

**Überprüfung und Bewertung des Instru-
mentariums für eine sicherheitliche
Bewertung von Endlagern für HAW**

ISIBEL

**AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der
einschlusswirksamen technischen
Barrieren**

Überprüfung und Bewertung des Instru- mentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren

M. Kreienmeyer; Ch. Lerch; M. Polster; M. Tholen

DBE TECHNOLOGY GmbH
Eschenstraße 55
D-31224 Peine

TEC-15-2008-AP
Gesamtzahl der Seiten: 123

FKZ 02 E 10065

Ersteller: 21.04.08 <i>J. Kreienmeyer</i>	Prüfer: 25.04.08 <i>M. Polster</i>	Freigabe: 29.04.08 <i>M. Tholen</i>
Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift	Datum/Unterschrift

April 2008

Vorwort

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurde ein Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsgestein Salz entwickelt und untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Zusätzlich wurde ein FEP-Katalog erarbeitet, in dem alle relevanten FEP zusammengestellt wurden. Die im Zeitraum vom 01.10.2005 bis 31.12.2007 durchgeführten Arbeiten sind in den folgenden Berichten zusammengefasst.

Zusammenfassender Abschlussbericht

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008

Einzelberichte der Organisationen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007
2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008
5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007
6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008
8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008

M. Kreienmeyer
C. Lerch
M. Polster
M. Tholen

DBE TECHNOLOGY GmbH

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02 E 10065 von DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	2
1 Einleitung	8
1.1 Ableitung der Anforderungen und Nachweiskonzept	11
1.2 Komponenten des (technischen) Mehrbarrierensystems für das Konzept der reinen Bohrlochlagerung	12
2 Versatz	16
2.1 Zusammenstellung der Anforderungen	16
2.2 Versatzkonzept	17
2.3 Modellierung von Salzgrus im Rahmen der Nachweisführung	19
2.4 Zusammenfassung	26
3 Bohrlochverschluss	28
3.1 Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen	28
3.2 Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen für einen Bohrlochverschluss	33
3.3 Nachweisführung	35
3.4 Zusammenfassung	37
4 Streckenverschluss	40
4.1 Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen	40
4.2 Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen	43
4.2.1 Konzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager, 1990	45
4.2.2 Konzept eines Versuchsdammbauwerkes auf der Schachtanlage Asse	48
4.2.3 Konzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager, 1998	49
4.2.4 Konzept eines Streckenverschlusses für das ERAM, 1996	50
4.2.5 Konzept eines Streckenverschlusses für das ERAM, 2002	51
4.2.6 Konzept eines Streckenverschlusses der WIPP-Site (USA)	53
4.2.7 Konzept eines Streckenverschlusses im Carnallitit	53
4.2.8 Streckenverschluss Bergwerk Hope	54
4.2.9 Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen	55
4.2.10 Dammbauwerk Bergwerk Leopoldshall	56

4.2.11	Dammbauwerk Bergwerk Sachsen-Weimar	57
4.2.12	Dammbauwerk Rocanville (Kanada)	58
4.2.13	Dammbauwerk Immenrode	58
4.3	Beschreibung der Barriere und ihrer Komponenten / Ermittlung des Standes der technischen Machbarkeit	59
4.3.1	Dichtelement	60
4.3.2	Widerlager	61
4.3.3	Injektionsmaterialien	61
4.4	Konzept zum Nachweis der Integrität der geotechnischen Barriere / geotechnische Nachweisführung	61
4.5	Ableitung von offenen Fragen / Forschungsbedarf	67
5	Schachtverschluss	69
5.1	Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen	69
5.2	Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen	73
5.2.1	Konzept eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager in Salz, 1998	73
5.2.2	Vorschlag eines Schachtverschlusses für ein Endlager im Salz (nach /SITZ 2001/)	74
5.2.3	Konzept der Schachtverschlüsse für die WIPP-Site (USA)	76
5.2.4	Konzept der Schachtverschlüsse für das ERAM	78
5.3	Beschreibung der Barriere und ihrer Komponenten / Ermittlung des Standes der technischen Machbarkeit	79
5.3.1	Dichtelement	80
5.3.2	Setzungsstabile Stützsäule	85
5.3.3	Widerlager	91
5.4	Konzept zum Nachweis der Integrität der geotechnischen Barriere / geotechnische Nachweisführung	92
5.5	Ableitung von offenen Fragen / Forschungsbedarf	93
6	Behälter	95
6.1	Einwirkungen auf Endlagergebäude bei ungestörtem und gestörtem Endlagerbetrieb	95
6.1.1	Planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebäude bei ungestörtem Betrieb des Endlagers	96
6.1.2	Außerplanmäßige Einwirkungen auf Endlagergebäude bei gestörtem Endlagerbetrieb	98

6.1.2.1	Außerplanmäßige Einwirkungen infolge von Betriebsstörungen und betrieblichen Lasten	99
6.1.2.2	Außerplanmäßige Einwirkungen infolge von Störfällen	99
6.2	Zusammenfassung	105
7	Zusammenfassung	107
	Tabellenverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis	112
	Literaturverzeichnis	114

1 Einleitung

Das Sicherheitskonzept der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Steinsalzformationen beruht vorrangig auf der gezielten Ausnutzung der hervorragenden Barriereigenschaften des Wirtsgesteins, das gleichzeitig die einschlusswirksame geologische Barriere bildet. Durch die hohe Dichtheit und praktische Undurchlässigkeit natürlicher Steinsalzformationen gegenüber Lösungen einerseits und ihrem Selbstheilungsvermögen andererseits soll ein langfristig sicherer Einschluss der endgelagerten Abfälle und damit ihre Isolation von der Biosphäre erreicht werden.

Neben dem Wirtsgestein spielen dabei der Salzgrusversatz und die geotechnischen Barrieren (Schacht-, Strecken- und ggf. Bohrlochverschlüsse) eine maßgebliche Rolle. Sie sollen die zur Einlagerung der Abfälle erforderlichen Durchörterungen des Wirtsgesteins wieder sicher verschließen, um den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen möglichst zu verhindern bzw. im Falle einer gestörten Endlagerentwicklung die Freisetzung kontaminierter Lösungen in die Biosphäre zu vermeiden oder zumindest nachhaltig zu beschränken.

Obwohl in der Vergangenheit auch von einem langfristig sicheren Einschluss der endgelagerten Abfälle in Salzgestein ausgegangen wurde, erfolgte bisher kein systematischer Nachweis des sicheren Einschlusses.

Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich erzielten Fortschritte beim Nachweis der Integrität der geologischen Barriere und der geotechnischen Barriere wurde daher im vorliegenden FuE-Vorhaben ein Nachweiskonzept entwickelt, das den Vorzügen und dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschlusses voll Rechnung trägt. Im Mittelpunkt des Langzeitsicherheitsnachweises steht daher der Nachweis des langfristig sicheren Einschlusses der endgelagerten Abfälle durch den Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren und der geologischen Hauptbarriere.

Die Bewertung von Freisetzungen erfolgt nur noch für die als gering wahrscheinlich angesehenen gestörten Entwicklungen des Endlagers, für die eine Beeinträchtigung der Integrität des Barrierensystems und damit eine Ausbildung eines durchgängigen Transportpfades nicht ausgeschlossen werden kann. D. h., die im Ergebnis der Szenarienanalyse zu betrachtenden Freisetzungsszenarien sind genau die Szenarien, für die der Integritätsnachweis für die geologische und die geotechnischen Barrieren und somit der Nachweis des sicheren Einschlusses nicht geführt werden kann.

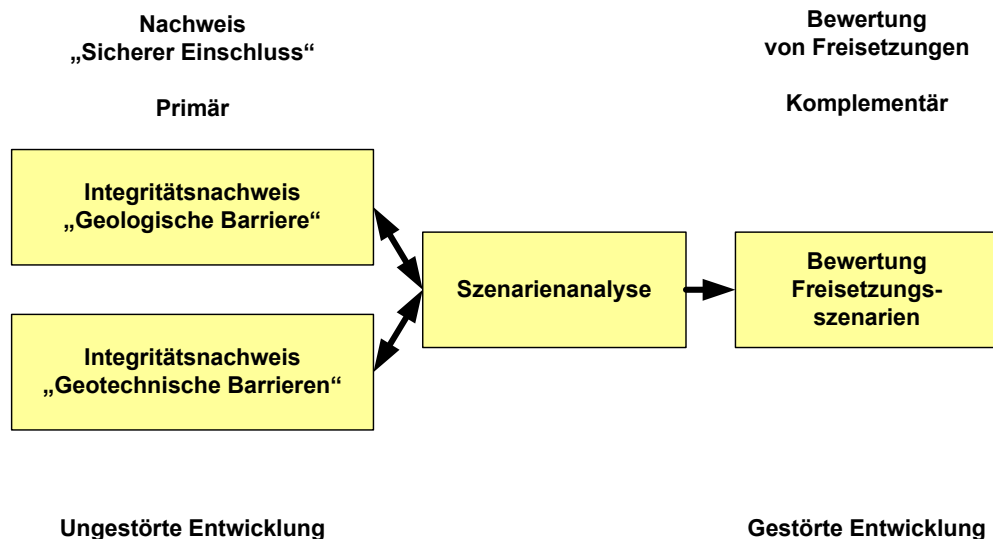


Abbildung 1-1: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis

Hinsichtlich der Auslegung des Endlagers beruht das verfolgte Sicherheitskonzept des Endlagers darauf, dass das Grubengebäude unter Berücksichtigung der vorgefundenen Geologie und der benötigten Einlagerungshohlräume und sonstigen Grubenbaue so ausgelegt wird, dass der Integritätsnachweis für die geologische Hauptbarriere, das Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS), geführt werden kann. Hierzu sind zur Einhaltung der Dilatanz- und Hydrofrac-Kriterien die Einlagerungshohlräume insbesondere in hinreichender Teufe und hinreichendem Abstand zu potentiellen Störungszonen bzw. Schichtgrenzen anzuordnen. Das Temperaturkriterium von max. 200 °C gilt dabei als wesentliche Randbedingung.

Ferner wird davon ausgegangen, dass im Zuge der Stilllegung und des Verschlusses des Endlagers das gesamte Hohlraumvolumen sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus versetzt wird, der durch die Konvergenz kompaktiert wird. Dabei nimmt seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz aufweist.

Die Schächte und die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen werden mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen. Diese geotechnischen Barrieren sind dabei so anzuordnen und auszulegen, dass der Zutritt der Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken zu den endgelagerten Abfällen und die anschließende Auspressung kontaminierter Lösungen im Fall der ungestörten Entwicklung über den gleichen Pfad nicht zu besorgen sind.

Unter Berücksichtigung der abnehmenden Porosität und Permeabilität des kompaktierten Salzgruses sind insbesondere die Anforderungen an die Langzeitstabilität und an den hydraulischen Widerstand der geotechnischen Barrieren so zu wählen, dass dieser Nachweis geführt werden kann.

Die Ableitung der Anforderungen an die geotechnischen Barrieren setzt eine hinreichende Kenntnis und Prognostizierbarkeit der Salzgruskompaktion voraus. Obwohl der Salzgrusversatz streng genommen keine geotechnische Barriere darstellt, kommt ihm einerseits für den langfristig sicheren Einschluss eine maßgebliche Rolle zu und andererseits bestimmen die Dauer und der Grad der Abnahme seiner Porosität und Permeabilität entscheidend die Anforderungen an die geotechnischen Barrieren.

Die Einhaltung dieser Anforderungen ist wiederum in den ingenieurtechnischen Nachweisen zur Barrierenintegrität zu belegen, die Gegenstand dieses Berichtes sind.

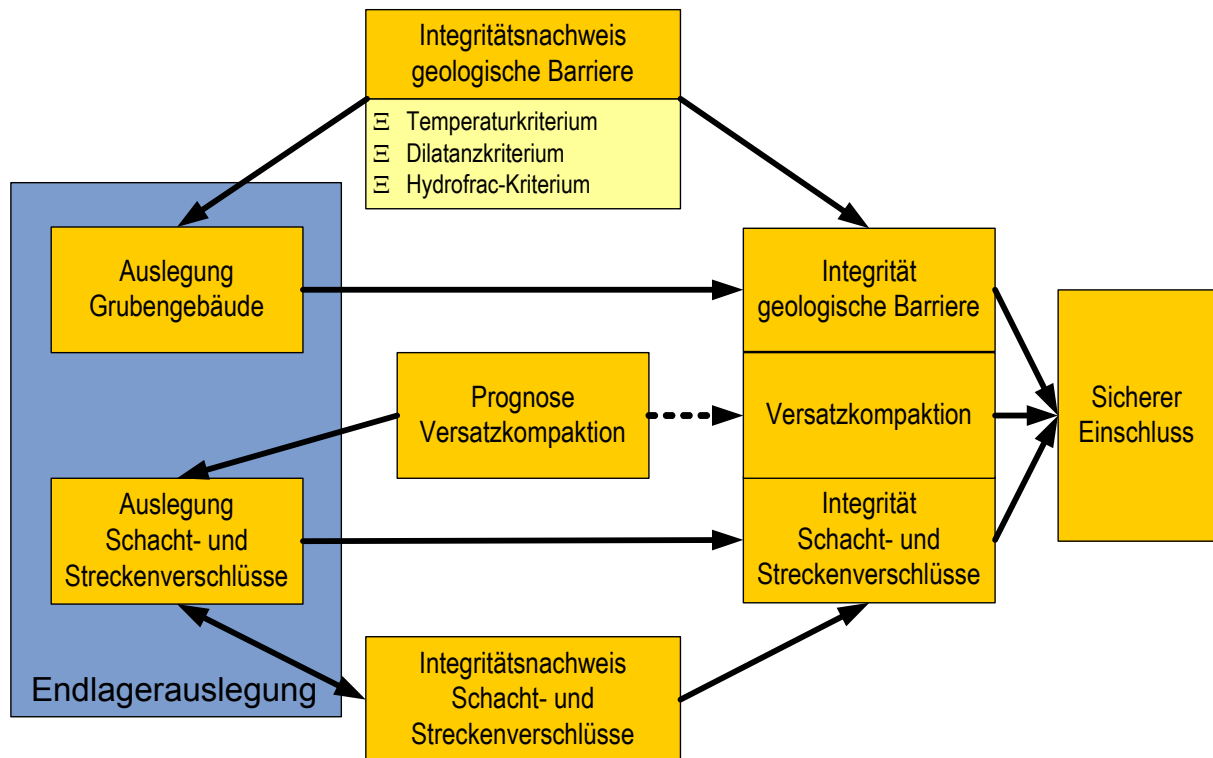


Abbildung 1-2: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“

In Übereinstimmung mit dem zugrunde gelegten Verschlusskonzept wird davon ausgegangen, dass der Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher mit einer kompaktierten Salzgruschüttung erfolgt. Ihm kommt somit die gleiche Sonderstellung wie dem Salzgrusversatz zu. Sofern für den Nachweis des sicheren Einschlusses erforderlich, insbesondere wenn eine möglichst zügige Salzgruskompaktion und damit die Erreichung einer hinreichenden Dichtwirkung nicht sicher prognostiziert werden kann, kann hierfür auch eine aufwendigere Konstruktion mit höheren Anforderungen vorgesehen werden.

Bezüglich der Integrität der Behälter hingegen werden keine besonderen Anforderungen in der Nachbetriebsphase gestellt. Ihre einschlusswirksame Funktion ist grundsätzlich auf die Betriebsphase beschränkt.

1.1 Ableitung der Anforderungen und Nachweiskonzept

Im Allgemeinen sind die Anforderungen (und damit Nachweiskriterien und die erforderlichen Nachweise) aus den einzuhaltenden Schutzzielen abzuleiten. Hier sind sowohl konventionelle als auch radiologische Schutzziele zu betrachten. Dies sind

- Schutz der Tagesoberfläche (konventionelles Schutzziel)
- Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen (konventionelles Schutzziel)
- Schutz der Biosphäre vor Radionukliden (radiologisches Schutzziel)
- Kritikalitätssicherheit (radiologisches Schutzziel)

Zudem ist während der Betriebsphase der Arbeitsschutz (radiologisch und konventionell) zu gewährleisten. Hinsichtlich des radiologischen Arbeitsschutzes sind insbesondere § 5 Dosisbegrenzung, § 6 Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung und § 55 Schutz bei beruflicher Strahlenexposition der derzeit gültigen Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ zu beachten.

Hinsichtlich des Schutzes des Grundwassers gilt, dass dieser gemäß /DBE 2008b/ für den ungestörten Fall über den Nachweis des vollständigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle gezeigt wird. Die gestörte Entwicklung wird verbalargumentativ betrachtet, Modellrechnungen sind nicht erforderlich.

Die Einhaltung der abgeleiteten Anforderungen muss unter Berücksichtigung der zu betrachtenden Einwirkungen nachgewiesen werden. Hierbei sind zunächst die Einwirkungen im Rahmen der ungestörten Entwicklung zu betrachten. Aus der gestörten Entwicklung (z. B. Antreffen von größeren Lösungseinschlüssen im Einlagerungsbereich) ergeben sich gegebenenfalls noch weitere zu betrachtende Einwirkungen.

In Abbildung 1-3 ist beispielhaft die Nachweisführung für den Integritätsnachweis geotechnischer Bauwerke, wie sie für die Stilllegung des ERAM durchgeführt wird, dargestellt. Aus den Radionuklidtransportberechnungen der Langzeitsicherheitsanalyse werden Vorgaben an den hydraulischen Widerstand der Barrieren ermittelt. Für jede zu betrachtende Barriere muss dann der Nachweis der Standsicherheit, der Rissbeschränkung und der Dauerhaftigkeit geführt werden. Zudem ist auch der Nachweis der Herstellbarkeit zu führen. Die Einhaltung des vorgegebenen hydraulischen Widerstands für Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone ergibt dann zusammen mit den vorgenannten Nachweisen den Integritätsnachweis für das jeweilige geotechnische Bauwerk.

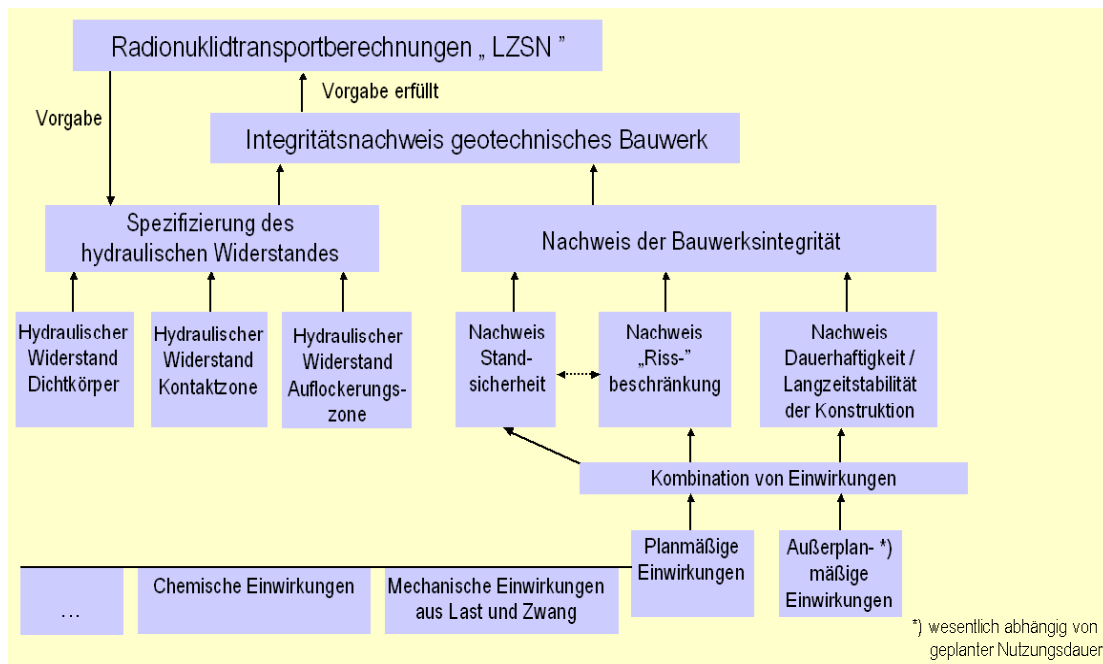


Abbildung 1-3: Zusammenhang zwischen Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren /MÜLLER-HOEPPE et al. 2006b/

In /GRS 2008/ wurden einige Szenarien, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus einem Endlager in die Biosphäre führen können, untersucht. Hierbei wurden für Lösungszutritte über Schacht- und Streckenverschlüsse unter Annahme verschiedener Versagensfälle sowie einem Zutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen Modellrechnungen durchgeführt. Es wurde dabei ein vereinfachtes Einlagerungsfeld für die Bohrlochlagerung am Referenzstandort betrachtet. Die Berechnungen haben derzeit nur orientierenden Charakter und dienen insbesondere der Überprüfung des vorhandenen Instrumentariums zur Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Steinsalz. Zur Ableitung konkreter quantitativer Anforderungen an die einzelnen Barrieren, die im folgenden Abschnitt kurz dargestellt werden, sind jedoch noch weitere Berechnungen erforderlich.

