen der Prüfer zu den Schachtverschlussystemen Marie und Bartensleben wird erwartet, dass der Nachweis gelingt, wenn die vom AS eingeschätzten Materialeigenschaften der Abdichtungsmaterialien und die Verbundeigenschaften zwischen Salzgebirge und Abdichtungsmaterial belegt werden können.

## **9 Abdichtungen von Bohrungen**

### **9.1 Aussagen des Antragstellers**

Ausführungen zur Abdichtung von Bohrungen sind dokumentiert in den Unterlagen /U13/ bzw. P145: *ERA Morsleben – Kriterien für das Verfüllen von Bohrungen*, /U14/ bzw. G148: *ERA Morsleben – Systembeschreibung und QS-Konzept – Bohrlochverfüllung mit Magnesiabinder* und /U15/ bzw. P174: *Verfüllen untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder*.

Ziel der Ausführungen in P145 ist die *Festlegung von Kriterien zur Bestimmung von Bohrungen, die auf der Grundlage des Stilllegungskonzeptes mit einem gering permeablen und abdichtenden Material zu verfüllen sind*. Hierzu gehören alle Bohrungen, die zu *Wegsamkeiten im Bereich von Abdichtungen und zur Schwächung der äußeren Barriere in den Einlageungsbereichen führen können*. Von den insgesamt 449 im ERA Morsleben bekannten Bohrungen (Katalogisierung im Hohlrauminformationssystem – HIS) sind gemäß Aussage in P145 16 im Bereich von geplanten Abdichtungsbauwerken lokalisierte Bohrungen hydraulisch wirksam zu verfüllen. Die danach zu verfüllenden 16 Bohrungen sind in P145 tabellarisch zusammengestellt. In der Anlage zu P145 sind die Datenblätter des Bohrkatasters der 16 Bohrungen beigelegt.

P174 dokumentiert Laboruntersuchungen zur Entwicklung und Auswahl eines für die Verfüllung von Bohrungen geeigneten Magnesiabinders. Aufbauend auf der Definition grundsätzlicher Anforderungen an den Verfüllmörtel wie

- \* kraftschlüssige Anbindung an das anstehende Gestein,
- \* Vermeidung von Umlösevorgängen an der Bohrlochwandung,
- \* Vermeidung von Überschussfluiden,
- \* Vermeidung hydraulisch wirksamer Auflockerungen in Folge Hydratationswärme z.B. durch Dehnung und Schrumpfung sowie
- \* geeignete Fließeigenschaften zur Verfüllung unterschiedlich geneigter Bohrungen von 40 mm – 120 mm Durchmesser und bis zu  $l = 350$  m Länge

werden mechanische, hydraulische, thermische und chemische Anforderungen formuliert und vier verschiedene Rezepturen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Im Ergebnis der Untersuchungen wird eine als 12.1 bezeichnete Rezeptur als besonders geeignet eingeschätzt. Für die Zusammensetzung der Rezeptur 12.1 nennt /U15/ nachstehende Massenanteile:

- 10% MgO F 4-200
- 55% Anhydritmehl
- 30% Siedesalz
- 5% Schiefermehl
- 338g Q-Lösung auf 1 kg Feststoffgemisch.

Als technologische Eigenschaften des Verfüllmörtels werden genannt (Klammerwerte = Anforderung):