1.2 Komponenten des (technischen) Mehrbarrierensystems für das Konzept der reinen Bohrlochlagerung

Das (technische) Mehrbarrierensystem umfasst Behälter, Versatz, Bohrlochverschluss, Streckenverschluss und Schachtverschluss. Bei der in /DBE 2008a/ beschriebenen Einlagerungsvariante der reinen Bohrlochlagerung werden Brennstabkokillen BSK sowie HAW- und CSD-C-Kokillen in 300 m tiefe Bohrlöcher verbracht. Der Ringraum zwischen Behälter und Bohrlochkontur wird mit Salzgrus verfüllt. Eine detaillierte technische Beschreibung dieser Behälterarten wird in /DBE 2008a/ gegeben. Die Hauptfunktion der Behälter besteht darin, die in ihnen verpackten radioaktiven Abfälle zu fixieren, während des Transports über und unter Tage den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe zu gewährleisten und im Einlagerungsbohrloch solange die Integrität zu bewahren, bis andere Barrieren wie das Steinsalz, der Versatz und die Verschlüsse einen sicheren Einschluss ü-

bernehmen. Die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Behälter werden in Kapitel 6 dargestellt. Die befüllten Einlagerungsbohrlöcher werden abschließend mit einem Verschluss versehen. Zunächst muss der Bohrlochverschluss eine Abschirmwirkung gegen ionisierende Strahlung der letzten eingelagerten Abfallbehälter während der Betriebszeit des Endlagers erfüllen. Langfristig soll der Bohrlochverschluss dann eine Dichtfunktion übernehmen und zusammen mit dem Steinsalz und dem kompaktierten Salzgrusversatz im Ringraum des Bohrlochs den sicheren Einschluss der Endlagerbehälter gewährleisten. Die Abbildung 1-4 zeigt das Schema des oberen Bereichs einer Einlagerungsbohrung mit einem Bohrlochverschluss aus Salzgrus. Als alternative Materialien für den Bohrlochverschluss kommen Verschlusselemente in Frage, die aus Salz oder ähnlichem Material passgenau für den Bohrlochdurchmesser hergestellt werden. Die in Abbildung 1-4 dargestellte Variante wurde bereits z. B. in /GRS 1999d/ untersucht. Für diesen Bohrlochverschluss ist die Fragestellung der Kompaktion von Salzgrus von zentraler Bedeutung. Versatz wird in Kapitel 2, der Bohrlochverschluss in Kapitel 3 vertieft behandelt.

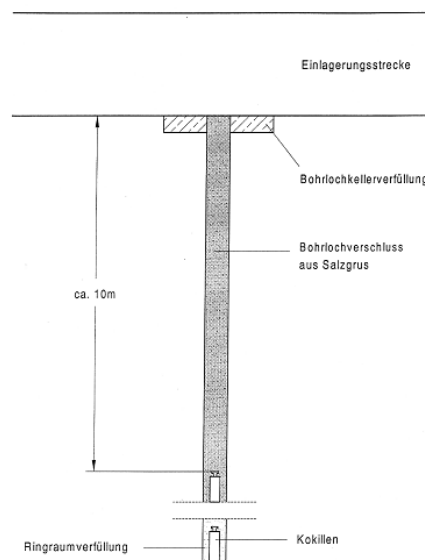


Abbildung 1-4: Bohrlochverschluss aus Salzgrus

An noch genauer festzulegenden Positionen sollen Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers durch Streckenverschlüsse abgedichtet werden. Seit Mitte der 80er Jahre wurden verschiedene technische Konzepte für Streckenverschlüsse /PtWT+E 2003/ entwickelt. Allen technischen Konzepten gemein ist, dass ein statisches Widerlager zur Aufnahme von horizontalen Drücken und des Gebirgsdruckes vorgesehen ist. Die dazu verwendeten Materialien können Formsteine (Natursteine, Salzformsteine o.ä.) oder Beton sein. Ein weiteres Element, das in allen Konzepten vorkommt, sind ein oder mehrere Dichtelemente. Dafür kommen als Baustoffe z. B. Asphalte, Bitumen oder Bentonit/Tone in Frage. Das zu bauende Streckenverschlussbauwerk wird sowohl in der Konzeption (Art und Position der einzelnen Elemente) als auch hinsichtlich der Materialauswahl den tatsächlichen am Einbauort angetroffenen Randbedingungen angepasst werden. Abbildung 1-5 zeigt beispielhaft den Entwurf eines Streckenverschlusses für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM).

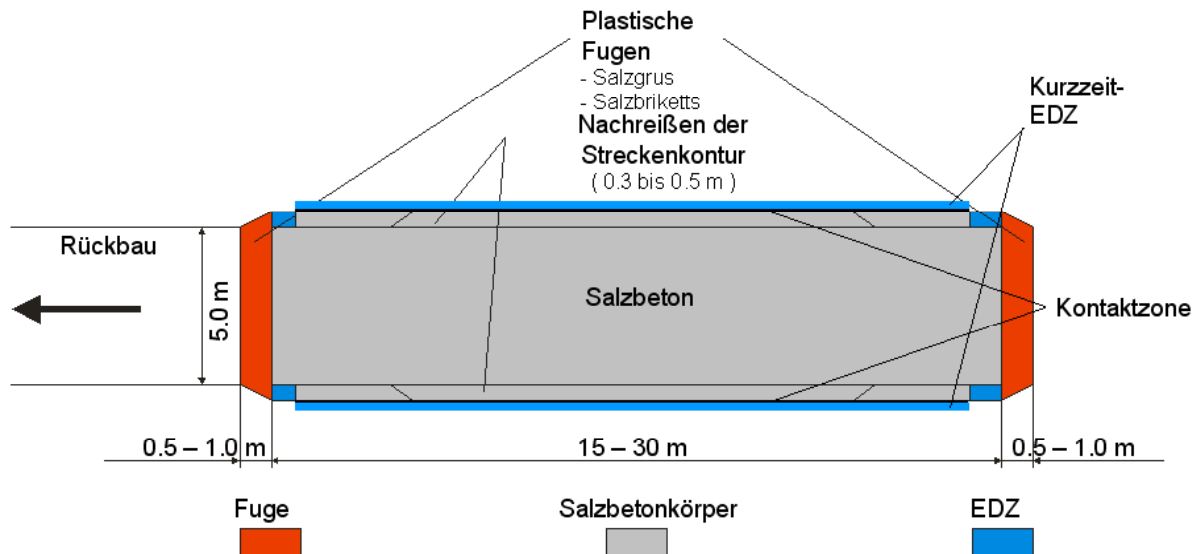


Abbildung 1-5: Entwurf Streckenverschluss ERAM /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/

Arbeiten zu Streckenverschlüssen wurden in den letzten Jahren insbesondere im Rahmen der Arbeiten zur Stilllegung des ERAM und der Schließung des Forschungsbergwerks Asse durchgeführt. Streckenverschlüsse werden in Kapitel 4 untersucht. Zudem werden im Projekt CARLA weitere Arbeiten zu Streckenverschlüssen insbesondere hinsichtlich der Langzeitstabilität der Baumaterialien durchgeführt.

Der Schachtverschluss ist der sicherheitstechnisch wichtigste Verschluss, da er die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereich wieder herstellt. Seine Hauptfunktion besteht darin, einen Wasser-/Lösungszutritt vom Deckgebirge ins Endlager nach dessen Schließung zu verhindern, und für den Fall, dass Radionuklide in der Endlagernachbetriebsphase mobilisiert werden, diese durch entsprechende Dichtfunktion im Endlager zurückzuhalten. Das Konzept eines Schachtverschlusses beinhaltet ähnlich wie beim Streckenverschluss Abdichtbauteile wie auch stützende/tragende Bauteile. Abbildung 1-6 zeigt eine Prinzipskizze für einen Schachtverschluss im Salinar /SITZ 2001/. Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurde in einem sogenannten Bohrschacht in Salzdettfurth /BREIDUNG 2002/ im Maßstab 1:1 die Wirksamkeit eines Schachtverschlusses untersucht. Eine detaillierte Betrachtung für den Schachtverschluss erfolgt in Kapitel 5.

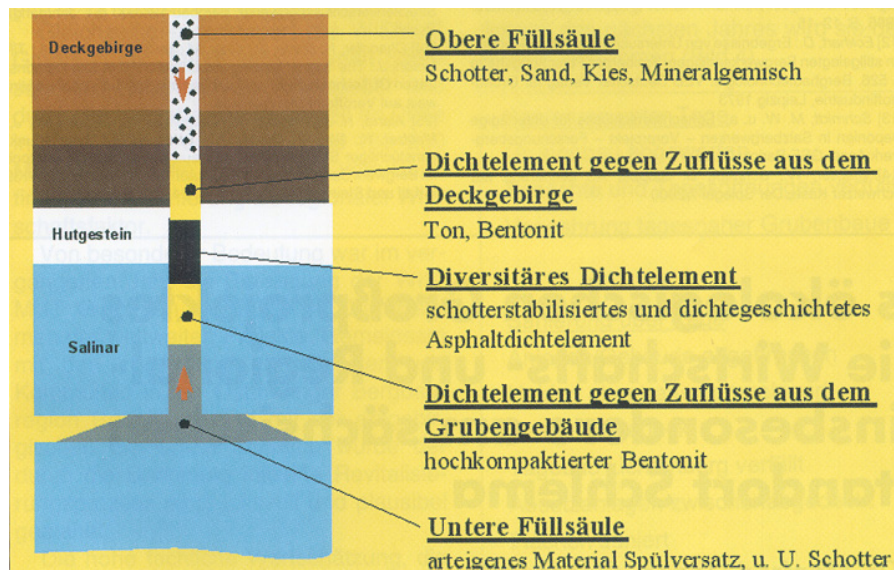


Abbildung 1-6: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar /SITZ 2001/

2 **Versatz**

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, wird davon ausgegangen, dass im Zuge der Stilllegung und des Verschlusses des Endlagers das gesamte Hohlraumvolumen des Grubenbaus des Endlagerbergwerks mit Salzgrus versetzt wird. Dieser wird durch die Konvergenz des umgebenden Steinsalzes kompaktiert, wobei seine Porosität und Permeabilität abnimmt. Langfristig nimmt der Salzgrus vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz an.

Die genaue Kenntnis und Prognostizierbarkeit der Salzgruskompaktion ist Voraussetzung zur Ableitung der Anforderungen an die geotechnischen Barrieren. Zudem kommt dem Salzgrus für den langfristig sicheren Einschluss eine maßgebliche Rolle zu.

Obwohl der Salzgrusversatz streng genommen keine geotechnische Barriere darstellt, werden an ihn ähnlich wie an die geotechnischen Barrieren Anforderungen gestellt. Diese werden unter 2.1 beschrieben. Unter 2.2 wird das technische Konzept des Versatzes bei der Strecken- und Bohrlochlagerung zusammengefasst. Abschnitt 2.3 beschreibt den für die Nachweisführung relevanten Kenntnisstand der Modellierung des Verhaltens von Salzgrus.

2.1 **Zusammenstellung der Anforderungen**

Bei der zeitlichen Zuordnung der Anforderungen muss zwischen der Betriebs- und der Nachbetriebsphase unterschieden werden. Das Verhalten in der Nachbetriebsphase lässt sich in drei Teilabschnitte unterteilen, die durch das thermische und mechanische Verhalten beschrieben werden können. Die Wärmefreisetzung des radioaktiven Abfalls erfolgt weitestgehend in der transienten Nachbetriebsphase ($0 \text{ a} - 10^4 \text{ a}$), in der monotonen Phase ($10^4 \text{ a} - 5 \cdot 10^4 \text{ a}$) findet der Ausgleich des Temperaturfeldes statt und die Versatzkompaktion wird abgeschlossen. Danach folgt die stationäre Phase. Der Zeitraum für die Ausbildung der Barrierenfunktion lässt sich mit dem momentanen Kenntnisstand nicht quantifizieren und kann daher keiner Nachbetriebsphase eindeutig zugeordnet werden. Fest steht, dass große Unterschiede zwischen dem Einschlusszeitraum für Strecken- und für Bohrlochlagerung liegen.

Anforderungen ergeben sich durch die zu berücksichtigenden Prozesse und die daraus erwachsende Materialbeanspruchung. Die Materialbeanspruchung kann auf mechanischem, thermischen, radiologischem, hydraulischem und chemischen Weg erfolgen. Sie wird insbesondere durch die folgenden Ereignisse und Prozesse initiiert

- der Konvergenz des verfüllten Grubenbaus,
- dem radioaktiven Zerfall des eingelagerten Abfalls
- Lösungen und Gase im Grubenbau

Die Entwicklung eines Prozesses wie z. B. der Konvergenz kann durchaus von weiteren Prozessen und Ereignissen wie z. B. dem Temperaturfeld, vorhandenen Lösungen und Gasen sowie vom Verhalten des Versatzes selbst abhängen /BGR 2007/. Weitere, in /BGR 2007/ nicht berücksichtigte Einflussfaktoren auf das Konvergenzverhalten sind der Spannungszustand und die Lage von weiteren Abbauen im Nahfeld. Ebenso können aus

einem Prozess unterschiedliche Einwirkungen auf das Versatzmaterial entstehen und damit unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. So ergibt sich aus dem radioaktiven Zerfall z. B. die Wärmeproduktion, aber auch die Radiolyse und mögliche Änderungen im Materialverhalten durch ionisierende Strahlung.

Bei ungestörter Entwicklung des Endlagers sind die Konvergenzrate, der Stützdruck, die Temperatur, in geringem Umfang die Feuchtigkeit, Beanspruchung aus dem Siloeffekt sowie die Radiolyse als Einwirkungen auf den Versatz zu betrachten. Bei der gestörten Entwicklung ergeben sich zusätzliche Einwirkungen aus Feuchtigkeit in erheblichem Umfang, ggf. einem gefluteten Zustand, dem Porendruck aus Gas oder/und Fluid, der Durchströmung mit Gas oder/und Fluid sowie chemischer Umwandlung. Daraus lassen sich Anforderungen ableiten, die bezüglich der mechanische Stabilisierung der geologischen Barriere bestehen, der Lastabtrag im Bohrloch, der Ableitung der Zerfallswärme, des Strahlenschutzes, der Unterkritikalität, eines verfügbaren Volumens zur Gasspeicherung, des Explosionsschutzes, der Verringerung des potentiellen Aufnahmevermögens für Fluide und der Dichtheit gegenüber Fluiden, sei es aus dem Wirtsgestein oder den Fließwegen der vorhandenen Auffahrungen. Nicht alle funktionalen Anforderungen sind hinreichend konkretisierbar, z. B. wenn nur ein mittelbarer Zusammenhang zum Schutzziel besteht. Ein mittelbarer Zusammenhang besteht z. B. bei der thermischen Belastung der verwendeten Materialien. Nicht die Temperatur an sich ist Bestandteil der Sicherheitsanalyse sondern ihre Auswirkung auf die Materialeigenschaften. Im Rahmen der Auslegung wird eine Maximaltemperatur von 200 °C für den Salzgrusversatz und die geologische Barriere berücksichtigt.

Die weiteren Anforderungen lassen sich nicht quantifizieren. So ist z. B. die Abschätzung des erforderlichen Gasspeichervolumens und ihre zeitliche Eingrenzung bei einer gestörten Entwicklung des Endlagers noch nicht erfolgt. Entsprechend lässt sich nicht abschätzen, ob der zum Ereigniszeitpunkt erforderliche Porenraum eines abgeschlossenen Einlagerungsteils zur Verfügung steht oder durch eine Konzeptänderung geschaffen werden muss. Allerdings wurde in /BGR 2007/ für eine Gasbildung unter Lösungseinfluss festgestellt, dass im unmittelbaren Einlagerungsbereich nur sehr geringe Lösungsmengen im Wirtsgestein vorhanden sind. Erfolgt der Fluidzutritt dagegen über einen Verschluss, ist der Einlagerungsteil nicht mehr geschlossen, so dass dieser Weg für das produzierte Gas ggf. nach Überwinden eines Sperrdrucks zur Verfügung steht.

2.2 Versatzkonzept

Im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung im AP 1.2 wird Salzgrus als Versatz für den Einlagerungsbereich und die Zugangs- und Verbindungsstrecken angesetzt, /DBE 2008a/. Es ist ein wirtsgesteineigenes Material, welches aus dem aufgefahrenen Haufwerk gewonnen wird. Bei den vorhandenen Einbringtechniken weist es eine Anfangsporosität von ca. 35 % auf. Seine Kompaktion bzw. die Entwicklung eines Stützdrucks an der Hohlraumkontur stellt sich abhängig von der Konvergenzrate an der Hohlraumkontur, der Temperatur und der Feuchte über der Zeit ein. Ergebnisse zu Untersuchungen von Salzgrus als Streckenversatz sind insbesondere in /EC 1999/ und /EC 2004/ sowie den dort genannten Literaturstellen beschrieben, Untersuchungsergebnisse zur Bohrlochlagerung sind in

/EC 1999/ mit enthalten. Ein momentaner Forschungsschwerpunkt besteht darin, das Verhalten von Steinsalz unter dem Einfluss seiner Schädigung und möglichen Verheilung zu untersuchen, /Hampel 2007/. Dieses Verhalten kann als Annäherung an das Materialverhalten von Salzgrus im Bereich sehr kleiner Restporositäten gesehen werden. Die Zulässigkeit dieser Übertragung vom Steinsalzverhalten auf das des Salzgrus steht jedoch noch aus.

Im Folgenden wird auf das technische Konzept des Versatzes bei der Strecken- und der Bohrlochlagerung eingegangen. Beiden Konzepten ist das verwendete Versatzmaterial gemeinsam, indem Salzgrus ohne Zusatzstoffe, gewonnen aus der Hohlräumeauffahrung, seitens der Betriebsführung für die Einlagerungsstrecken und -bohrlöcher die Zeitdauer der freien Konvergenz auf das erforderliche Minimum beschränkt wird. Darüber hinaus stellt sich das Einlagerungskonzept wie folgt dar:

Streckenlagerung

Zwei 200 m lange Einlagerungsstrecken werden mit einer Teilschnittmaschine aufgefahren, unmittelbar im Anschluss wird mit der Einlagerung in beiden Strecken begonnen. Nach Einlagerung des einzelnen POLLUX-Behälters wird der verbleibende Resthohlraum um diesen Behälter mit Salzgrus verfüllt. Entsprechend bisherigen Auslegungen beträgt der Behälterabstand innerhalb einer Strecke je nach Inventar und Zwischenlagerzeit mehrere Meter. Nach Einlagerung des letzten Behälters wird die jeweilige Strecke vollständig mit Salzgrus verfüllt. In Verbindung mit der Einbringtechnik wird der Versatz als Schleuderversatz bezeichnet, alternativ ist als Einbringtechnik ein Blasverfahren möglich. Es wird der bei der Auffahrung durch die Teilschnittmaschine gewonnene Versatz verwendet. Mit dem im TSS-Versuch erprobten Verfahren wird der Salzgrus mit einer durchschnittlichen Anfangsporosität von 0,35 firstbündig eingebracht.

Beim Vergleich zwischen beiden Einbringverfahren werden die Salzkörner beim Blasverfahren im stärkeren Umfang zertrümmert, so dass damit der Feinkornanteil bei diesem Einbringverfahren steigt, /DBE 1991/. Bei beiden Verfahren kommt es über der Streckenhöhe zu einer Entmischung, was sich in der Kornverteilung widerspiegelt. Insbesondere im Sohl- und im Firstbereich weist das Blasverfahren eine geringere Einbaudichte bzw. eine größere Bandbreite in der Einbaudichte auf. Zur Staubbinding wird die Zugabe geringer Mengen an gesättigter Lauge als möglich, eine Sonderbewetterung jedoch als ausreichend angesehen, /DBE 1991/.

Bohrlochlagerung

Unmittelbar vor Einlagerung des ersten Behälters wird das Einlagerungsbohrloch der Länge 300 m und des Durchmessers 600 mm gebohrt, /DBE 2008a/. Nach Einlagerung der einzelnen Kokille wird der verbleibende Ringraum um diesen Behälter mit Salzgrus verfüllt. Ggf. ist eine weitere Überschüttung der Kokille erforderlich, um einen vorgegebenen Abstand zwischen zwei Kokillen zu erreichen. Nach Einlagerung der letzten Kokille wird auch diese Kokille im Salzgrus eingebettet. Unmittelbar darüber schließt der Bohrlochverschluss an, der abhängig vom Verschlusskonzept des Bohrlochs aus einer reinen Salzgrusschüttung, /DBE 2008a/, oder aus einer Kombination aus Salzgrus und Steinsalzformstück besteht, Kapi-

tel 3.2. Die geringe Spaltweite zwischen Kokille und Bohrlochwand bei der Einlagerung der Kokillen erfordert einen feinkörnigeren Versatz als er bei der Streckenlagerung verwendet wird. Es ist eine Kornverteilung des Versatzes vorgesehen, deren Sieblinie bei einem maximalen Korndurchmesser von 8 mm der in den DEBORA-Versuchen /GRS 1999d/ verwendeten entspricht. In den Versuchen des DEBORA-Projekts konnte eine Anfangsporosität von 0,36 bis 0,38 erzielt werden, allerdings ist die Einbringtechnik bei der Bohrlochlagerung erst noch festzulegen und zu erproben. Solange der oberste, im Bohrloch eingebrachte Behälter noch nicht ausreichend mit Salzgrus überdeckt ist, wird das Bohrloch mit einer Bohrlochschleuse abgeschlossen. Damit ist nicht nur die radiologische Sicherheit während der Betriebsphase gegeben, sondern es fehlt auch die Beeinträchtigung im Arbeitsumfeld durch Salzstaub. Eine Zugabe gesättigter Salzlauge zur Staubbinding ist bei der Bohrlochlagerung daher nicht erforderlich. Sind alle Bohrlöcher einer Einlagerungsstrecke verfüllt, wird die Einlagerungsstrecke selbst mit Salzgrus verfüllt. Dabei kommt die bei der Streckenlagerung beschriebene Einbringtechnik zum Tragen.

2.3 Modellierung von Salzgrus im Rahmen der Nachweisführung

Vor dem Hintergrund eines Nachweiszeitraums von bis zu 10^6 a werden die Nachweise im Wesentlichen berechnungsgestützt erbracht. Voraussetzung für eine hohe Prognosegenauigkeit sind Modelle, welche die wesentlichen Effekte abdecken und die ein robustes Verhalten aufweisen. Um die Übertragbarkeit zwischen Berechnung und Ausführung zu gewährleisten, muss bei der Bauausführung die Verwendung eines einheitlichen Material sichergestellt werden, welches mit in Grenzen vorgegebenem Feuchtegehalt und mit einer mittlere Einbringdichte konturbündig eingebaut wird. Zum Nachweis der Konturbündigkeit genügt im Fall der Streckenlagerung der Nachweis der Firstbündigkeit und der Bündigkeit im Bereich der Firstwölbung. Im Fall der Bohrlochlagerung ist die Konturbündigkeit durch den Verfüllprozess selbst bereits gegeben.

Als Absicherung des rechnergestützten Nachweises existieren im Moment mit dem Versuch zur Streckenlagerung im BAMBUS-Projekt /EC 1999/ und /EC 2004/ und den Versuchen zur Bohrlochlagerung innerhalb der DEBORA-Projekte /EC 1999/ Untersuchungen, die zumindest weitgehend auf die Beschreibung des Versatzverhaltens abzielen. Im BAMBUS-Projekt ist im kalten Bereich, hier in einer Entfernung von ca. 12 m zum letzten Behälter, ausgehend von einer Einbauporosität von 0,35 nach ca. 8,5-jährigen Versuchsdauer mit einer Porosität zwischen 0,25 und 0,35 nur eine geringe Porositätsänderung erreicht worden. Der Versatzdruck am Ende des Versuchs war in diesem Bereich mit unter 0,5 MPa gering und die Konvergenzrate der Strecke in horizontaler und vertikaler Richtung betrug ca. 10^{-10} s^{-1} . Die thermische Belastung stieg innerhalb der Versuchsdauer im kalten Bereich, hier auf der Sohle, stetig bei weiter steigender Tendenz bis auf ca. 48 °C. Im heißen Bereich wurde nach Abschluss der Versuchsdauer eine Porosität zwischen 0,15 und 0,30 festgestellt. Der Versatzdruck betrug am Ende des Versuchs zwischen 1,5 MPa und 4 MPa und die Streckenkonvergenzrate lag mit ca. 10^{-10} s^{-1} auf dem Niveau des kalten Bereichs. Im heißen Bereich wurde mit ca. 210 °C die zulässige Temperatur an der Oberflächen der Behälter erreicht, /GRS 2001/, bei gleichbleibender Erhitzerleistung fiel die Temperatur über dem anschließenden Versuchszeitraum auf bis zu 165 °C ab. Im heißen Bereich des Versuchsfelds

stieg die Konturtemperatur an der Firste bis auf ca. 90 °C. Während und im Anschluss an die Versuchsphase ist die Feuchtigkeit im Versatz gemessen worden, /GRS 2001/ und /GRS 2003a/. Die Messungen ergaben, dass Wasser freigesetzt und transportiert wurde.

Für das bei der Streckenlagerung verwendete Material und Kornverteilung liegen für den labortrockenen Versatz Daten in /BGR 1995/, /BGR 1998/ und /KORTHAUS 1996/ vor. Die Versuche decken im Wesentlichen den Porositätsbereich zwischen der Einbauporosität und einer Porosität von ca. 0,1 im relevanten Temperaturbereich und für labortrockenes Material ab. Insgesamt entsprach die thermische Belastung weitgehend dem bei der Streckenlagerung anzutreffenden Verhalten, allerdings lagen die Belastungsgeschwindigkeiten im Versuch teilweise um mehrere Größenordnungen über den im Endlager relevanten Geschwindigkeiten. Die Berechnungen in BAMBUS I /EC 1999/ wurden zunächst auf Basis der Daten aus /BGR 1995/ durchgeführt, in BAMBUS II erfolgte ein Wechsel auf die Daten in /KORTHAUS 1996/. Der Wechsel der Datenbasis wurde im Wesentlichen mit dem sich aus /BGR 1995/ ergebenden sehr hohen Spannungsexponenten bei der Anpassung der Materialparameter begründet.

Ein Ziel der Projektphase BAMBUS II, /EC 2004/, war der Vergleich der Materialmodelle zur numerischen Berechnung des Salzgrusversatzes. Zusammen mit den experimentellen Daten konnten die auftretenden Effekte qualitativ und quantitativ beschrieben werden. Die verwendeten Parametersätze müssen mit den Einschränkungen aus den experimentell ermittelten Daten gesehen werden, indem die Abweichung in der Kompaktionsrate zwischen gemessenem und mit den Stoffgesetzen angepasstem Verhalten bis zu einer Größenordnung betragen, /GRS 1999a/. Die in /EC 2004/ enthaltenen Berechnungsergebnisse zum Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes zeigen, dass

- das Verhalten in heißen und kalten Streckenabschnitten nicht mit der gleichen Prognosegüte bestimmt werden konnte,
- das Kompaktionsverhalten i. a. überschätzt wurde,
- Abweichungen in der Geschwindigkeit der Porositätsentwicklung zum Endzeitpunkt bestehen.

Im Projekt DEBORA ist die Bohrlochlagerung untersucht worden, /GRS 1999d/ und /EC 1999/. Im Versuch zur Kokilleneinlagerung, DEBORA-1, ist ausgehend von einer Einbauporosität von 0,36 bis 0,38 im Anschluss an die ca. einjährige Versuchsdauer im Erhitzerbereich eine Porosität zwischen 0,06 und 0,08 bei sehr geringer Änderungsrate festgestellt worden. Der Versatzdruck hat am Ende des Versuchs mit ca. 16 MPa das Niveau der Gebirgsspannung erreicht. Die thermische Beanspruchung des Versatzmaterials lag oberhalb von ca. 180 °C. In DEBORA-2 ist das Kompaktionsverhalten von Salzgrus in einem Bohrloch unter dem Einfluss von Konvergenz und Temperatur untersucht worden. Innerhalb des Versuchszeitraums ist das Material von 0,37 auf ca. 0,12 kompaktiert worden. Die Konvergenzrate des Bohrlochs in radialer Richtung betrug zum Endzeitpunkt des Versuchs unter 10^{-9} s^{-1} . Die Versatzdruckmessungen stiegen zunächst auf ca. 15 MPa, weisen jedoch ab der zweiten Hälfte der Versuchszeit einen nicht nachvollziehbaren Spannungsabbau auf. Die thermische Beanspruchung im Versatz ist über die Versuchsdauer von ca. 1,2 a auf ca. 130 °C angestiegen.

Die in /GRS 1999d/ enthaltenen Berechnungsergebnisse bilden das thermomechanische Verhalten mit den vorhandenen Stoffgesetzen auf Basis der experimentellen Untersuchungen bei der Bohrlochlagerung prinzipiell ab, zeigen aber auch, dass

- die Temperatur überschätzt wurde,
- Abweichungen in der Porositätsentwicklung, hier insbesondere im Bereich mittlerer Porositäten bzw. mittlerer hydrostatischer Spannungen existieren,
- Fragen zur Porositätsentwicklung im Bereich vollständiger Kompaktion trotz günstiger thermischer Bedingungen offen sind,
- die Temperatur eines bis zu 10 m langen Bohrlochstopfens gegenüber DEBORA-2 deutlich niedriger anzusetzen ist.

Zusammenfassend für DEBORA und BAMBUS kann festgestellt werden, dass die Prognose für die ungestörte Entwicklung des Endlagers mit bergtrockenem Versatz im Rahmen eines Standsicherheitsnachweises mit den vorhandenen Stoffmodellen möglich ist. Angemerkt sei, dass es sich bei der Salzgrusanwendung in DEBORA 2 nicht um Salzgrus als Bohrlochversatz handelte, sondern um den Bohrlochverschluss, siehe Kapitel 3.

Die Frage des Feuchtigkeitseinflusses ist sowohl für die ungestörte wie für die gestörte Entwicklung des Endlagers offen. In /BGR 1998/ wurde gezeigt, dass Feuchtigkeit einen signifikanten Einfluss auf den Versatzdruck hat. In /GRS 2000/ sind Transportvorgänge im Zusammenhang mit Fluidströmungen untersucht worden. Auch wenn hier die gestörte Entwicklung, nämlich ein Lösungszutritt, im Vordergrund stand, zeigen die Ergebnisse, dass die Feuchtigkeit, wie sie bei der in /GRS 2001/ und /GRS 2003a/ festgestellten Trocknung des Salzgruses auftritt, umverteilt wird und damit zu dem in /BGR 1998/ gezeigten Abfall im Versatzdruck führen kann.

Der vollständige Einschluss der Behälter wurde im vergleichsweise kurzen Versuchszeitraum aller hier genannten Versuche nicht erreicht. Im Bereich des geschädigten Steinsalzes ist der Übergangsbereich vom dilatanten Steinsalz zur Verheilung ein Gebiet der momentanen Forschung, /HAMPEL 2007/ und /PTE 2007/. Die gleiche Fragestellung ergibt sich bei geringen Porositäten beim Übergang des Salzgrusversatz zum Steinsalz.

Im Folgenden werden Einflussfaktoren und die für die Nachweise erforderlichen Teilstoffgesetze betrachtet.

Geometrischer Einfluss

Der Salzgrus zur Streckenlagerung weist einen maximalen Korndurchmesser von ca. 100 mm auf. Messungen zur Kornverteilung und zur Dichteverteilung im Streckenversatz haben eine Entmischung der unterschiedlichen Versatzfraktionen ergeben, /DBE 1991/, wobei im unteren Streckenteil tendenziell Körnungen mit einem höheren Grobanteil als im oberen Streckenteil vorlagen, /GRS 2003a/. Im Rahmen von Laborversuchen wird für dieses Material eine Kornverteilung mit einem maximalen Korndurchmesser von 31,5 mm verwendet, /GRS 1999d/.

Bei der Bohrlochlagerung wird durch das Nennmaß des Spalts von ca. 85 mm zwischen Bohrlochwandung und Kokille ein Versatzmaterial mit feinerer Körnung benötigt. In den DE-BORA-Versuchen, /GRS 1999d/, wurde für das Versatzmaterial ein maximaler Korndurchmesser von 8 mm und eine Sieblinie angesetzt, wie sie sich aus dem Labormaterial zur Streckenlagerung bei entsprechend begrenztem Korndurchmesser ergibt. Signifikant abweichende Sieblinien zwischen dem bei der realen Verfüllung eingesetztem Material und dem Labormaterial sind bei dem geringen erforderlichen Volumen für die Einbettung einer einzelnen Kokille nicht zu erwarten. Diese Annahme sowie Daten zur Porositätsverteilung bei der Bohrlochlagerung sollen im Zusammenhang mit dem Projekt REPOPERM und seinem Folgeprojekt untersucht werden.

Je nach physikalischer Größe haben unterschiedliche Faktoren der Kornverteilung einen Einfluss. Das Kompaktionsverhalten wird durch die Ausbildung von Stützlinsen mehr durch den Grobkornanteil bestimmt, das hydraulische Verhalten mehr durch den Feinkornanteil. Erste Untersuchungen zum Einfluss der Kornverteilung auf das Kompaktionsverhalten finden sich in /BGR 1998/. In den jeweiligen Stoffmodellen wird der geometrische Einfluss über die Porosität als der wichtigsten geometrischen Größe beschrieben, die Kornverteilung kann in den Berechnungsmodellen nur in Form von Bandbreiten der Materialparameter abgedeckt werden. Genauere Kenntnisse zur Kornverteilung sind zur Einschränkung der Bandbreite wünschenswert, jedoch kein vordringlicher Forschungsschwerpunkt.

Mechanisches Verhalten

Das mechanische Verhalten des Salzgrus ist ein porositätsabhängiges elastoplastisch-viskoplastisches Verhalten. Grundsätzlich wirken alle in Kapitel 2.1 genannten Einflussgrößen auf das mechanische Materialverhalten einwirken. Angemerkt sei, dass sich der Einfluss ionisierender Strahlung auf wenige Dezimeter um die Strahlungsquelle beschränkt, /GRS 2004b/, gleichzeitig ist dieses mit bis zu 200 °C der Bereich der höchsten Temperaturen im Versatz. In dem angegebenen Temperaturbereich wird nach /SCHULZE 1986/ der materialschädigende Einfluss der Strahlung durch die gleichzeitig ablaufende Erholung (Defektrekombination) kompensiert. Der radiologische Einfluss auf das mechanische Verhalten kann daher vernachlässigt werden. Der chemische Einfluss beschränkt sich bei ungestörter Entwicklung des Endlagers auf die mineralogische Zusammensetzung. Entsprechend der im Einlagerungsbereich anstehenden stratigraphischen Einheit ist z2HS zur Verfüllung vorgesehen. Im Fall der gestörten Entwicklung mit Zulauf ungesättigter Lösung

werden spezielle Aufsättigungszonen vorgesehen. Weitere Auf- und Umlöseprozesse ergeben sich im Zusammenhang mit thermisch induzierter Verschiebung des Lösungsgleichgewichts.

Das Kompaktionsverhalten ist die wesentlichste Eigenschaft des mechanischen Materialverhaltens. Wie oben beschrieben ist die Frage des Spannungsexponenten zur Anpassung an die Versuchsdaten und die Genauigkeit der Anpassung noch nicht vollständig befriedigend gelöst, darüber hinaus ist das Kompaktionsverhalten im Bereich geringer Porositäten unter endlagerrelevanten Bedingungen noch offen.

Das elastische Verhalten hat eine untergeordnete Bedeutung. In /EC 1999/ wurde von einzelnen Projektteilnehmern der Kompaktionsprozess bei der Streckenlagerung mit einem konstanten Ansatz für das elastische Verhalten beschrieben, ohne damit qualitativ schlechtere Ergebnisse zu erzielen. Allerdings wird in den Berechnungen nur ein vergleichsweise kurzer Kompaktionszeitraum betrachtet. In den Modellansätzen in /EC 2004/ wird das elastische Verhalten porositätsabhängig beschrieben, welches bei vollständiger Kompaktion den Wert des festen Steinsalzes erreicht. Weitere Abhängigkeiten wie z. B. von der Temperatur sind nicht berücksichtigt. Ein Forschungsbedarf wird an dieser Stelle nicht gesehen.

Neben dem elastischen und dem viskoplastischen Materialverhalten ist das Festigkeitsverhalten ein weiterer Teilbereich des mechanischen Materialverhaltens. Das Festigkeitsverhalten ist für trockenen Salzgrus unter dem Aspekt der Lastabtragung der Kokillen untersucht und modelltechnisch beschrieben worden, /GRS 1999a/. Bezogen auf einen Bohrlochdurchmesser von 600 mm ergab sich im Technikumsmaßstab eine Laststeigerung bis in eine Teufe von 3 m auf 21 kPa. Als offen wurde die Frage einer dynamischen Anregung angesehen. Ebenso ist das Verhalten unter Feuchtigkeitseinwirkung offen. Beides sind Störfallszenarien, deren Auswirkung sich ausschließlich auf die Betriebssicherheit erstreckt. Falls diesen Ereignissen mit einer hinreichend dicken Salzgrusschicht zur Einhaltung der radiologischen Sicherheit begegnet werden kann, ergibt sich an dieser Stelle kein weiterer Forschungsbedarf.

Beim Langzeitsicherheitsnachweis wird im Zusammenhang mit der gestörten Entwicklung des Endlagers von einer gleichbleibenden Porositätsverteilung ausgegangen. Die hydraulischen Kräfte wirken jedoch auch auf das Korngerüst des Salzgrus, so dass lokal Auflockerungen auftreten können, die bis hin zur Kanalbildung führen können. Dieser für den Nachweis wesentliche Effekt ist bislang nicht betrachtet worden.

Thermisches Verhalten

Für den trockenen Zustand des thermischen Verhaltens sind in /EC 1999/ Messdaten dokumentiert. Die Messdaten decken einen Porositätsbereich zwischen einer geringfügigen Vorverdichtung bis zu 0,05 sowie einen Temperaturbereich von 20 °C bis 80 °C ab. Angemerkt sei, dass die Proben mit geringer Porosität durch eine Druckbeaufschlagung mit bis zu 100 MPa hergestellt wurden. Bruchvorgänge in den Körnern können daher in diesen Proben nicht ausgeschlossen werden. Insgesamt hängt die Wärmeleitung von der Verbindung zwischen den Körnern und damit von der Kornverteilung und dem Kompaktionsprozess sowie

den Beanspruchungsbedingungen ab. In /GRS 1999d/ wird die Wärmeleitung des Salzgrus in Abhängigkeit von der des Steinsalzes beschrieben, wobei dort das Temperaturspektrum zwischen 200 °C und Gebirgstemperatur abgedeckt wird. In /GRS 2000/ sind weitere Messdaten im Bereich zwischen der Einbaudichte und der Dichte Steinsalz sowie Temperaturen zwischen Gebirgstemperatur und 200 °C enthalten.

Stoffmodelle zur Wärmeleitung und Wärmekapazität finden sich in /GRS 1999d/ und /GRS 2000/ sowie im Zusammenhang mit den o. g. Messdaten in /EC 1999/. Der Ansatz in /EC 1999/ beschreibt die Wärmeleitung allein in Abhängigkeit von der Porosität. Vor dem Hintergrund der Bandbreite in den Messdaten werden Abweichungen von bis zu maximal 10 % als vertretbar angesehen. Die Bandbreite in den Daten der Wärmeleitfähigkeit in /GRS 2000/ geht bei vorgegebener Porosität mit ca. 25 % deutlich über diese Grenze hinaus. Die zusätzliche Berücksichtigung der Temperatur in der Wärmeleitfähigkeit sollte betrachtet werden.