- Einaxiale Druckfestigkeit nach DIN 18555 Teil 3: 21 MPa (>15 MPa / z.Z. keine Obergrenze)
- E-Modul nach DIN 18555 Teil 4: 8800 MPa (5000MPa – 25000 MPa)
- Einaxiale zentrische Zugfestigkeit nach DIN 18555 Teil 6: 1,89 MPa (> 1 MPa)
- Kriechverformungsbereich Auflast 4,5 MPa: 2,0% (möglichst wie Steinsalz)
- Kriechverformungsbereich Auflast 11 MPa: 2,0 – 4,5% (möglichst wie Steinsalz)
- Fließmaß nach DIN 1048/1:  $\geq 550$ mm / > 60cm: schätzungsweise 75-79cm (Pumpfähigkeit über längere Strecken und sehr gute Fließeigenschaften)
- $k_f$ -Wert nach DIN 18130 E Teil 1:  $3,01 \cdot 10^{-11}$  m/s ( $10^{-8} - 10^{-12}$  m/s)
- Wärmeentwicklung beim Abbinden: max. Abbinde temperatur  $37^\circ\text{C}$  nach 16h
- Wärmedehnungskoeffizient: 0,026mm/mK (-)

- Wärmeleitfähigkeit nach DIN 52613: 1,37 W/mK (-)
- Wärmekapazität: 801 Ws/kg K (-)
- Porosität nach DIN 18126: 19,2% (-)

Unter Bezug auf U13 bzw. P145 und U15 bzw. P174 beschreibt U14 bzw. G148 zunächst wiederholend die Anforderungen an den Baustoff und dokumentiert seine Zusammensetzung entsprechend /U15/. Auffällig hierbei ist, dass in /U14/ eine Permeabilität von  $k_f < 10^{-10}$  m/s gefordert wird, während in /U15/ Zahlenwerte von  $k_f = 10^{-8} - 10^{-12}$  m/s genannt werden. Auch bleibt darauf hinzuweisen, dass die zu verfüllenden Bohrlochdurchmesser gemäß Aussage in /U14/ 46mm bis 183mm betragen, während in U15 Durchmesser von 40 mm bis 120 mm genannt werden.

Die Abschnitte 6 und 7 der Unterlage U14 beinhalten grundsätzliche Ausführungen zum geplanten Verfüllbetrieb (Verfahrensablauf, infrastrukturelle Maßnahmen, Misch- und Pumpanlage, Arbeits-, Brand- und Strahlenschutz). Abschnitt 8 dokumentiert schließlich das geplante Qualitätssicherungskonzept zur Gewährleistung der Auslegungsanforderungen und Betriebssicherheit. Analog zur Qualitätssicherung der Damm- und Verfüllbaustoffe M2 und M3 ist danach beabsichtigt, die Einhaltung der Auslegungsanforderungen primär durch eine Kontrolle der Baustoffkomponenten und ihrer Dosierung zu gewährleisten. Zur Begründung wird ausgeführt: *Korrekturen am eingebrachten Verfüllbaustoff sowie ein Wiederausbau des erhärteten Baustoffs sind nur mit unvertretbar hohem Aufwand möglich und werden daher ausgeschlossen.*

## 9.2 Bewertung Abdichtung von Bohrungen

Die im Plan zur Stilllegung U16 in Kap. 2.4 „Sicherheitstechnische Auslegungsanforderungen“ dokumentierten Aussagen zur Verfüllung von Bohrungen sind im Grundsatz durch die Unterlagen U13, U14 und U15 belegt. Bezüglich der Konsistenz der Aussagen ist jedoch darauf hinzuweisen, dass gemäß S. 78 des Plans *das Verfüllmaterial für die Bohrungen eine Anfangspermeabilität von maximal  $10^{-17} m^2$  ausweisen muss*, während in U15 Werte von  $k_f = 10^{-8} - 10^{-12}$  m/s ( $\rightarrow = 10^{-15} - 10^{-19} m^2$ ) genannt werden.

**Hinweis H7:**

Gemäß S. 78 des Plans zur Stilllegung U16 muss *das Verfüllmaterial für die Bohrungen eine Anfangspermeabilität von maximal  $10^{-17} \text{ m}^2$*  ausweisen, während in U15 Werte von  $k_f = 10^{-8} - 10^{-12} \text{ m/s}$  ( $\rightarrow = 10^{-15} - 10^{-19} \text{ m}^2$ ) genannt werden.