Die in /EC 2004/ dargestellten Ergebnisse auf Basis der Messdaten aus /EC 1999/ weisen eine gute Übereinstimmung in der Temperatur auf. Wegen der Porositätsabhängigkeit des thermischen Stoffmodells muss jedoch auf die bereits oben erwähnte Überschätzung im Kompaktionsverhalten hingewiesen werden. Es sollte geprüft werden, ob mit einem Stoffmodell, das neben der Porosität auch die Temperatur beinhaltet, die Ergebnisse verbessert werden können.

Für Salzgrus im feuchten und nassen Zustand liegen lediglich in /GRS 2000/ einige wenige Daten vor, es wird die Wärmeleitfähigkeit von geringfügig kompaktiertem Salzgrus mit einer Porosität um 0,3 im Feuchtebereich zwischen trocken und ca. 13 Gew.-% Flüssigkeit angegeben. Bei der gegebenen Porosität ist ein signifikanter Anstieg in der Wärmeleitfähigkeit erst ab ca. 4 Gew. % Flüssigkeit festgestellt worden.

In Hinblick auf die Betrachtung der gestörten Entwicklung besteht Forschungsbedarf für das Verhalten von Salzgrus mit höherem Feuchtegehalt.

Hydraulisches Verhalten

Die Permeabilität ist die wesentliche Einflussgröße des hydraulischen Verhaltens. Z. B. in /GRS 1996/, /GRS 1999b/, /EC 1999/, /GRS 1999c/, sowie in /BGR 1998/ finden sich Ergebnisse aus Permeabilitätsmessungen. In den Materialmodellen wird die Permeabilität in Abhängigkeit von der Porosität beschrieben. Im gesamten untersuchten Porositätsbereich weisen die zugeordneten Permeabilitäten bei gegebener Porosität eine Bandbreite von bis zu zwei Größenordnungen auf. Zusätzlich zur Porosität sind die Porenverteilung, der Spannungseinfluss, die Temperatur, die Entwicklungsgeschichte in der Porositätsentwicklung sowie die stratigraphische Zuordnung des Materials weitere wesentliche Einflussgröße. Erste Untersuchungen zum Spannungseinfluss auf die Permeabilität sind in /EC 1999/ und /GRS 1999c/ enthalten. Die weiteren Einflussfaktoren sind nur in Ansätzen untersucht. In den Modellrechnungen können die bestehenden Unsicherheiten lediglich im Rahmen von Bandbreitenbetrachtungen abgedeckt werden. Eine im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises zentrale Fragestellung ist das Verhalten bei kleinen Porositäten. Gerade in diesem Bereich hat die Porenverteilung und damit sowohl die Entwicklungsgeschichte wie auch die

Kornverteilung einen signifikanten Einfluss. Insbesondere für das Material der Bohrlochlagerung existieren an dieser Stelle nur wenige Daten. An dieser Stelle besteht Forschungsbedarf.

Ein wesentlicher Einfluss bei der gestörten Entwicklung des Endlagers ist der Einfluss von Laugen. Bei einem Zutritt aus dem Salzstock selbst handelt es sich um gesättigte Lösungen, bei dem Zutritt ungesättigter Lösungen durch den Schacht wird von einer Aufsättigung und Umlösungen vor Zutritt zum Einlagerungsbereich ausgegangen, allerdings verbleibt damit immer noch die thermisch induzierte Aufsättigung und Ausfällung. In den o. g. Stellen sowie in /GRS 2000/ finden sich z. T. Untersuchungen zum Verhalten unter Feuchtigkeitseinfluss und für den gesättigten Zustand. Hier zeigen die Ergebnisse zur Permeabilität im untersuchten Porositätsbereich bei gegebener Porosität mit bis zu vier Größenordnungen Streuung noch eine wesentlich größere Bandbreite als im trockenen Zustand. In /GRS 1996/ sind dafür eine Reihe an Ursachen genannt, wie z. B. die zu einer Beeinträchtigung des Messergebnisses führen. In den Untersuchungen in /GRS 1999a/ zeigt sich für den Einfluss einer Lauge gegenüber den o. g. Untersuchungen ein sehr viel stärkerer Einfluss. Daher besteht auch hier ein Forschungsbedarf.

Komplexer wird das Verhalten bei der Betrachtung sowohl der Gas- wie auch der flüssigen Phasen. Es existieren nur mehr orientierende Untersuchungen zum Zweiphasentransport, /GRS 1999a/ und /GRS 2000/. Hier kommen mit der relativen Permeabilität und dem Kapillardruck weitere zu bestimmende Materialparameter hinzu. In /GRS 1999a/ wird insbesondere die hohe Sensitivität der Ergebnisse von den Materialparametern festgestellt. Auf Grund der Komplexität in diesem Bereich besteht hier ein erheblicher Forschungsbedarf.

Radiologisches Verhalten

Auf die Einwirkung ionisierender Strahlung auf das Materialverhalten ist bereits oben eingegangen worden. Wegen ihrer geringen Größe im Salz kann die ebenfalls auftretende Sorptionsfähigkeit bei dem hier zugrundeliegenden Verfüllkonzept vernachlässigt werden. Ein weiterer Aspekt ist die Radiolyse. In /GRS 2004b/ ist ein Modell inklusive des für Halit erforderlichen Parameters angegeben. Auf die Konservativität der Modellbildung in Bezug Sättigung und Transportprozesse wird hingewiesen. Sollten die enthaltenen Konservativitäten in der Modellbildung Bestand haben, besteht an dieser Stelle kein Forschungsbedarf.

Chemischer Einfluss

Auf- und Umlöseprozesse werden im Langzeitsicherheitsnachweis nicht beschrieben, statt dessen wird von einem konstanten Strömungswiderstand des Versatzes ausgegangen. Im Zusammenhang mit einer Kanalisierung beim mechanischen Verhalten ist auf den Aspekt der Systemänderung bereits eingegangen. Ebenso stellen Auf- und Umlöseprozesse eine Änderung im Systemverhalten dar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

In /GRS 2000/ sind für eine gestörte Entwicklung des Endlagers fluiddynamische Prozesse zum Stofftransport mit dem Hintergrund untersucht worden, ob nicht die Ablagerung von Salzen im Bereich einer Verdampfungszone zu einer Schutzschicht um die Behälter führt. Es

wurde eine signifikante Abhängigkeit im Systemverhalten von den Randbedingungen festgestellt und auch in der Komplexität der Abhängigkeiten konnten nicht alle Effekte erklärt werden. Nach /GRS 2000/ ist das Maß an Konservativität, das sich daraus ergibt, dass zusätzliche Versatzbarrieren unberücksichtigt bleiben, als vertretbar angesehen. Vor dem Hintergrund einer Kanalbildung durch Auslaugung sollte dieser Punkt jedoch weiter betrachtet werden.

Kopplungseffekte

Im Vorangegangenen ist gezeigt worden, dass trotz separater Betrachtung einzelner Einflussbereiche eine erhebliche Abhängigkeit zwischen den Einflussgrößen besteht. Wenn auch in einzelnen Bereichen ein guter Kenntnisstand erzielt ist und zwischen einzelnen Bereichen die Kopplung erfolgreich vollzogen wurde, stellt die vollständige Kopplung aller Phänomene untereinander noch ein Aufgabengebiet dar. Eine Bewertung der Kopplungsphänomene im Hinblick auf ihre Auswirkung in den Sicherheitsnachweisen ist noch nicht erfolgt.

2.4 Zusammenfassung

Die Verwendung von Salzgrus als Versatzmaterial stellt den Einsatz wirtsgesteinseigenen Materials dar. Mit diesem natürlich ablaufenden Prozess kann prinzipiell ein einfaches und robustes System, das langfristig den sicheren Einschluss gewährleistet, geschaffen werden. Der Konvergenzprozess führt zunächst zu einem hydraulisch dichten Zustand, bevor sich der Versatz im weiteren Verlauf zum intakten Steinsalz umwandelt.

In-situ-Versuche und Analoga zeigen, dass das Ziel des sicheren Einschlusses erreichbar ist. Trotz der Einfachheit des Systems lassen sich die ablaufenden Prozesse zum momentanen Zeitpunkt jedoch noch nicht vollständig beschreiben. Ursache ist einerseits die Komplexität des Materialverhaltens, die im Ausgangszustand durch die Materialauswahl und die geometrischen Eigenschaften der Körnung sowie im Prozessverlauf durch den Einfluss von Konvergenzgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte als den wesentlichen Faktoren bestimmt wird, und andererseits die Streuung der Bedingungen im technisch realisierten System, wie z. B. die Kornverteilung und die Anfangsporosität.

Die Langzeitsicherheitsanalyse kann derzeit nicht in allen Teilen auf der Basis eines belastbaren Ansatzes von Salzgrus durchgeführt werden. Im Wesentlichen ist an dieser Stelle einerseits die Unbestimmtheit bzw. noch fehlende Prognosegüte im Übergangsbereich des Salzgrus zum festen Steinsalz zu nennen. Zudem ist zu klären, in wieweit lokale Effekte wie lokale Auflockerungen bis hin zur Kanalbildung berücksichtigt werden müssen. Ein quantitativer Nachweis ist an dieser Stelle nur eingeschränkt möglich. Insbesondere ist damit der Zeitpunkt als offen anzusehen, ab dem eine Barrierewirksamkeit des Versatzes angesetzt werden kann.

Für den Nachweis des sicheren Einschlusses ist insbesondere das Kompaktionsverhalten von Salzgrus zu berücksichtigen. Im Zusammenhang mit diesem Kompaktionsverhalten sind die folgenden Punkte zu ergänzen bzw. zu vervollständigen:

- das Kompaktionsverhalten, auch im Bereich geringer Porositäten, bei endlagerrelevanten Bedingungen, insbesondere hinsichtlich der (niedrigen) Kompaktionsgeschwindigkeit sowie Temperatur, Spannung, Feuchte und Kornverteilung,
- der Übergang von Salzgrus zum Verhalten von Steinsalz unter endlagerrelevanten Bedingungen,
- Erweiterung der Datenbasis für den für die Bohrlochlagerung vorgesehenen Salzgrus, besonders unter Berücksichtigung von Feuchte.

3 Bohrlochverschluss

Im Bericht zum Arbeitspaket AP1.2 des ISIBEL-Projekts /DBE 2008a/ wird das Endlagerkonzept (beinhaltet Grubengebäude, Mehrbarrierenkonzept, Verschlusskonzepte) für den Referenzstandort beschrieben. Entsprechend dem derzeitigen Stand der Planung werden dabei 2 Einlagerungskonzepte betrachtet:

Variante 1 - Strecken- und Bohrlochlagerung

- Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in POLLUX-Behältern in horizontalen Strecken
- Endlagerung von HAW-Kokillen in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Teufe)
- Endlagerung von CSD-C-Kokillen mit wärmeentwickelndem MAW in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Teufe)

Variante 2 - Reine Bohrlochlagerung

- Endlagerung von ausgedienten Brennelementen in Brennstabkokillen (BSK 3) in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Teufe)
- Endlagerung von HAW-Kokillen in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Teufe)
- Endlagerung von CSD-C-Kokillen mit wärmeentwickelndem MAW in vertikalen Bohrlöchern (bis 300 m Teufe)

Es sind also Bohrlochverschlüsse für Bohrlöcher, in denen HAW- bzw. CSD-C-Kokillen (Variante 1 und 2) oder BSK 3 (nur Variante 2) endgelagert werden, zu untersuchen. Vorgesehen ist die Ausführung der Bohrlochverschlüsse als lose Salzgrusschüttung.

Im HAW-Projekt /EUR 1995/ und im Projekt DEBORA /EUR 1996, GRS 1999d/ wurde für die Einlagerung von HAW-Kokillen in Bohrlöchern bis 300 m Teufe die Frage eines geeigneten Bohrlochverschlusses bereits untersucht. Insbesondere im Projekt DEBORA wurden theoretische Untersuchungen und Berechnungen zu den zu betrachtenden Einwirkungen und zu erfüllenden Anforderungen durchgeführt. Zudem wurde ein in situ-Versuch geplant und durchgeführt. Im DEBORA-Projekt wurde die Bohrlochverschluss-Thematik für ein HAW-Endlager auf Basis des damaligen Kenntnisstands ausführlich untersucht, neue Untersuchungen liegen jedoch nur für kleinere Teilaspekte vor. Die Ergebnisse des DEBORA-Projekts bilden deshalb die Grundlage der nachfolgenden Ausführungen.

3.1 Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an einen Bohrlochverschluss ergeben sich aus seiner Funktion zur Einhaltung der Schutzziele im Gesamtsicherheitskonzept im Zusammenhang mit den anderen Barrieren. Wie in der Einleitung dargestellt, sind sowohl konventionelle als auch radiologische Schutzziele zu betrachten.

Aus den Schutzzielen ergeben sich für den Bohrlochverschluss folgende funktionale Anforderungen:

- Begrenzung der Dosisleistung gemäß Strahlenschutzverordnung (Betriebsphase)
- Dichtheit gegenüber Lösung (Nachbetriebsphase, Zeitrahmen abhängig von anderen Barrieren)

Zu beachten ist, dass dem Bohrlochverschluss zum derzeitigen Planungsstand eine besondere Rolle im Sicherheitskonzept zukommt. Der Bohrlochverschluss soll langfristig gemeinsam mit dem Salzgrusversatz im Ringspalt der Bohrlöcher den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten. Die Dichtheit gegen Lösung muss dazu spätestens zum Ende der planmäßigen Lebensdauer der Strecken- und Schachtverschlüsse erreicht werden und bis zum Ende des Betrachtungszeitraums erhalten bleiben.

Weitere Anforderungen an einen Bohrlochverschluss ergeben sich aus den zu erwartenden Einwirkungen, die die o. g. Funktionen beeinflussen und ggf. beeinträchtigen können. Hierzu sind in den unterschiedlichen Phasen des Endlagers (Betriebsphase, Nachbetriebsphase: transient, monoton, stationär) sowohl die ungestörte als auch für die gestörte Entwicklung zu betrachten.

Ein Endlager im Salz ist bei ungestörter Entwicklung und in der Betriebsphase der Einlagerungsbereich abgesehen von durch Versatz eingebrachter Feuchtigkeit, Wetterfeuchte und einer geringfügigen Restfeuchte im Salz trocken. In der Nachbetriebsphase nicht auszuschließende Zutritte aus dem Deckgebirge können nur über die Strecken- und Schachtverschlüsse in den Einlagerungsbereich und damit zu den Abfällen gelangen.

Nicht auszuschließen sind zudem begrenzte Lösungseinschlüsse im Steinsalz, aus denen Lösung an die Abfälle gelangen kann. Das Antreffen von größeren Lösungseinschlüssen im Einlagerungsbereich wird als gering wahrscheinlich eingeschätzt.

Die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle führt in der Betriebsphase und in der transienten Nachbetriebsphase zu einer deutlichen Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich. Auslegungsbedingt beträgt die maximale Temperatur im Steinsalz 200 °C.

Hinsichtlich der Einwirkungen auf den Bohrlochverschluss ist damit zunächst der Einfluss der Temperaturerhöhung (z. B. thermisch induzierte Spannungen, erhöhte Konvergenz) zu berücksichtigen. Weitere mechanische Einwirkungen ergeben sich aus den Auffahrungen. Zudem ist die Gasentwicklung im Bohrloch und der sich dadurch möglicherweise aufbauende Gasdruck zu betrachten sowie die Langzeitstabilität des Bohrlochverschlusses gegenüber chemischen Einwirkungen (korrosive Fluide) nachzuweisen. Da die Gasdruckentwicklung im Bohrloch sowohl in Größe als auch Zeitrahmen abhängig vom Lösungsangebot ist, ist hier zu unterscheiden, ob zur Gasbildung nur die Restfeuchte in Steinsalz und ggf. Versatz im Bohrloch (ungestörte Entwicklung) oder Lösung aus einem begrenzten Lösungseinschluss (gestörte Entwicklung) zur Verfügung steht. Im ungestörten Fall ist die zur Verfügung stehende Lösungsmenge in wenigen Jahren, also deutlich vor Abschluss der transienten Phase verbraucht. Der Bohrlochverschluss ist gegen den anstehenden Gasdruck oder für die Zeit

der Gasentwicklung gasdurchlässig auszulegen. Berechnungen für den Fall der ungestörten Entwicklung in /EUR 1996/ ergaben je nach angesetzter Permeabilität des Bohrlochverschlusses (10^{-15} - 10^{-19} m²), der Auflockerungszone (10^{-16} - 10^{-20} m²), des Salzgrusversatzes im Ringspalt (10^{-12} , 10^{-18} m² sowie zeitabhängige Verringerung der Permeabilität) sowie des ungestörten Steinsalzes (0, 10^{-21} und 10^{-22} m²) einen Gasdruck von maximal ca. 3 MPa. Unter Annahme eines vollständigen Stoffumsatzes durch Korrosion der Behälter sowie eines dichten Einschlusses wird von /SCHULZE 2007/ für die Einlagerung von HAW-Kokillen ein Gasdruck von 20 MPa im Bohrloch angegeben. Zu beachten ist, dass die Größe dieser Einwirkung natürlich nicht nur von den o. g. Permeabilitäten, sondern insbesondere von der Gasproduktion abhängt. Ggf. können technische Maßnahmen zur Minimierung der Gasproduktion beitragen.

Je nach planmäßiger Lebensdauer der Strecken- bzw. Schachtverschlüsse ist ein Lösungsdruck infolge anstehender Lösung zu berücksichtigen.

Für den Fall der ungestörten Entwicklung wird von der Integrität der Behälter während der Betriebsphase ausgegangen. Ein Behälterversagen in der Betriebsphase könnte dazu führen, dass radioaktive Gase aus defekten Brennelementen aus dem Bohrloch in die Einlagerungsstrecke gelangen. Diese könnten jedoch durch saugende Bewetterung in der Einlagerungsstrecke (auch nach Einbau des endgültigen Bohrlochverschlusses) gefasst und abgeführt werden. Eine zusätzliche Anforderung an den Bohrlochverschluss ergibt sich dadurch also nicht.

Die derzeit festgelegten funktionalen Anforderungen an einen Bohrlochverschluss werden in /DBE 2008a/ wie folgt angegeben:

In der Betriebsphase:

1. Begrenzung der Dosisleistung gemäß Strahlenschutzverordnung
2. Hinreichend hohe Gaspermeabilität (Entweichen von potentiellen Korrosionsprodukten)
3. Mechanische und chemische Beständigkeit gegenüber Wärmeeintrag von Endlagergebünden
4. Zügiges Kompaktieren durch auflaufendes Gebirge

In der Nachbetriebsphase:

5. Dichtfunktion: Hinreichend niedrige Permeabilität

Die hier genannten Anforderungen entsprechen den zuvor erläuterten und wurden bereits in im Rahmen des DEBORA-Projektes /EUR 1996/ zusammengestellt. 1. und 5. sind direkte funktionale Anforderungen an einen Bohrlochverschluss, während 2. – 3. sich aus den zu erwartenden Einwirkungen ergeben.

Auch 4. ergibt sich aus den zu erwartenden Einwirkungen, da hier eine anfänglich hohe Gaspermeabilität zum Vermeiden unzulässiger Gasdrücke gewählt wird. Da langfristig gemäß 5. jedoch eine Dichtfunktion gefordert ist, ergibt sich folglich die Verwendung eines

kompaktierenden Materials und damit wiederum eine Anforderung („zügiges Kompaktieren“) an dieses Material. Die Anforderung an die anfänglich hohe Gasdurchlässigkeit ergab sich durch Auslegungsberechnungen /EUR 1996/, in deren Ergebnis bei weniger gasdurchlässigen Verschlüssen unzulässige Gasdrücke und damit eine Schädigung des Verschlusses und des umgebenden Gebirges oder ein unkontrolliertes Entweichen von Gas in die Einlagerungsstrecke nicht ausgeschlossen werden konnte. Im Zusammenhang hierzu ist noch detaillierter zu untersuchen, ob durch die Gasproduktion und den Gasdruckaufbau ein Gasfrac und ein unkontrolliertes Entweichen von Gas entstehen kann. Kommt es nach einem Entweichen von Gas zu einem Gasdruckabfall, können sich entstandene Risse auch wieder schließen. Dies wird jedoch, zurzeit wie z. B. in /POPP et al. 2007/ und /SCHULZE 2007/ dargestellt, noch untersucht.

Zu beachten ist, dass „zügiges Kompaktieren“ keine allgemeingültige funktionale Anforderung sondern eine geforderte Materialeigenschaft für einen Bohrlochverschluss darstellt. Für den in /DBE 2008a/ gewählten Verschluss aus Salzgrus ist jedoch eine zügige Kompaktion erforderlich, um in der Nachbetriebsphase (monoton/stationär) eine ausreichende Dichtheit erreichen zu können.

Die mechanische und chemische Beständigkeit ist für alle zu erwartenden Einwirkungen zu gewährleisten. Unter mechanischer Beständigkeit ist hier zu verstehen, dass die funktionalen Anforderungen unter den zu erwartenden mechanischen Einwirkungen erfüllt werden. Hierbei muss natürlich der Wärmeeintrag aus Endlagergebinden berücksichtigt werden. Allerdings müssen auch weitere Einwirkungen wie z. B. anstehende Lösung, die zu Korrosion der Gebinde führen kann, berücksichtigt werden.

Im Folgenden wird auf Möglichkeiten zur Quantifizierung der funktionalen Anforderungen und die dazu erforderlichen Kenntnisse eingegangen. In Untersuchungen wie zum Beispiel dem DEBORA-Projekt /EUR 1996/ wurden bereits Berechnungen zur Quantifizierung einiger dieser Anforderungen durchgeführt. Hierbei sind aber die aus dem jeweils betrachteten Endlagerkonzept abgeleiteten Randbedingungen von großer Bedeutung. Zum Teil beruhen frühere Untersuchungen wie in /ICT 1991/ auf ersten Abschätzungen und sind in manchen Fällen sehr konservativ. Eine Angabe der Ergebnisse ist deshalb nur sinnvoll, wenn gleichzeitig die in den Untersuchungen zugrunde gelegten Randbedingungen, insbesondere

- betrachtete Gebinde und zugehörige Korrosionsraten sowie Inventar
- Zwischenlagerzeiten (da durch diese die Temperaturentwicklung mit bestimmt wird)
- Bohrlochlängen und Durchmesser
- Annahmen zur Auflockerungszone
- Annahmen zur Feuchte von Versatz und Steinsalz
- Annahmen zur Permeabilität des Bohrlochverschlusses

genannt werden. Deshalb wird an dieser Stelle auf Zahlenangaben bezüglich der im Projekt DEBORA ermittelten Anforderungen und Einwirkungen verzichtet.

Zu beachten ist zudem, dass eine Einlagerung der BSK 3 in Bohrlöchern bisher nur hinsichtlich der mechanischen Stabilität der BSK 3 untersucht wurde. Quantifizierte Anforderungen

für den Bohrlochverschluss wie für die HAW-Kokille im Projekt DEBORA wurden noch nicht abgeleitet.

Begrenzung der Dosisleistung

Die einzuhaltenden Grenzwerte und weitere Vorgaben sind in der Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ (siehe z. B. § 5 Dosisbegrenzung und § 6 Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung) festgelegt. Aus den einzuhaltenden Grenzwerten kann für das jeweilige Einlagerungskonzept (d. h. bei bekanntem Verschlussmaterial) berechnet werden, welche Verschlusslänge eine ausreichende Abschirmwirkung gegen Direktstrahlung gewährleistet. Im planmäßigen Fall (Integrität der Behälter ist während der Betriebsphase gegeben) ist dies ausreichend. Im Falle einer Zerstörung von Kokillen können ggf. radioaktive Gase aus dem Bohrloch in die Einlagerungsstrecke gelangen. Diese können durch saugende Bewetterung in der Einlagerungsstrecke im Bereich des Bohrlochkellers gefasst und abgeführt werden können.

Dichtheit gegenüber Lösung

Konkrete Vorgaben, in welchem Zeitraum welcher hydraulischer Widerstand und damit die erforderliche Dichtheit zu gewährleisten ist, bestehen bisher nicht. Im in /DBE 2008a/ dargestellten Referenzkonzept wird ein Bohrlochverschluss aus Salzgrus vorgesehen. Dieser soll nach Abschluss der Versatzkompaktion eine möglichst dem unverritzten Steinsalz entsprechende Permeabilität aufweisen. Ob höhere Permeabilitäten ausreichend zum Nachweis des sicheren Einschlusses sind, wurde bisher nicht systematisch untersucht. Hierzu wären im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse Parameterstudien durchzuführen, aus denen Anforderungen an die Bohrlochverschlüsse abgeleitet werden könnten. Erste indikative Berechnung wurden in /GRS 2008/ durchgeführt, allerdings wurden hier noch keine Varianten hinsichtlich der Permeabilität der Bohrlochverschlüsse untersucht.

Kein Aufbau eines unzulässigen Gasdrucks sowie kein unkontrolliertes Entweichen von Gas

Im Rahmen diverser Untersuchungen wurde für die Einlagerung unterschiedlicher Gebinde die Gasdruckentwicklung untersucht (z. B. in /EUR 1996/ und /ICT 1991/). Hierbei wurden Parametervarianten für die Permeabilität des Verschlusses, des Versatzes im Ringraum sowie der Auflockerungszone betrachtet. Zudem hängt der entstehende Gasdruck von den eingelagerten Gebinden, der Temperatur (und damit von der Zwischenlagerzeit), der Gebirgskonvergenz und vom vorhandenen Lösungs- bzw. Feuchteangebot sowie der damit verbundenen Korrosion ab. Im Fall der ungestörten Entwicklung steht für Korrosionsprozesse lediglich die im Steinsalz und Versatz vorhandene Restfeuchte zur Verfügung, während für den Fall der gestörten Entwicklung Lösungszutritte aus einem Lösungseinschluss zu betrachten sind.

Beständigkeit gegenüber Wärmeeintrag von Endlagergebinden

Der Bohrlochverschluss ist gegen die mechanischen Einwirkungen auszulegen. Diese ergeben sich durch den Gebirgsdruck, den Gasdruck und den Lösungsdruck. Zu berücksichtigen

ist dabei die Temperaturentwicklung durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle. Untersuchungen zu Einwirkungen aus Gebirgsdruck und Gasdruck wurden bereits im Rahmen des DEBORA-Projekts /EUR 1996/ für die Einlagerung von HAW-Kokillen in 300 m Bohrlöchern durchgeführt. Der maximal von außen anstehende Lösungsdruck lässt sich aus der Teufe und der Dichte der anstehenden Lösung bestimmen. Dieser Lastfall ist hinsichtlich des Nachweiszeitraums abhängig von der planmäßigen Lebensdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse. Zudem ist ein Zutritt aus Lösungseinschlüssen zu berücksichtigen. Hier ergibt sich rechnerisch ein Lösungsdruck von innen von bis zu 20 MPa /GRS 2008/.

Die maximalen Temperaturen im Steinsalz liegen auslegungsbedingt bei 200 °C, so dass eine Temperaturbeständigkeit des Verschlusses bis 200 °C sicher ausreichend ist. Hinsichtlich anstehender Lösungen ist sowohl bei Zutritten über Schacht und Strecken als auch aus Lösungseinschlüssen von an NaCl-gesättigten Lösungen auszugehen.

Weitere Anforderungen

Je nach Endlagerkonzept können sich neben der Anforderung der Begrenzung der Dosisleistung auch andere betriebliche Anforderungen wie z. B. Überfahrbarkeit an einen Bohrlochverschluss ergeben. In /DBE 2008a/ werden für das Referenzkonzept keine betrieblichen Anforderungen angegeben.

Im Rahmen der Nachweisführung ist eine Quantifizierung der Anforderungen erforderlich. Hierzu sollten insbesondere für die BSK 3, aber auch für die Einlagerung von HAW- und CSD-C-Kokillen, weitere Untersuchungen unter Berücksichtigung des aktuellen Referenzkonzepts durchgeführt werden. Eine Bewertung des Kenntnisstands zur Quantifizierung der Anforderungen wird in Kapitel 3.3 vorgenommen.

3.2 Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen für einen Bohrlochverschluss

In /DBE 2008a/ wird für das Referenzkonzept als Bohrlochverschluss der in Abbildung 3-1 dargestellte Entwurf angegeben. Zum Ende der Nutzungsphase wird das Bohrloch oberhalb der zuletzt eingelagerten Kokille zunächst über eine Länge von ca. 6 m mit Salzgrus verfüllt. Im Endlagerbetrieb erfolgt der Einbau unmittelbar nach Einlagerung der letzten Kokille in einem Bohrloch. Das Einbringen kann mittels Einlagerungsvorrichtung/Sondergefäß durch die Bohrlachschleuse hindurch erfolgen. Diese Technologie ist jedoch noch nicht erprobt.

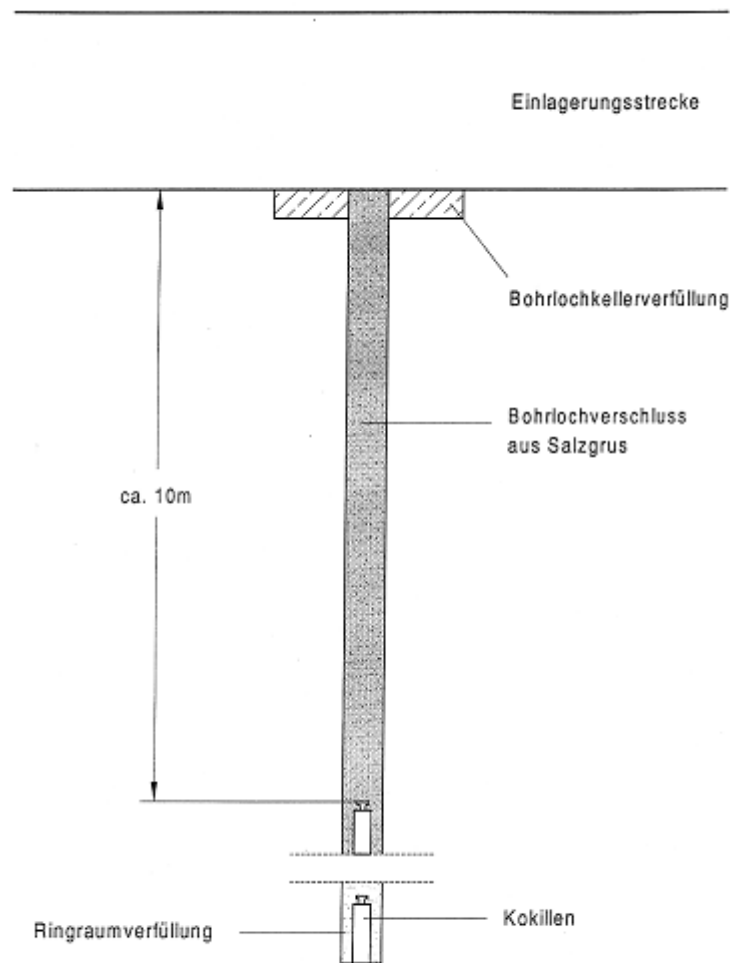


Abbildung 3-1: Bohrlochverschluss aus Salzgrus

Grundlage für diesen Entwurf ist die Überlegung, dass der eingebrachte Salzgrus durch das auflaufende Gebirge kompaktiert wird und mittel- bis langfristig die Eigenschaften von Steinsalz annehmen soll. Aufgrund der geringen Permeabilität wäre dann bei gleichzeitiger Verheilung der Auflockerungszone der sichere Einschluss der Abfälle gewährleistet.

Die Anforderung hinsichtlich der Begrenzung der Dosisleistung wird mit dem vorliegenden Entwurf erfüllt, wenn lediglich eine Abschirmung gegen Direktstrahlung erforderlich ist. Im aktuellen Konzept wird aufgrund früherer Abschätzungen für HAW-Kokillen von einer ausreichenden Abschirmwirkung durch ca. 6 m Salzgrus oberhalb der zuletzt eingelagerten Kokille ausgegangen. Es ist davon auszugehen, dass dies auch für den Fall der Einlagerung der BSK 3 ausreichend ist, wenn die Integrität des Behälters während der Betriebsphase gewährleistet ist. Dies ist jedoch noch zu prüfen.

Inwieweit der Salzgrus und in welchem Zeitraum hinreichend kompaktiert wird, um einen ausreichenden hydraulischen Widerstand zu gewährleisten, kann bis jetzt nicht abschließend beurteilt werden. Die Problematik der Beschreibung der Salzgruskompaktion insbesondere für kleine Porositäten wurde bereits im Kapitel 2 „Versatz“ auch in Bezug auf das Projekt DEBORA und damit in Bezug auf den hier dargestellten Bohrlochverschluss genauer betrachtet. Zunächst sind die vorhandenen Stoffmodelle über gezielte Laboruntersuchungen für

sehr geringe Porositäten zu überprüfen, ggf. weiter zu entwickeln und die in den Stoffmodellen verwendeten Parameter zu kalibrieren. Die Übertragbarkeit der Ansätze auf reale Bedingungen muss dann in einem In-situ Experiment nachgewiesen werden. Im Projekt RE-POPERM soll hierzu ermittelt werden, welche In-situ-Versuche zur Belegung der bisher nicht untersuchten/nachgewiesenen Porositätsbereiche und damit ggf. zum Nachweis des sicheren Einschlusses geeignet sind.

Das Gesamtziel des in zwei Phasen unterteilten Vorhabens besteht darin, die vorhandenen Stoffmodelle für trockenen und feuchten Salzgrusversatz über gezielte Laboruntersuchungen für sehr geringe Porositäten zu überprüfen, ggf. weiter zu entwickeln und die in den Stoffmodellen verwendeten Parameter zu kalibrieren. Die Übertragbarkeit der Ansätze auf reale Bedingungen soll in einem In-situ Experiment nachgewiesen werden.

Bezüglich der Gasentwicklung und dem daraus resultierenden Gasdruck-Aufbau wurden in /EUR 1996/ Berechnungen für die Einlagerung von HAW-Kokillen in einem 300 m Bohrloch unter Annahme einer ungestörten Entwicklung des Endlagers durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass nur ein geringer Gasdruck von unter 1 MPa entsteht und das entweichende Gas zu keiner Gefährdung führt. Es ist davon auszugehen, dass diese Aussagen auch auf die Einlagerung von BSK 3 übertragbar sind. Dies ist jedoch noch durchzuführen.

Insgesamt ist festzuhalten, dass mit dem oben dargestellten Bohrlochverschluss ein Entwurf vorliegt, der die funktionalen Anforderungen nur unter der Voraussetzung einer hinreichenden Versatzkompaktion erfüllt. Eine abschließende Bewertung dieses Barrierendesigns ist aufgrund der noch nicht ausreichenden Kenntnisse hinsichtlich der Salzgruskompaktion jedoch nicht möglich. Die Einwirkung „Gasdruck“ wurde bisher nur für die frühe Betriebsphase, also hohe Permeabilität des Verschlusses untersucht. Der Fall einer später (nach Abschluss der Kompaktion) eintretenden Gasdruckentwicklung wurde bisher nicht untersucht.

Eine mögliche Design-Änderung ist die Verwendung von Steinsalz-Formstücken die passgenau das Bohrloch verschließen, ggf. in Kombination mit zuvor eingebrachtem Salzgrus bzw. Salzgrus im Ringspalt. Hiermit könnte ein Einschluss der Abfälle schneller als mit der bisherigen Verschlussvariante erreicht werden. Durch Salzgrus im Ringspalt könnte eine für den Beginn der Nachbetriebsphase ausreichende Gasdurchlässigkeit erzielt werden. Zu prüfen ist dann wiederum der Fall einer nach Abschluss der Kompaktion eintretenden Gasdruckentwicklung.

3.3 Nachweisführung

Der Nachweis der ausreichenden Abschirmwirkung kann bei Kenntnis der Dosisleistung der eingelagerten Kokillen und der Halbwertsdicke von Salzgrus leicht rechnerisch geführt werden und wird hier nicht weiter untersucht. Zu untersuchen ist noch, ob zusätzliche Maßnahmen für den Fall des Integritätsverlusts von Behältern vorzusehen sind.

In /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/ ist die Nachweisführung für den Integritätsnachweis geotechnischer Barrieren dargestellt. Der Nachweis gliedert sich demnach in den Nachweis der

aus der Langzeitsicherheitsanalyse vorgegebenen Anforderungen und den Nachweis der Bauwerksintegrität. Hinsichtlich des hydraulischen Widerstands sind der Dichtkörper, die Kontaktzone und die Auflockerungszone zu betrachten. Der Nachweis der Bauwerksintegrität umfasst den Nachweis der Rissbeschränkung, der in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit umfasst. Des Weiteren ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit bzw. der Langzeitstabilität zu führen.

Dieses Nachweiskonzept ist für das vorgestellte Design nur bedingt übertragbar. Eine Möglichkeit der Übertragung besteht darin nachzuweisen, dass unter Berücksichtigung der zu betrachtenden Einwirkungen durch die Kompaktion des Salzgrus ein hinreichend geringe Porosität und Permeabilität erreicht wird. Dann kann für den Bohrlochverschluss bestehend aus Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstands geführt werden.

Der Nachweis einer ausreichenden Salzgruskompaktion ist jedoch bisher nicht erbracht. Insbesondere für das Verhalten bei kleinen Porositäten und Permeabilitäten ist eine Prognose des Kompaktionsverhaltens mit großen Unsicherheiten verbunden. Diese Problematik wird im Kapitel 2 „Versatz“ genauer beschrieben. Hinsichtlich der Beschreibung der Verheilung der Auflockerungszone besteht ggf. ebenso noch Forschungsbedarf. Dies hängt jedoch davon ab, ab wann für den Bohrlochverschluss welcher hydraulische Widerstand nachgewiesen werden muss.

Im Folgenden sind die zu betrachtenden Einwirkungen kurz zusammengestellt.

Gebirgsdruck

Der Gebirgsdruck führt im Fall des vorgestellten Entwurfs in der transienten und monotonen Nachbetriebsphase zur Versatzkompaktion. Der Teufendruck auf der Einlagerungssohle beträgt für den Referenzstandort ca. 19 MPa.

Gasdruck

Bisherige Ergebnisse ergeben einen Gasdruck im Bohrloch von 1 MPa - 20 MPa. Der Gasdruck ist in erster Linie abhängig von der vorhandenen Feuchte bzw. der vorhandenen Lösungsmenge, der Permeabilität des Verschlusses und der Auflockerungszone, Korrosionsraten der Endlagergebäude sowie der Temperatur. Für das Referenzkonzept ist diese Einwirkung noch genauer zu quantifizieren. Insbesondere ist hier die Einlagerung der BSK 3 sowie die Gasentwicklung für die gestörte Entwicklung „Lösungszutritt aus Lösungseinschluss“ zu untersuchen. Hierzu ist auch wieder eine genauere Kenntnis des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus erforderlich.

Lösungsdruck

Bei einem Zutritt über Schacht und Strecken ist je nach Dichte der anstehenden Lösung ein Lösungsdruck von ca. 10 MPa zu berücksichtigen. Bei einem Zutritt aus einem Lösungseinschluss ergibt sich in Berechnungen in /GRS 2008/ ein Lösungsdruck von bis zu ca. 20 MPa im Bohrloch. Dieser ist wieder abhängig von der Permeabilität des Verschlusses und der Auflockerungszone. Da in /GRS 2008/ für diesen Zeitpunkt eine vollständige Versatzkompaktion errechnet wurde, können die berechneten 20 MPa als plausible Schätzung für den Maximalwert betrachtet werden.

Chemische Einwirkungen (Temperatur, anstehende Lösung)

Auslegungsbedingt beträgt die Temperatur im Steinsalz und damit auch in Bereich des Bohrlochverschlusses maximal 200 °C. Ggf. anstehende Lösung ist immer eine gesättigte Salzlösung. Die Beständigkeit gegen diese Einwirkungen ist für den vorliegenden Entwurf gegeben.

Der Nachweis der Erfüllung der Anforderung „Ausreichende Kompaktion“ wurde bisher noch nicht systematisch geführt. Es erscheint jedoch plausibel, dass dies für den vorgestellten Entwurf möglich ist. Gleiches gilt für eine mögliche Design-Änderung durch Einsatz von Formstücken. Allerdings sei noch einmal betont, dass eine genauere Kenntnis der Salzgruskompaktion für die Nachweisführung sowohl für den Nachweis der Dichtheit als auch zur Quantifizierung der Einwirkungen erforderlich ist.