Auch wird eingeschätzt, dass durch die Unterlagen U13, U14 und U15 ein Nachweis bzgl. der Funktionstüchtigkeit und Leistungsfähigkeit der verfüllten Bohrungen nicht erbracht wird. Zu fordern ist nach Einschätzung der Prüfer, dass im Rahmen geeigneter in situ Versuche die hydraulische Leistungsfähigkeit der Verfüllbohrungen belegt wird und über die qualitätsgesicherte Prüfung der Baustoffkomponenten, der Dosierung und des Verfüllbetriebes hinaus die mechanischen, physikalischen, thermischen und chemischen Kennwerte des in situ eingebrachten Verfüllmaterials durch entsprechende Versuche belegt und dokumentiert werden.

**Forderung F30:**

In situ Versuche als Beleg für die Leistungsfähigkeit der Verfüllbohrungen.

**Forderung F31:**

Beleg der Verfüllmaterialqualität durch begleitende laborative Untersuchungen.

Unter Bezug auf F30 darauf hinzuweisen ist, dass im Nachgang zum Fachgespräch vom 26.11.2008 durch den AS zugesagt worden ist, entsprechende Versuche durchzuführen.



## 10 Zusammenstellung der Bewertungen

(H – Hinweis, E – Empfehlung, F – Forderung)

Kategorie	Kapitel	Seite	Stichwort
H1	4.1	20	5 temporäre Abdichtungen
F1	4.2.1	23	Reduktion unnötiger Idealisierungen bei der rechnerischen Simulation temporärer Abdichtungen
F2	4.2.1	23	Dokumentation der anstehenden geologischen Verhältnisse
E1	4.2.1	23	Eindeutige Bezeichnung für den Baustoff verwenden
E2	4.2.1	23	Begründung, warum nicht konservativ mit IP21-Lösung gerechnet wurde
F3	4.2.2	24	Beleg für Übertragbarkeit der Injektionstechnologie auf ERAM-Verhältnisse
F4	4.2.2	24	Kontrolle Injektionserfolg
F5	4.2.2	25	Materialtechnologische Eigenschaften Injektionsmittel dokumentieren
F6	4.2.2	25	Einschätzung der Druckverluste zwischen Pumpe und Kontaktfuge
F7	5.2.2	46	Berücksichtigung der thermischen Beanspruchungen aus Hydratation
F8	5.2.2	48	Berücksichtigung der transienten und temperaturabhängigen Kriecheigenschaften
F9	5.2.2	48	Berücksichtigung mechanisch-hydraulisch gekoppelter Beanspruchungen
F10	5.2.2	48	Standortbezogene Nachweisführung für jedes Abdichtungsbauwerk
H2	5.2.2	50	Dokumentation Berechnungsmodell
F11	5.2.2	50	Dokumentation Zugkriechversuche

H3	5.2.2	51	Wärmeausdehnungskoeffizient in U4 und U2 nicht identisch
F12	5.2.3	52	Berücksichtigung weiterer Feinstbindemittel
E3	5.2.3	52	Nachvollziehbare Dokumentation der Rezepturenentwicklung für Feinstzementinjektionen
E4	5.2.3	53	Systematische Analyse der Abhängigkeit Salzgehalt – rheologische Suspensionseigenschaften
F13	5.2.3	53	Schlüssige Dokumentation der Injezierbarkeit von Kluftsystemen
E5	5.2.3	53	Baubegleitende Prüfung $d_{95}$ -Wert und Durchlässigkeit Kontaktfuge in QS aufnehmen
F14	5.2.3	54	Prüfkonzepte für In-situ-Versuche
F15	5.2.3	54	Technikums- und in situ – Versuch für 30 Verfüll- und Spüleleitungen in Hüllrohr
F16	5.2.3	54	Lösefähigkeit der Anmachflüssigkeit belegen
F17	6.2	59	Integration Funktionalitätsnachweis in Handhabungsversuch
F18	6.2	59	Rechnerischer Nachweis Dilatanz bei Nachriss Streckenkontur
F19	6.2	60	Geometrisch präzise Darstellung Bauwerksentwurf
E6	6.2	61	Notwendigkeit und Zielstellung ausgefräster Nuten für Verlegung Ringleitungen
F20	6.2	61	Technische Ausführungen für Realisierung Einbauten
E7	6.2	62	Aufwältigung Versuchsbauwerk nach Versuchsende
F21	6.2	62	Festlegungen für max. zulässige Unterbrechung Baustoffförderung und Verfahrensweise bei Überschreitung
F22	7.2.2	80	Analyse geochemisch induzierter Bauwerksumströmung durch Lösungen in carnallitischen Kluftfüllungen
E8	7.2.2	81	Integration von Bohrungen im Bereich der Abdichtungen in Standortcharakterisierung