3.4 Zusammenfassung

Für das in /DBE 2008a/ beschriebene Endlagerkonzept sind Bohrlochverschlüsse für die Einlagerung von HAW-, CSD-C-Kokillen sowie BSK 3 in vertikalen Bohrlöchern bis zu 300 m Teufe erforderlich. Während der Betriebsphase dient der Bohrlochverschluss der Begrenzung der Dosisleistung gemäß Strahlenschutzverordnung. Die aktuelle Planung /DBE 2008a/ sieht vor, dass der Verschluss einerseits in der Betriebs- und früher (transienter) Nachbetriebsphase ausreichend gasdurchlässig sein soll um den Aufbau eines unzulässig hohen Gasdruckes im Bohrloch zu vermeiden, andererseits ist aber in der späteren (monotonen und stationären) Nachbetriebsphase eine ausreichende Dichtfunktion gegen Lösung erforderlich. Zudem wird die mechanische und chemische Beständigkeit gefordert.

Die Einwirkungen auf einen Bohrlochverschluss resultieren in erster Linie aus der Temperaturerhöhung (und daraus resultierenden Spannungen und Verformungen) durch die Einlagerung der HAW-Kokillen bzw. der BSK 3. Zu betrachten ist auch die Gasdruckentwicklung im Bohrloch. Durch die Restfeuchte des Steinsalzes und im Fall der gestörten Entwicklung bei Zutritten aus Lösungseinschlüssen können Korrosionsprodukte wie Wasserstoff entstehen. Durch eine anfänglich hohe Permeabilität des Verschlusses kann der Aufbau eines unzulässigen Gasdruckes vermieden werden. Da die funktionalen Anforderungen "gasdurchlässig zu frühen Zeiten" und "lösungs dicht zu späteren Zeiten" von einem kompaktierenden Material erfüllt werden und Salzgrus als arteigenes Material vorteilhaft ist,

wurde schon in früheren Konzepten /DBE 1998, DBE 1997/ ein Bohrlochverschluss aus Salzgrus vorgesehen. Inwieweit bei nur gering durchlässigen Bohrlochverschlüssen ein unzulässiger Gasdruck entstehen kann, ist noch detailliert zu prüfen. Zudem ist zu prüfen, inwieweit der Gasdruck durch technische Maßnahmen zu minimieren oder zu vermeiden ist.

Untersuchungen im Projekt DEBORA I /EUR 1996/ und DEBORA II /GRS 1999d/ ergaben, dass Salzgrus anderen möglichen Verschlussmaterialien vorzuziehen sei. Der Nachweis der vollständigen Kompaktion und damit das Erreichen der Permeabilität von Steinsalz nach Abschluss der monotonen Phase konnte bisher jedoch nicht erbracht werden.

Der Nachweis der Erfüllung der funktionalen Anforderungen durch den bisher vorgesehenen Bohrlochverschluss hängt in erster Linie von der ausreichenden Kenntnis der Salzgruskompaktion bei kleinen Porositäten ab. Dies ist eine der Fragestellungen, die im Projekt REPOPERM behandelt werden.

Hinsichtlich der zu betrachtenden Einwirkungen ist die Bohrlochlagerung der BSK 3 vertieft zu untersuchen. Die im Projekt DEBORA I /EUR 1996/ für die HAW-Kokille durchgeführten Untersuchungen sind für die BSK 3 zu überprüfen und ggf. anzupassen. Insbesondere ist im Zusammenhang mit der mechanischen Stabilität der BSK 3 zu prüfen, ob sich für die Betriebs- und frühe Nachbetriebsphase zusätzliche Anforderungen an den Bohrlochverschluss ergeben.

Als mögliche Designänderung könnte ein Bohrlochverschluss aus einem Steinsalz-Formstück (ggf. in Verbindung mit Salzgrus) vorgesehen werden, um eine Dichtfunktion zu einem früheren Zeitpunkt als bei einem Salzgrusverschluss zu erreichen. Diese Variante wurde bisher nicht näher betrachtet. Aufgrund der geringeren Anfangspermeabilität ist hier insbesondere die Gasdruckentwicklung im Bohrloch zu untersuchen. Als zukünftiger FuE-Bedarf sind also folgende Punkte festzuhalten:

Quantifizierung der Einwirkungen bei der Einlagerung der BSK 3

Für die BSK 3 wurde für die Nachbetriebsphase bisher nur die mechanische Stabilität untersucht. Der Nachweis der Behälterintegrität bei Einlagerung in 300 m tiefen Bohrlöchern konnte bisher nicht geführt werden. Es ist zu prüfen, ob sich hieraus zusätzliche Anforderungen an den Bohrlochverschluss ergeben. Hinsichtlich der Einwirkung ist insbesondere der entstehende Gasdruck zu quantifizieren.

Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei kleinen Porositäten

Die genauere Kenntnis des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei kleinen Porositäten und Permeabilitäten ist für die Nachweisführung, aber auch für die Quantifizierung von Einwirkungen sowie Anforderungen aus der Langzeitsicherheitsanalyse unerlässlich.

Quantifizierung der Gasdruckentwicklung im Bohrloch

Insbesondere die Einwirkung Gasdruck ist noch detailliert zu untersuchen. Dies ist aber erst bei genauerer Kenntnis bezüglich des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus sinnvoll. Gleichzeitig sollte auch geprüft werden, inwieweit der Gasdruck-Aufbau durch technische Maßnahmen minimiert werden kann.

Exemplarische Führung des Nachweises der Erfüllung der Anforderung „Ausreichende Kompaktion“

Für den Bohrlochverschluss wurde bisher der Nachweis der Erfüllung der Anforderungen darüber geführt, dass rechnerisch eine hinreichende Kompaktion des Salzgrus nachgewiesen sowie die Einwirkung „Gasdruck“ betrachtet wurde. Diese rechnerischen Untersuchungen müssen nach Abschluss der Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten wiederholt werden. Dies sollte in Form eines Nachweises, der analog zum Konzept des Integritätsnachweises durchgeführt wird, erfolgen.

Untersuchung der Designmodifikation "Formstück"

Wird der Bohrlochverschluss nicht als lose Salzgrusschüttung sondern als Kombination aus Salzformstück und Salzgrus im Ringspalt ausgeführt, ist ein sicherer Einschluss ggf. deutlich früher zu erreichen. Deshalb sollte diese Variante vertieft untersucht werden.

4 Streckenverschluss

Streckenverschlüsse stellen ein redundantes Dichtelement zu den Schachtverschlüssen dar. Ihre Aufgabe ist es, die Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers an noch genauer festzulegenden Positionen abzudichten.

4.1 Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen

Für die Zeiträume Betriebsphase und Nachbetriebsphase des Endlagers wurden in /DBE 1994b/ Anforderungen an Endlagerdammbauwerke definiert, die sich aus den örtlichen Gegebenheiten und den Belastungsszenarien ergeben. Diese sind für die betrachteten Zeitphasen des Endlagersystems - Betriebsphase und Nachbetriebsphase - unterschiedlich.

Betriebsphase:

Nach /DBE 1994b/ sind während der Betriebsphase nur Anforderungen hinsichtlich der Errichtung von Endlagerdammbauwerken von Bedeutung. Diese wurden folgendermaßen formuliert:

- *”... Die Endlagerdammbauwerke sind so frühzeitig vor Ablauf der Betriebsphase zu errichten, dass mit Beginn der Nachbetriebsphase ihre Dichtfunktion sichergestellt ist. Die Entscheidung, zu welchem Zeitpunkt der Betriebsphase die Endlagerdammbauwerke zu errichten sind, ist darüber hinaus an betriebliche Erfordernisse gebunden. Dazu zählen sicherheitstechnische, logistische sowie wirtschaftliche Fragestellungen.*
- *Die Endlagerdammbauwerke sind im Rückbau zu errichten und so zu planen, dass sie unter der Bedingung von nur einseitiger Zugänglichkeit hergestellt werden können.*
- *Die Endlagerdammbauwerke müssen in Form, Material, Aufbau etc. so hergestellt werden, dass sie den Anforderungen bezüglich ihrer Gebrauchsfähigkeit (technische Dichtigkeit) genügen. ...“*

Hinsichtlich des letzten aufgeführten Punktes ist die Anwendung qualitätsgesicherter Verfahren zu beachten.

Nachbetriebsphase:

In der Nachbetriebsphase ergeben sich die Anforderungen aus der erforderlichen Dichtfunktion der Endlagerdammbauwerke.

- standsicher gegen Gebirgsdruck
- standsicher gegen mögliche Störfallmedien / Gewährleistung der Tragfähigkeit bei nur einseitiger Belastung der Stirnflächen
- technisch dicht gegenüber Fluiden
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien gegenüber korrosiven Lösungen und Gasen
- einfache Wirkprinzipien der Bauteile
- erprobte Komponenten/Bauteile

- langfristig immer sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit (positiv überkritisches Verhalten)
- thermische Stabilität der verwendeten Baumaterialien (transiente Phase)

Die Anforderungen resultieren aus der Notwendigkeit der Einhaltung radiologischer und konventioneller Schutzziele (= direkte funktionale Anforderungen). Die konventionellen Schutzziele (z. B. „Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen“, „Schutz der Tagesoberfläche vor unzulässigen Setzungen“) werden in /DBE 2008b/ als abgedeckt betrachtet.

Die beidseitige Dichtwirkung gegenüber einem potentiellen Zutritt von Fluiden von übertage oder aus dem Endlager stellt eine direkte funktionale Anforderung dar, die sich aus der Notwendigkeit der Einhaltung des radiologischen Schutzzieles „Schutz der Biosphäre vor Radionukliden“ ergibt. Die übrigen Anforderungen werden aus den zu erwartenden Einwirkungen abgeleitet.

Spezifizierung der Anforderungen:

Die Gewährleistung der Funktion der Streckenverschlüsse ist über den gesamten Bemessungszeitraum (i.S.v. Lebensdauer) nachzuweisen. Die Dauer des Bemessungszeitraumes der Streckenverschlüsse ist hierbei vom Zeitpunkt des Erreichens einer hinreichenden Kompaktion des Salzgrusversatzes abhängig, welcher den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleisten soll. Für die im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung /DBE 2008a/ betrachteten Einlagerungskonzepte der gemeinsamen Bohrloch- und Streckenlagerung (Variante 1) sowie der reinen Bohrlochlagerung (Variante 2) lassen sich momentan keine hinreichend genauen Aussagen zum Zeitpunkt des Erreichens des sicheren Einschlusses und somit auch zum Bemessungszeitraum der Streckenverschlüsse treffen. Der Bemessungszeitraum ist daher offen und wird unter dem gegenwärtigen Kenntnisstand dem gesamten Nachweiszeitraum gleichgesetzt. Unterschiedliche funktionale Anforderungen an die Streckenverschlüsse lassen sich aus den betrachteten Varianten nicht ableiten. Da jedoch bei Variante 2 infolge der schnelleren Versatzkompaktion von einem früheren Zeitpunktes des sicheren Einschlusses ausgegangen werden kann, differieren die entsprechenden, noch zu spezifizierenden Bemessungszeiträume für Streckenverschlüsse.

Die o. g. Anforderungen gelten für die transiente und monotone Phase gleichermaßen. Da nach Ende der monotonen Phase die Versatzkompaktion abgeschlossen ist und ein sicherer Einschluss vorliegt, erwachsen aus der sich anschließenden stationären Phase (= stabiler Endzustand) für die ungestörte Entwicklung keine Anforderungen an die Dichtwirkung des Streckenverschlusses. Jedoch ist hierbei die Aufsättigung der ggf. aus dem Deckgebirge zutretenden Wässer zu gewährleisten (z. B. im mit Salzgrus versetzten Infrastrukturbereich zwischen unterer Füllsäule und Streckenverschluss), um ein Vordringen der Lösungen infolge Ablaugens des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu den – zu diesem Zeitpunkt sicher eingeschlossenen Abfällen zu verhindern.

Im Falle der gestörten Endlagerentwicklung (kein sicherer Einschluss / Laugenzutritt an die Abfälle) sind durch die hydraulischen Widerstände von Strecken- und Schachtverschlüssen die Volumenströme an kontaminierter Lauge derart zu minimieren, dass die radiologischen

Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden. Nach /DBE 1994b/ werden in der Nachbetriebsphase die zu unterstellenden endlagerseitigen Fluiddrücke durch folgende abdeckende Szenarien bestimmt:

- Zutritt von Wässern mit unbegrenzten Zuflussvolumina in den Einlagerungshorizont: hydrostatischer Teufendruck (Wegsamkeit bis zur Biosphäre).
- Zutritt von Wässern mit begrenzten Zuflussvolumina (sog. Lösungseinschlüsse) in den Einlagerungshorizont: Infolge auflaufender Konvergenz und Abnahme des für die Aufnahme der Fluide zur Verfügung stehenden Resthohlraumvolumens ist konservativ als maximaler Fluiddruck der petrostatische Teufendruck zu unterstellen (Wiederherstellung des primären Gebirgsspannungszustandes).

Der maximale biosphärenseitige Fluiddruck - also aus Richtung des Schachtes - entspricht daher dem hydrostatischen Laugendruck /WAGNER 2005/. Als maximaler endlagerseitiger Druck - in Richtung des Schachtes - auf den Streckenverschluss ist (hypothetisch für impermeable Verschlüsse) ein Fluiddruck bis maximal zur Größe des petrostatischen Druckes infolge auflaufender Konvergenz möglich /WAGNER 2005/.

Die Streckenverschlüsse sind außerdem tragsicher gegenüber dem anstehenden Gebirgsdruck auszulegen. Dieser ergibt sich aus dem petrostatischen Teufendruck unter Berücksichtigung von möglichen Spannungsumlagerungen /DBE 1994b/.

Die Anforderungen an ein Abdichtungsbauwerk am Referenzstandort in ca. 870 m Teufe wurden in /DBE 1994b/ folgendermaßen spezifiziert:

- Der Gebirgsdruck wurde für eine mittlere Deckgebirgsdichte von 2160 kg/m³ mit 19 MPa (= petrostatischer Druck) bestimmt, wobei infolge des steifen Einschlusses eine temporär höhere Belastung auftreten kann.
- Maximale Fluiddrücke:
hydrostatischer Druck: 11 MPa (Betriebsphase, schneller Druckaufbau möglich, da offenes System; Ansatz der Dichte von Q-Lauge mit 1,3 kg/l)
- petrostatischer Druck: 19 MPa (Nachbetriebsphase; langsamer Druckaufbau, da geschlossenes System)
- Zu erwartende Temperaturen am Dammstandort:

<u>Jahre Standzeit</u>	<u>Temperatur</u>
20	46°C
50	56°C
100	67°C
200	76°C
500	83°C
1000	81°C

4.2 Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen

Im Folgenden werden verschiedene Konzepte und Planungen zu Streckenverschlüssen von sowohl HAW- als auch Endlagern für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle im Salz kurz vorgestellt. Im Anschluss daran findet sich eine Zusammenstellung ausgewählter bereits errichteter Versuchsdämme (Hope und Sondershausen) sowie von Dammbauwerken des Kali- bzw. Steinsalzbergbaus, deren Errichtung im Rahmen des Abwerfens von Feldesteilen und / oder infolge von Laugeneinbrüchen notwendig wurde.

Nach /DBE 1999b/ ist diesen letztgenannten historischen Dämmen des Kali- bzw. Steinsalzbergbaus gemein, dass:

- alle dichten Dammbauwerke im Steinsalz liegen (→ Vermeidung von Umlösevorgängen).
- nur ein sehr langer Damm von Anfang an dicht war (Leopoldshall, Abschnitt 4.2.10 , → Reduktion des Einflusses lokaler Umläufigkeiten, Reduktion des hydraulischen Gradienten).
- die Dichtheit aller kürzeren Dämme nachträglich durch Injektionen erzeugt wurde, wobei der Injektionsdruck der injizierten Suspension ungefähr den Teufendruck erreichte (→ Schließen von Rissen, Erfüllung des Fluidkriteriums).

Ferner werden von /KUDLER et al. 2006/ noch weitere Grundregeln für den Bau von Streckenverschlüssen genannt:

- Standortwahl im geringdurchlässigen Gebirge; auf Inhomogenitäten (insbes. aufgeschlossene streckenparallele Schichtfolgen) ist zu achten.
- Bemessung der Dichtelemente nach der Gebirgsdurchlässigkeit im konturnahen Bereich; Bei bekannter Gebirgspermeabilität können anhand des maximal zulässigen Volumenstroms Aussagen zur erforderlichen Länge und Permeabilität des Dichtelementes getroffen werden. Falls die Permeabilität des anstehenden Gebirges dies nicht zulässt, sind Maßnahmen zur Gebirgsvergütungen / Abdichtung vorzusehen. Auf geomechanisch bedingte höhere Gebirgspermeabilitäten in Sohle und Firste sowie deren zeitliche Entwicklung ist zu achten.
- Beachtung der geochemischen Randbedingungen, insbes. der Zusammensetzung der zuzitenden Lösung hinsichtlich der Korrosion verwendeter Baustoffe,
- gebirgsschonender Nachschnitt der Gebirgskontur; Für bestimmte Konzepte wird zusätzlich ein glatter Nachschnitt erforderlich (z. B. Einbau von Bentonitformsteinen),
- Trennung von Dichtelement und statischem Widerlager (wenn möglich),
- Redundante und diversitäre Auslegung der Dichtelemente und wenn möglich auch der statischen Widerlager. Ggf. können Dichtelemente auch statische Funktion übernehmen und umgekehrt.

In der Tabelle 4-1 wurden von /WAGNER 2005/ geplante sowie ausgeführte Streckenverschlussbauwerke zusammengestellt. In der Tabelle werden zudem Angaben zu Konstruktionsprinzipien, verwendeten Materialien sowie zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit (Dichtheit zum damaligen Zeitpunkt) gemacht. Die dargestellten Konzepte beinhalten

häufig eine Trennung der Bauteile hinsichtlich abdichtender und stützender/tragende Funktion. Jedoch unterscheiden sie sich z. T. deutlich in der Anordnung dieser Elemente sowie den hierfür zum Einsatz kommenden Materialien.

Ein detailliertes Referenzkonzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager liegt momentan nicht vor.

Es ist festzuhalten, dass die an den Standorten der ausgeführten Dämme gegebenen Fluiddruckbelastungen kleiner als die für den Referenzstandort biosphärenseitig und endlagerseitig maximal zu erwartenden Drücke von ca. 11 bzw. 19 MPa sind. Jedoch ist ebenfalls ersichtlich, dass eine sofortige hydraulische Wirksamkeit bei geeigneter Auslegung erreicht werden kann für den Fall der gestörten Entwicklung (vgl. Damm Rocanville). Andererseits ist ebenso offensichtlich, dass eine Extrapolation der Aussage zur Funktionstüchtigkeit auf den geforderten Nachweiszeitraum allein anhand der Beobachtungen von wenigen bis einigen Jahrzehnten nicht zulässig ist.

Tabelle 4-1: Zusammenstellung von Konzepten zu bzw. bereits ausgeführten Streckenverschlussbauwerken (nach /WAGNER 2005/)

Bezeichnung	Konstruktive Gestaltung	Materialien	Nachweis der Funktionstüchtigkeit
Dammbauwerk Leopoldshall	funktionale Trennung, Mauerwerksdamm, Holz- und Asphaltelemente	Ziegelmauerwerk mit Magnesia- und Portlandzementen, Asphalt, Holz	erbracht
Dammbauwerk Bismarckshall	keine funktionale Trennung Mauerwerksdamm, Einzelsegmente	Ziegelmauerwerk mit Magnesia- und Portlandzementen	keine belastbaren Angaben
Dammbauwerk Sachsen-Weimar	funktionale Trennung, Mauerwerksdamm, Tondichtelement	Klinkermauerwerk, Hochofenzement Tondichtung, Injektion mit Kieselsäure- und Salzlösung	eingeschränkt erbracht (nachträgliche Injektionen)
Versuchsdamm Hope	teilweise funktionale Trennung, prismenförmiges Widerlager, Asphalt als Außen- und Innendichtung	Salzbeton, Asphalt	keine belastbaren Angaben
Versuchsdamm Asse	funktionale Trennung, hydrostatisches Dichtsystem	Salzbeton, Asphalt	keine Belastung
WIPP Konzept 1990	keine funktionale Trennung, Kurzzeit und Langzeitelemente	Steinsalz, Beton	Bauwerk nicht ausgeführt
ERA Morsleben Konzept 1996	keine funktionale Trennung, gezielte Bewässerung	Bentonitformsteine	Bauwerk nicht ausgeführt
Dammbauwerk Immenrode	funktionale Trennung, dreifach kegelstumpfförmiges Widerlager	Solebeton, Bentonitformsteine	Bauwerk ohne Belastung
Versuchsdamm Sondershausen	funktionale Trennung, prismenförmiges Widerlager	Steinsalzbriketts, Bentonitformsteine Gussasphalt	eingeschränkt erbracht (Widerlagerversagen)
ERA Morsleben Konzept 2003	keine funktionale Trennung, Druckvorspannung	Salzbeton	Bauwerk nicht ausgeführt
Dammbauwerk „Rocanville“	funktionale Trennung, mehrfach kegelstumpfförmiges Widerlager, Dichtelemente	Magnesiabeton mit silikatischen Zuschlägen, Bentonit, Dowell Chemical Seal	erbracht

4.2.1 Konzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager, 1990

Seit Mitte der 80er bis Anfang der 90er Jahre fanden in Deutschland im Rahmen des FuE-Vorhabens „Dammbau im Salzgebirge“ intensive konzeptionelle Arbeiten zur Entwicklung eines Streckenverschlusses für Endlager statt.

In den Betrachtungen von /ENGELMANN et al. 1988/ und /ENGELMANN 1991/ wurden folgende Belastungsszenarien in der Betriebs- und Nachbetriebsphase angenommen, die hinsichtlich des Abdichtungsdesigns berücksichtigt werden müssen:

In der Betriebsphase:

- ein begrenzter Lösungszutritt in die Grubenräume, die für den Endlagerbetrieb benötigt werden,
- ein begrenzter Lösungszutritt aus dem Gebirge in verfüllte und abgeworfene Bergwerksbereiche,
- Radiolysegasentwicklung in den abgeworfenen, be- und verfüllten Teilen des Grubengebäudes,
- Natürliche Gaszutritte in den abgeworfenen, be- und verfüllten Teilen des Grubengebäudes

In der Nachbetriebsphase:

Aufgrund der abschließenden Verfüllung des Grubengebäudes am Ende der Betriebsphase entfällt das Szenario „begrenzter Lösungszutritt in die offenen Grubenräume“ /ENGELMANN 1991/. Die übrigen Szenarios behielten zum damaligen Zeitpunkt ihre Gültigkeit:

- Wasser- und Lösungszutritt aus dem Hauptanhydrit,
- Lösungszutritt aus der Salzformation (Laugentaschen),
- Wasserstoffgenerierung infolge Radiolyse,
- Zutritt von Erdgas.

Daraus wurden folgende technische Anforderungen an das Abdichtungsbauwerk in der Betriebs- und Nachbetriebsphase abgeleitet (vom Projekt Dammbau erarbeitet und mit der PTB abgestimmt; aus: /BUSCH 1991/):

1. „...In Verbindung mit dem umgebenden Gebirge soll das Dammbauwerk technisch dicht gegenüber Flüssigkeiten und Gasen sein. Dabei schließt es die offenen Teile des Grubengebäudes bzw. die bereits abgeworfenen be- und verfüllten Teile gegen die Störmedien ab.

Die technische Dichtigkeit des Dammbauwerkes gegenüber Flüssigkeiten ist dabei zu einem möglichst frühen Zeitpunkt - bis spätestens 5 Jahre nach Fertigstellung - durch eine Damppermeabilität von $k \leq 2 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ inkl. einer bestimmten Tiefe um das Dammbauwerk herum in das angrenzende Gebirge zu gewährleisten. Für die Gesamtdurchlässigkeit des Dammbauwerkes gegenüber Gasen gilt, dass die entsprechenden Gaskonzentrationen bzw. Aktivitäten - insbesondere auch in der Betriebsphase -

auf der offenen und bewetterten Seite des Endlagerbergwerkes die zulässigen Grenzwerte deutlich unterschreiten.

- 2. Durchhörte Schichten und tatsächliche oder potentielle Wegsamkeiten für Flüssigkeiten und Gase - gedacht ist hier an den Anhydrit - sollen technisch dicht durch Dammbauwerke gegen offene Teile des Grubengebäudes gesichert werden.*
- 3. Bezüglich ihrer Funktion sind Dammbauwerke so auszulegen, bis andere technische Barrieren, wie z. B. der Versatz, sie übernehmen. In Bezug auf Dammbauwerke wird von einer Funktionsfähigkeit von bis zu 500 Jahren ausgegangen. Wesentliche Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit von Dammbauwerken ist ihre Standsicherheit. Als Auslegungskriterien für die Standsicherheit werden angenommen:*
 - Auflaufende Gebirgskonvergenz,*
 - Flüssigkeits- und Gasdrücke bis zur Höhe des hydrostatischen Druckes von ca. 11 MPa (110 bar) am Ende der Betriebsphase von 50 - 60 Jahren auch bei einseitiger Belastung der Stirnfläche des Dammbauwerkes*
 - Flüssigkeits- und Gasdrücke bis zur Höhe des petrostatischen Druckes von ca. 19 MPa (190 bar) in der Nachbetriebsphase auch bei einseitiger Belastung der Stirnfläche des Dammbauwerkes*
- 4. Dammbauwerke müssen wartungsfrei und im Rückbauverfahren zu erstellen sein.*
- 5. Die eingesetzten Dammbaumaterialien müssen gegen die unter Druck anstehenden Belastungsmedien Flüssigkeit und Gas korrosions- und temperaturbeständig sein. Temperaturbeständigkeit bedeutet nach vom BfS durchgeführten Modellrechnungen für ein mit hoch- und mittelaktiven Abfällen befülltes Endlager im Salz, dass von ca. 70 °C in der Betriebsphase und von ca. 80 °C in der Nachbetriebsphase auszugehen sein dürfte ...“*

Diese aufgeführten Anforderungen sind als Planungsgrundlage aufzufassen, da zum damaligen Zeitpunkt ein technisches Gesamtkonzept des Multibarrierensystems mit abgesicherten standortspezifischen Anforderungen an die Einzelbarrieren noch nicht vorlag.

Aufbau des Abdichtungsbauwerkes

Das hinsichtlich der o. g. Anforderungen entwickelte Design der Streckenabdichtung wird in Abbildung 4-1 dargestellt.

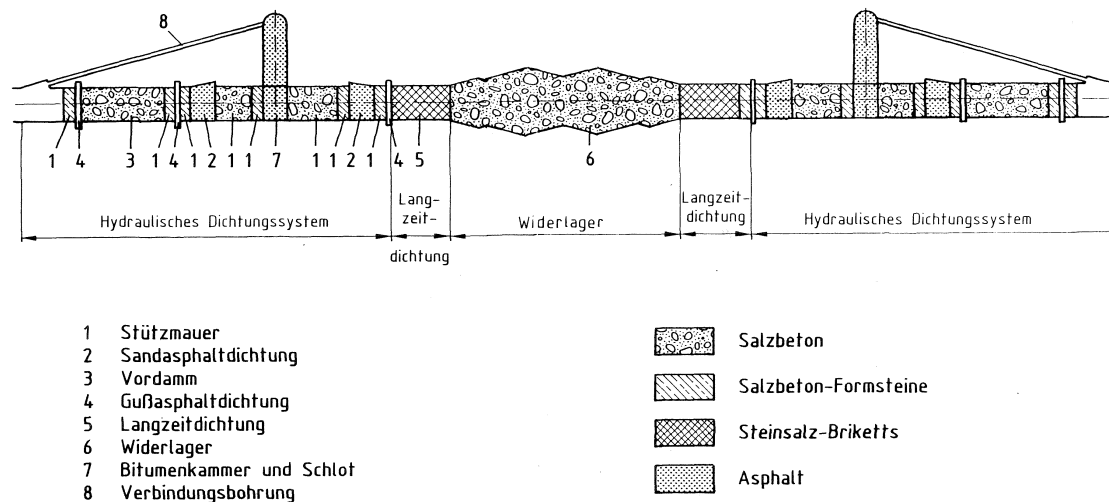


Abbildung 4-1: Darstellung eines zweiseitig wirkenden Endlagerbauwerks (nach /FISCHER 1991/)

Die von beiden Seiten mit Fluid- oder Gasdruck belastbaren symmetrischen Abdichtungsbauwerke bestehen aus einem mehrfach prismatoiden Widerlager, an dessen beiden Stirnseiten sich Abdichtungssysteme (Kurz- und Langzeitdichtung) befinden (vgl. Abbildung 4-1).

Das Widerlager hat die Aufgabe, die aus der Konvergenz resultierenden Gebirgsspannungen sowie die aus Gas- und Laugendruck resultierenden Spannungen sicher aufzunehmen und ins Gebirge abzuleiten.

Die Abdichtungssysteme sollten hierbei die Abdichtungsfunktion übernehmen und das Widerlager vor dem Angriff korrosiver Lösungen und Gase schützen. Das Design der Abdichtungssysteme unterstützt hier die geforderte sofortige hydraulische Wirksamkeit nach Erstellung der Streckenabdichtung. Sie waren derart ausgelegt, sofort Laugen- und Gasdruck in maximaler Höhe aufnehmen zu können und werden in ihrer Wirkung als „... ein sich selbst regelndes Überdrucksystem mit Asphalt als Dichtungsmaterial ...“ beschrieben /FISCHER 1991/.

Die Langzeitsicherheit der Abdichtung sollte durch einen, sich jeweils zwischen beiden Stirnseiten des Widerlagers und den Abdichtungssystemen befindenden Abschnitt aus feinkörnigen Salzbricketts gewährleistet werden. Diese Langzeitdichtung wird durch Kompromierung wirksam und gewährleistet die Dichtfunktion über lange Zeit, wenn die hydraulische (Kurzzeit-)Dichtung nicht mehr wirksam ist /FISCHER 1991/.

Funktionsweise des hydraulischen Dichtungssystems:

Wesentliche Elemente des hydraulischen Dichtungssystems stellen die Bitumenkammer & der sich darüber befindliche Bitumenschlot (Reservoir für auszugleichende Verlustvolumina) dar. In beiden befindet sich gefülltes Bitumen. Die Planungen gingen davon aus, dass der auf der Lastseite anstehende Gas- oder Laugendruck über die geeignete Verbindungsbohrung auf das Bitumen übertragen wird, welches sich dadurch verspannt und infolge des

Überdrucks – resultierend aus der höheren Dichte des Bitumens gegenüber den Störfallmedien – den Streckenquerschnitt abdichtet /FISCHER 1991/.

Nach /FISCHER 1991/ hat der sog. Vordamm die Aufgabe, „... das Bitumen in der Bitumenkammer am Platze zu halten. Die Stirndichtung soll den Vordamm vor frei einwirkenden korrosiven Laugen schützen.

Die Stützmauer vor der Bitumenkammer dient der Aufnahme des Bitumendruckes im Rückbauzustand und der Separierung des gefüllten Bitumens vom Sandasphalt. Wegen der Kompressibilität der nachgeschalteten Einzelkomponenten „Sandasphalkammer“, „Gussasphaltdichtung“ und „Langzeitdichtung“ bei anstehendem, hohen Gas- oder Laugendruck, soll sich diese Stützmauer als „Kolben“ vom umgebenden Gebirge möglichst bruchlos ablösen und den anstehenden Bitumendruck auf die nachgeschalteten Einzelkomponenten übertragen.

Die anschließende Sandasphalkammer soll ein Auslaufen des gefüllten Bitumens aus der Bitumenkammer zur Langzeitdichtung verhindern. Dies wird erreicht durch ihre Gestalt und die höhere Dichte und Viskosität des Sandasphaltes gegenüber der des gefüllten Bitumens.

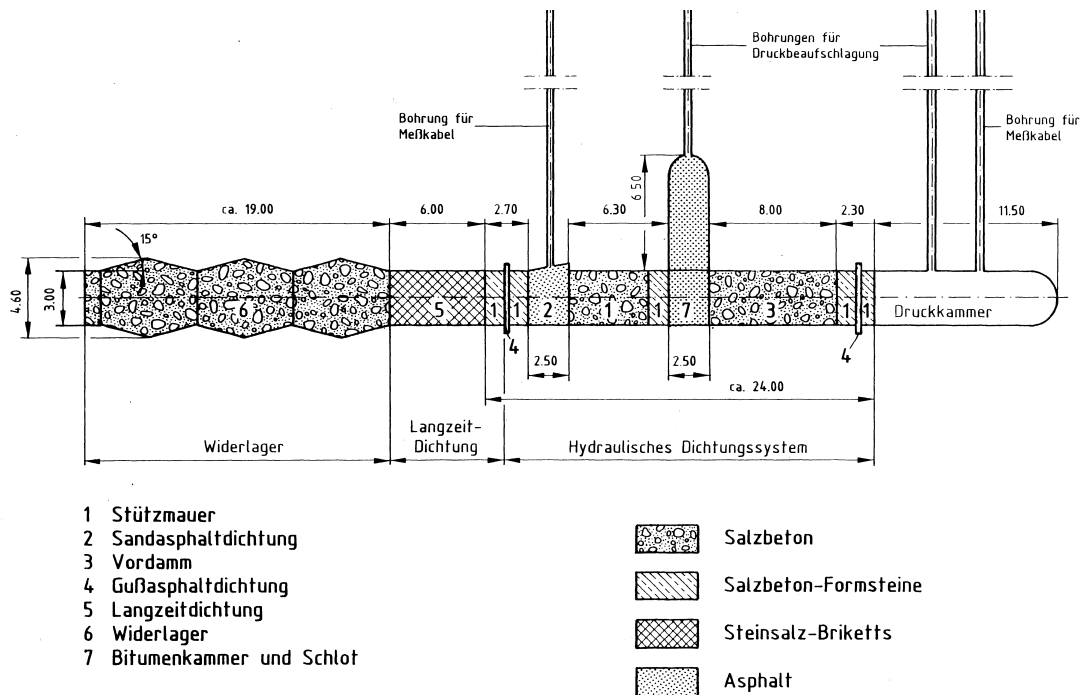
Die Gußasphaltdichtung vor der Langzeitdichtung, soll ein Durchdringen von Sandasphalt zur Langzeitdichtung verhindern. Die Gußasphaltdichtung bildet somit das letzte Element eines „Systems“, das ein Auslaufen des Bitumens aus der Bitumenkammer verhindern soll.

Die bisher nicht genannten Stützmauern dienen der Separierung einzelner Teilkomponenten und als Stützelemente während der Einbauphase ...“.

Weitere Details zu den Abmessungen sowie zur Funktionsweise des Dammes unter der Störfalllast werden in /FISCHER 1991/ und /FRANKE 1991/ gegeben.

4.2.2 Konzept eines Versuchsdammbauwerkes auf der Schachtanlage Asse

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.2.1 genannten Anforderungen ist im Rahmen des FuE-Projektes „Dammbau im Salzgebirge“ ein Großversuch im FB Asse konzipiert worden. In diesem sollte ein Testdamm (Hälfte des im vorigen Kapitel vorgestellten symmetrischen Abdichtungsbauwerkes) durch eine Druckkammer mit Last beaufschlagt werden. Neben der bautechnischen Machbarkeit sollte insbesondere die Funktion des hydraulischen Dichtungssystems und deren Einzelkomponenten untersucht werden. Eine schematische Darstellung des Versuchsdamms wird in Abbildung 4-2 gegeben. Es war geplant, die in Tabelle 4-2 aufgeführten Materialien zum Einsatz kommen zu lassen.


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Versuchsdammes /FISCHER 1991/
Tabelle 4-2: Bestandteile des Abdichtungssystems sowie verwendete Materialien

Bestandteil des Abdichtungssystems	Material / Spezifikation
Statisches Widerlager	Salzbeton (Rezeptur: 18% HOZ 35 L NW/HS NA, 10% NaCl- Lösung als Anmachlösung, 72% Steinsalz-Zuschlag), $\beta_{DZ} = 28 - 32 \text{ MPa}$ bei $L/Z = 0,58 - 0,52$
Langzeitdichtung	Salzbriketts (Korngröße 0 – 0,5 mm, Dichte = $1940 - 2000 \text{ kg/m}^3$,), $\beta_{DZ} = 25 \text{ MPa}$
Hydraulisches Dichtungssystem	gefüllertes Bitumen (in der Asphaltkammer, 42,7% Bitumen B 25, 57,3% Basaltfüller)
	Sand-Asphalt (22% Bitumen B 25, 38% Kalksteinfüller 0/0,9 mm, 40% Feinsand 0/2 mm)

Der Versuch wurde während der Baumaßnahmen aus politischen Gründen abgebrochen. Lediglich der Vordamm wurde errichtet.

4.2.3 Konzept eines Streckenverschlusses für ein HAW-Endlager, 1998

In den Planungen von /DBE 1998/ sollten die Streckenverschlüsse als prinzipiell zweiseitig belastbare Bauwerke errichtet werden, deren Dichtwirkung für die Nachbetriebsphase gefordert wird. Aufgrund der geforderten Wirksamkeit über ca. 10 000 a sollten Materialien verwendet werden, deren Langzeitbeständigkeit aus Vorkommen in der Natur bekannt ist. Prinzipiell wurden Naturwerksteine (z. B. Basalt, Granit, Salzblöcke), Zuschlagstoffe (z. B. Sande, Kiese, Schotter), Bitumen/Asphalt, Beton oder Bentonit und Tone in Erwägung gezo-

gen. Die spätere Festlegung auf die Baustoffe sollte anhand weiterer Untersuchungen erfolgen.

Die Planungen /DBE 1998/ sahen eine Trennung von Dicht- und Stützelement (Widerlager) vor. Der prinzipielle Aufbau hierzu wird in Abbildung 4-3 dargestellt. An den Stirnseiten des zentralen, prismatoidförmigen Widerlagers aus Beton sollten sich Dichtelemente aus Asphalt oder Bitumen befinden. Die Dimensionierung der Bauteilgrößen sollte über geomechanische Berechnungen und Standsicherheitsnachweise erfolgen, wobei die Wirkprinzipien im Labor und in-situ zu untersuchen sind.

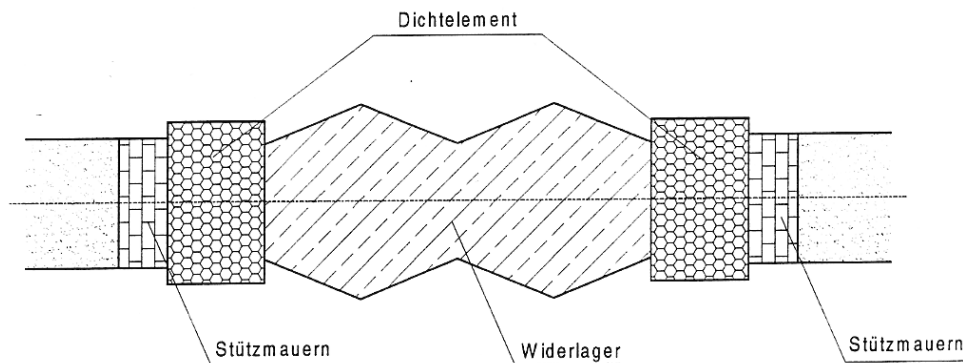


Abbildung 4-3: Prinzip eines Streckenverschlusseses für ein HAW-Endlager in Salz (nach /DBE 1998/)

4.2.4 Konzept eines Streckenverschlusses für das ERAM, 1996

Im Rahmen der Planungen zur Schließung des Endlagers für radioaktive Abfallstoffe Morsleben (ERAM) wurde durch das Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. W. Wittke, Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH (WBI) ein Konzept für Streckenabdichtungen erarbeitet /WITTKKE 1996/. Dieses sollte die aus der Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA) erwachsenden Anforderungen einer querschnittsgemittelten Permeabilität von $k < 10^{-19} \text{ m}^2$ gegenüber Gasen und Lösungen gewährleisten. Das Konzept sah kugel- oder ellipsoidförmige Abdichtungselemente aus hochkompaktierten Bentonitformsteinen vor (siehe Abbildung 4-4). Die Dichtelemente mit einem Durchmesser von ca. 13 m sollten beidseitig durch Versatz der Strecken gestützt werden und durch den sich einstellenden Quelldruck dichtende und lastabtragende Funktion übernehmen.