F23	7.2.2	81	Einfluss Umwandlung 5:1:8 in 3:1:8-Phase auf Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie Kristallisationsdruck
F24	7.2.2	82	Chemische Beständigkeit MgO-Beton gegenüber Ca-haltiger Lösungen
E9	7.2.2	82	Abhängigkeit zwischen Varietät der Ausgangsstoffe MgO und THMC Materialeigenschaften MgO dokumentieren oder unveränderliche Rezepturen und Ausgangsstoffe festlegen
F25	7.2.2	83	In situ – Kontrolle Kristallisationsdruck
F26	7.2.2	83	In situ – Kontrolle Wirksamkeit Injektion
H4	7.2.2	83	Belege für geochemische Langzeitbeständigkeit Konstruktionsmörtel unter NaCl-Lösungseinfluss
F26	7.2.2	84	Laborativer Beleg Dilatanzfestigkeit MgO und Dilatanzzugfestigkeit MgO-Anhydritgebirge
H5	7.2.2	84	Rechnerische Nachweise in U10 nur gültig, wenn keine mechanischen und hydraulischen Wechselwirkungen berücksichtigt werden müssen
F27	7.2.2	84	Verifikation analytisch und numerisch berechneter Aufsättigung
F28	7.2.2	84	Begründung für Verzicht auf diversitäre Auslegung
H6	7.2.3	85	Beleg für injektionsbedingte Vorspannung der Vordämme
F29	8.2	91	Reduktion der Idealisierungen bei rechnerischer Simulation
E10	8.2	92	Beleg für Materialeigenschaften
H7	9.2	95	Unterschiedliche Anfangspermeabilität U16 / U15
F30	9.2	95	In situ – Versuch für Leistungsfähigkeit Verfüllbohrungen
F31	9.2	95	Laborative Untersuchungen zum Beleg der mechanisch-hydraulischen Qualität des Bohrlochmörtels

## 11 Liste der verwendeten Unterlagen und Literatur

### Verfahrensunterlagen des Prüfkomplexes 7

- U01 Laske, D. (2007): Planungsstudie für einen In-situ-Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton, BfS.
- U02 P192 – Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2, DBE, 17.11.2004.
- U03 P195 – Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen - Konzeptplanung und Nachweisführung, DBE, 28.06.2004.
- U04 P255 - Mauke, R.; Laske, D. (2007): Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllen von Strecken mit hoher Anforderung – Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweis-konzept für das südliche Wetterrollloch, BfS.
- U05 G256 - Mauke, R. (2007): Stilllegung Endlager Morsleben – Verfüllung von Strecken mit hoher Anforderung – Konzept- und Systembeschreibung, BfS, 14.03.2007.
- U06 P262 - Mohlfeld, M.; Stielow, B. (2007): Numerische Untersuchungen zur Übertragbarkeit der exemplarischen Nachweisführung der Streckenabdichtung von der 3. Sohle auf die 4. Sohle, Zerna Ingenieure, 30.05.2007.
- U07 P263 - Heimer, St.; Mohlfeld, M.; Scholzen, A.: Konzeptplanung und Nachweisführung für das Abdichten des südlichen Wetterrolllochs, Zerna Ingenieure, 14.02.2007.
- U08 I343 - MPA/ IBMB-TU Braunschweig: Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton von Streckenverfüllungen, MPA Braunschweig, 06.03.2007.
- U09 P264 - Pettenpohl, H.; Pier, J.: Endlager Morsleben – Die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären Abdichtungen, DMT, 31.01.2007.
- U10 P266 - Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton; K-UTEK, Stand 17.09.2008,
- U11 P298 - Injektion von Abdichtungssegmenten mit Feinstsuspensionen; IGH Ingenieurgesellschaft Grundbauinstitut, Hannover, 26.02.2009
- U12 G296 - Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtbauwerke im Steinsalz, DBE, Stand 26.02.2009
- U13 P145 – ERA Morsleben – Kriterien für das Verfüllen von Bohrungen, BfS, )M 2234021, 30.07.2002.

- U14 G148 – ERA Morsleben – Systembeschreibung und Qualitätssicherungskonzept – Bohrlochverfüllung mit Magnesiabinder, BfS, 9M 22343021, 19.07.2002.
- U15 P174 – Verfüllen untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder, BfS, 9M 66412031, 17.12.1999.

### **Verfahrensunterlagen anderer Prüfkomplexe**

- U16 A281 - Plan zur Stilllegung des ERAM, BfS, Stand 31.03.2009
- U17 A282 - Kurzbeschreibung der Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben, Stand 31.03.2009
- U18 Risswerk Morsleben, Stand 31.12.2008
- U19 I22 - Geologie des Ostfeldes, BGR, Juli 1996
- U20 I356 - Geologische Grubenkartierung; Ostfeld, Grubenfeld Bartensleben 1.-4. Sohle, DBE, 05.09.1995
- U21 I360 - Geologische Grubenkartierung; Nordfeld, Grubenfeld Bartensleben; 253 – 372 m NN Sohle, DBE, 27.02.1997
- U22 P44 - Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells  
BGR, Hannover, Dezember 1997
- /U23/ Rauche, H. et al. (2003): Nachweisführungen zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. – Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 11.11.2003, P-177), Projektnummer EGB 00-058), Erfurt.

### **Sonstige Literatur**

- L01 Adhoc-Stellungnahme Unterlage: „Planungsstudie für einen in-situ-Versuch zum Bau von Streckenabdichtungen aus Salzbeton“  
AG Morsleben, Stendal, 13.12.2007
- L02 Kurzstellungnahme zur Unterlage P266 „Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton“  
AG Morsleben, Stendal, 19.12.2008
- L03 Fortsetzung der Prüfung der Auslegungsreife der Unterlagen A280-282  
AG Morsleben, Stendal, 25.06.2009
- L04 KRAUKE, W.: Schlussbericht, FKZ 02C1214,; Verbundprojekt: Weiterentwicklung von Magnesiabindern von der Strömungsbarriere hin zu einem Verschlusselement im Salinar – Hauptprojekt; K-UTEC Sondershausen, 07.03.2008

- L05 SCHULZE, B et al.: Merkblatt für Einpressarbeiten mit Feinstbindemitteln in Lockergestein. Bautechnik 79, Teil 1 in Heft 8 und Teil 2 in Heft 9 2002.
- L06 Fachgespräch und Protokoll: „In-Situ-Versuch“, Magdeburg 25.04.2008
- L07 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 11.06.2008
- L08 Fachgespräch und Protokoll: „In-situ-Bauwerk“, Magdeburg 10.12.2009
- L09 Fachgespräch und Protokoll: „Streckenverschlüsse“, Magdeburg 11.06.2008
- L10 Kurzstellungnahme zur Unterlage: „Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton“, AG Morsleben, Sep. 2008.