Das Konzept erfordert sowohl eine erhebliche Querschnittserweiterung an den Abdichtungsstandorten, sowie eine gezielte Beaufschlagung des Bentonitelementes mit Lauge, um einen gleichmäßigen Quelldruck zu erreichen, welcher die beabsichtigte Abdichtwirkung sowie den Lastabtrag gewährleisten soll. Nach der Durchführung von Technikumsversuchen zur Demonstration der gezielten Bewässerung sowie Bestimmung der Quelldrücke /GATTERMANN 1998/ wurde das Konzept nicht weiter verfolgt.

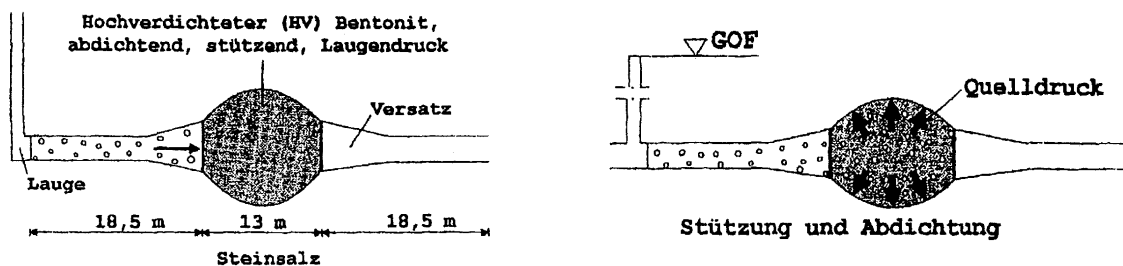


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Verschlusskonzeptes für Strecken im ERAM (nach /WITKE 1996/)

4.2.5 Konzept eines Streckenverschlusses für das ERAM, 2002

Durch den Wechsel des Konzeptes zur Schließung des ERAM vom Abdichtungskonzept (s.o.) hin zu einer Vollverfüllung bei gleichzeitiger sog. „Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen“ wurden die aus der Langzeitsicherheitsanalyse erwachsende Anforderungen an diese zu errichtenden Streckenabdichtungen (21 Stück) folgendermaßen spezifiziert:

- querschnittsgemittelte Permeabilität von $k < 10^{-18} \text{ m}^2$
- Nachweiszeitraum: 5 000 – 30 000 a

Als Referenzmaterial der im Rückbau zu errichtenden streckenparallelen Abdichtungen ist Salzbeton M2 vorgesehen. Querschnitt und Länge der zu errichtenden Abdichtungen ergeben sich aus den standortspezifischen Gegebenheiten des ERAM. In Fällen, wo für das Erreichen des geforderten hydraulischen Widerstandes größere Abdichtungslängen erforderlich sind, ist die Unterteilung in einzelne Segmente der Länge $25 \pm 5 \text{ m}$ geplant. Die Segmente sollen durch plastische Fugen (Salzgrus oder Salzbriketts der Dicke 0,5 - 1,0 m) voneinander getrennt werden, um potentielle Zwangsspannungen gering zu halten /MAUKE et al. 2003 & 2006/.

Abbildung 4-5 stellt das Konzept eines solchen Streckenverschlusses dar.

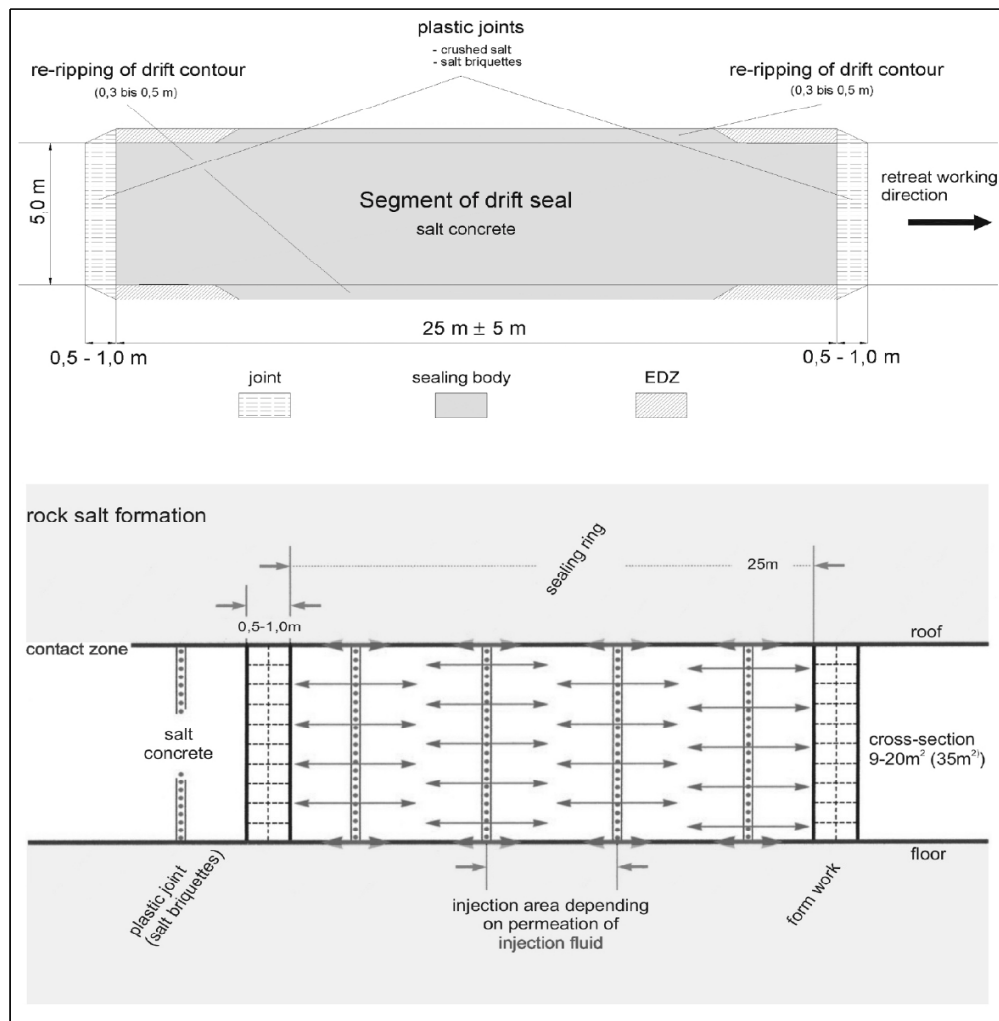


Abbildung 4-5: Konzept eines Streckenverschlusses des ERAM (nach /MÜLLER-HOEPPE et al. 2004/)

Die Möglichkeit einer nachträglichen Injektion der Kontaktfuge über Manschettenrohre wurde in den Planungen berücksichtigt. Vor Errichtung der Streckenabdichtung ist ein Nachschneiden mit der Tiefe 0,3 m bis 0,5 m (Sohle) vorgesehen.

Nähere Angaben zur Konzeption und Auslegung der Streckenabdichtungen werden von /MAUKE et al. 2003/ und /MÜLLER-HOEPPE et al. 2004/ gegeben. Die Korrosion von Salzbeton unter dem erwarteten geochemischen Milieu wurde von /HERBERT et al. 2005/ im Rahmen von Laborversuchen und Modellierungen (process level modelling) untersucht. Die Untersuchungsergebnisse zur Langzeitstabilität von Salzbeton zeigen, dass bei Vorhandensein einer ausreichend niedrigen Anfangspermeabilität die Funktionstüchtigkeit der Streckenabdichtung gewahrt bleibt, da unter diesen Umständen das Fortschreiten der Korrosionsfront und die damit verbundene Zunahme der Permeabilität ausreichend langsam abläuft. Diese Ergebnisse dienen als Basis der Langzeitsicherheitsanalyse /NOSECK et al. 2005/.

Das verwendete Konzept des ingenieurtechnischen Nachweises der Integrität der Streckenabdichtung wird in /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/ beschrieben (vgl. auch Abschnitt 5.4).

4.2.6 Konzept eines Streckenverschlusses der WIPP-Site (USA)

Für den Verschluss der Strecken des US-amerikanischen LLW- Endlagers (WIPP – Waste Isolation Pilot Plant) wurde in /SANDIA 1993/ ein Referenzkonzept einer Streckenabdichtung entwickelt. In Abbildung 4-6 wird das Konzept – welches fortlaufend durch einfließende neuere Forschungsergebnisse aktualisiert wird – schematisch dargestellt.

Das Verschlussystem besteht aus einem zentralen Langzeitelement sowie zwei Kurzzeitelementen. Die stirnseitig angeordneten Kurzzeitelemente haben sowohl eine dichtende als auch eine lastabtragende Funktion. Als Material wurde nichtschumpfender Beton vorgesehen.

Das ebenfalls abdichtende und tragende Langzeitelement soll aus mechanisch kompaktierten Steinsalzblöcken bestehen. Der Zeitpunkt des Wirksamwerdens der Langzeitdichtung ist daher maßgeblich von der Gebirgskonvergenz und der erzielten Einbaudichte abhängig. Die mineralogische Zusammensetzung soll hierbei der des Standortes gleichen; eine Einbaudichte von 95% des Wirtsgesteins wird angestrebt.

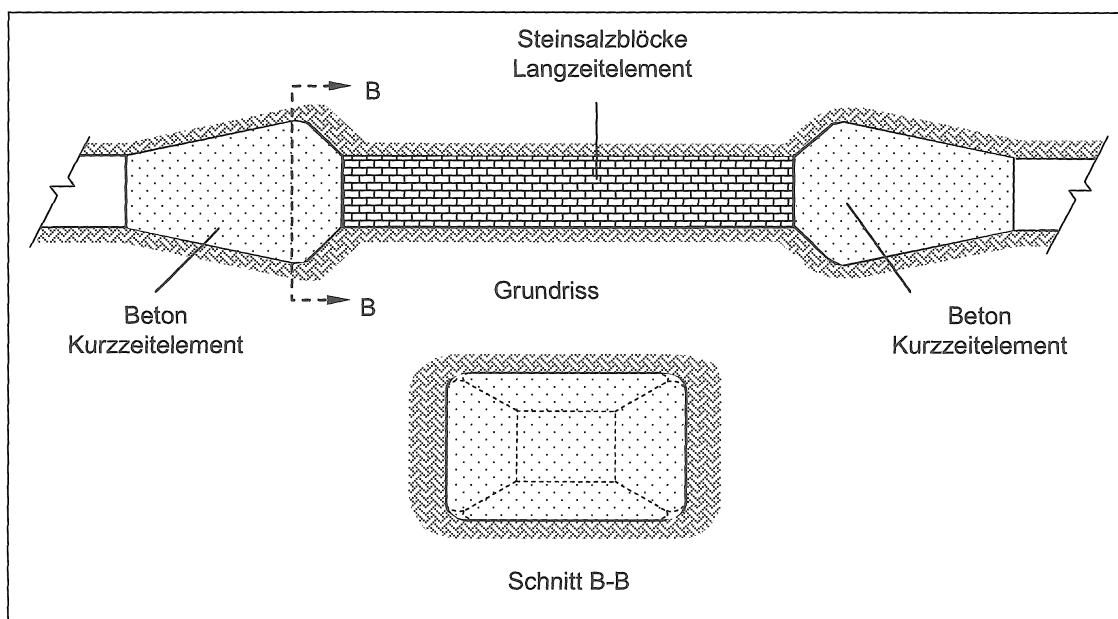


Abbildung 4-6: Konzept eines Streckenverschlusses der WIPP-Site (nach /SANDIA 1993/)

4.2.7 Konzept eines Streckenverschlusses im Carnallit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA wurde die Realisierbarkeit von Streckenverschlussbauwerken in leichtlöslichen Salzgesteinen untersucht (FKZ 02C0942) und ein Konzept für ein solches Bauwerk erarbeitet, dessen Komponenten in situ getestet werden sollen (momentan laufendes FuE-Vorhaben; FKZ 02C1204).

Das Grundkonzept (Abbildung 4-7) soll nach /SITZ et al. 2006/ eine Mehrzonen-Vorschüttung zur Aufsättigung der anströmenden Lösungen besitzen, damit der anstehende

Tachyhydrit nicht gelöst wird. Das sich anschließende, möglichst lange Verschlussbauwerk soll überwiegend aus steifen MgO-Betonelementen bestehen. Als zusätzliche Dichtelemente sind sowohl Gussasphaltdichtungen als auch umlaufende Dichtungsschlitze vorgesehen, welche den Strömungsweg in der ALZ unterbrechen sollen. Die Injektion der Kontaktfuge sowie der ALZ mit einem 2-Komponenten-Bitumen ist ebenso geplant.

Die abschließende Auswertung dreier laufender in-situ-Großversuche (GV1 bis GV3) steht noch aus. Die Versuche umfassen die Erstellung eines MgO-Ortbetonelementes (GV1), die Erstellung eines MgO-Betonelementes in Spritzbetonbauweise mit nachträglicher Injektion eines 2-Komponenten-Bitumens (GV2) sowie den Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Gussasphaltdichtung mit MgO-Betonwiderlager (GV3).

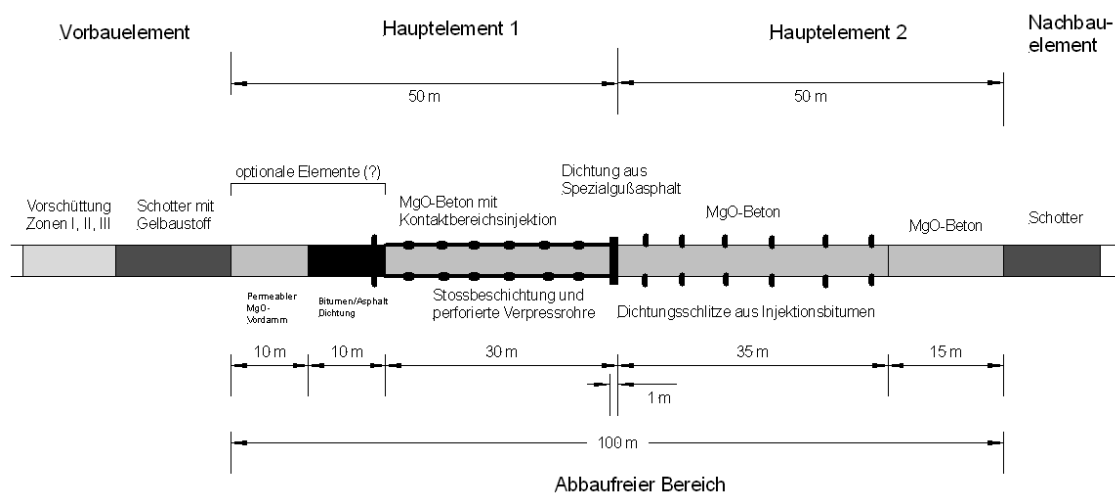


Abbildung 4-7: Konzept eines Streckenverschlusses im Carnallit (nach /SITZ et al. 2006/)

4.2.8 Streckenverschluss Bergwerk Hope

Im Vorfeld der geplanten Flutung des Kali- und Steinsalzbergwerkes Hope wurde im Jahre 1983 durch die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF), die Kavernen Bau- und Betriebsgesellschaft Hannover (KBB) sowie die Thyssen Schachtbau GmbH ein Streckenabschlussbauwerk auf der 500 m-Sohle errichtet. Das Verschlussbauwerk sollte während der Flutungsphase mittels umfangreicher geotechnischer Instrumentierung überwacht werden. Zur Gewinnung von Aussagen hinsichtlich der Dichtheit und Standsicherheit wurden Sensoren zur Messung des Laugendruckes, der Verschiebungen, der Temperatur etc. installiert /FISCHLE et al. 1987/.

Das Bauwerk wurde gegen einen Laugendruck von 6 MPa ausgelegt und besteht aus zwei 5 m langen prismatoiden Stützteilen aus Salzbeton (Portland-Zement, Süßwasser und Steinsalzzuschlag), welche durch eine 50 cm starke Dichtungsfuge aus Sandasphalt getrennt wurden. Zur Minimierung von Umläufigkeiten bindet diese ca. 30 cm ins Gebirge ein. Druckseitig befindet sich ein weiteres 25 cm starkes Dichtungselement aus Bitumen und Edelstahl-

Riffelblech. Diese Stirndichtung sollte den Angriff korrosiver Laugen auf den Salzbeton minimieren /THYSSEN 2002/.

Der Streckenquerschnitt wurde im Bereich der Fluiddruckseite von 8 m² auf 25 m² vergrößert; der aufgelockerte Gebirgsbereich am Standort bis zu einer Tiefe von mind. 50 cm entfernt.

Durch einen frühzeitigen Ausfall vieler Messgeber liegen keine belastbaren Daten zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit vor. Bis zur Aufgabe der Messungen wurde eine maximale Belastung des Bauwerkes mit einem Fluiddruck von 0,75 MPa festgestellt /FISCHLE et al. 1987/.

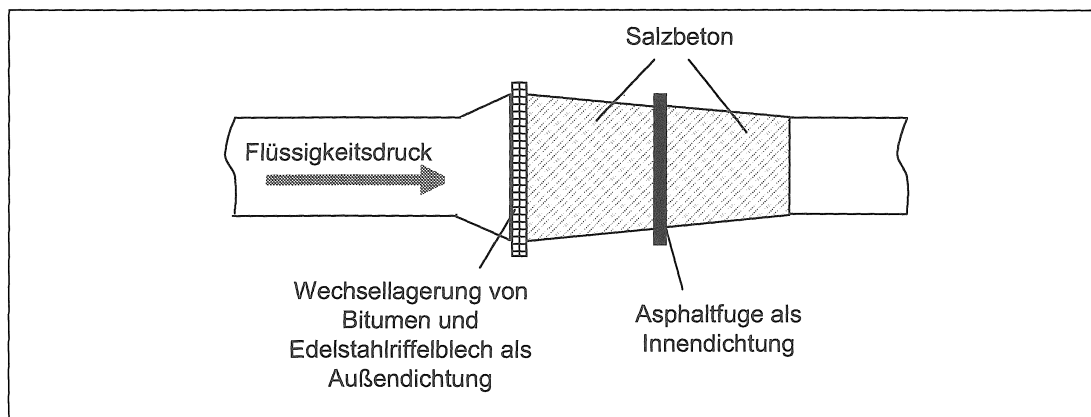


Abbildung 4-8: Darstellung des Verschlussbauwerkes Bergwerk Hope (Draufsicht, nach /FISCHLE et al. 1987/)

4.2.9 Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen

In der Grube Glückauf Sondershausen wurde zwischen 1999 und 2002 ein Versuchsverschlussbauwerk errichtet und im Rahmen eines in-situ Großversuchs getestet. Im Vorfeld des Versuches erfolgte ein Nachschneiden der Streckenkontur am Standort per gebirgschonendem Seilschneideverfahren, sodass ein rechteckiger Querschnitt von ca. 3,5 m x 3,2 m geschaffen wurde /SITZ et al. 1999/.

Das untersuchte Konzept berücksichtigt eine funktionale Trennung des ca. 11 m langen Versuchsverschlussbauwerkes unter Verwendung zweier Dichtelemente und eines luftseitigen Widerlagers /SITZ et al. 1999/, /SITZ et al. 2003b/, vgl. Abbildung 4-9). Der Versuch wurde so konzipiert, dass die einzelnen Reaktionen des:

- Dichtelementes 1 (aus Bentonitformsteinen FS 50 im Kern und FS 60 an der Kontur)
- Dichtelementes 2 (aus Gussasphalt) sowie des
- Widerlagers (Mauerwerk aus gepressten Salzbriketts in einfach-prismatoider Form)

auf eine Fluiddruckbeaufschlagung in mehreren Messebenen erfasst werden konnten. Als maximaler Fluiddruck wurden 8 MPa vorgesehen.

Während der Versuchsdurchführung wurden ab einer Fluidruckbelastung von etwa 4 MPa deutlich zunehmende Axialverschiebungen des Widerlagers festgestellt. Bei Anlegen des vollen Flüssigkeitsdruckes kam es zum Versagen des Widerlagers durch Herausgleiten eines Blockes. Trotz gemessener Verschiebungsbeträge von ca. 18 cm wurde die Funktionstüchtigkeit des Dichtelementes prinzipiell nachgewiesen /SITZ et al. 2003b/. Nach Rückbau des Dammes wurden ein ungeeignetes Verlegeschema des Widerlagermauerwerkes, sowie eine Umläufigkeit im Bereich des Kabelkanals festgestellt. Letztere führte zur lokalen Durchfeuchtung und Reduzierung der Festigkeit im Widerlagerverband.

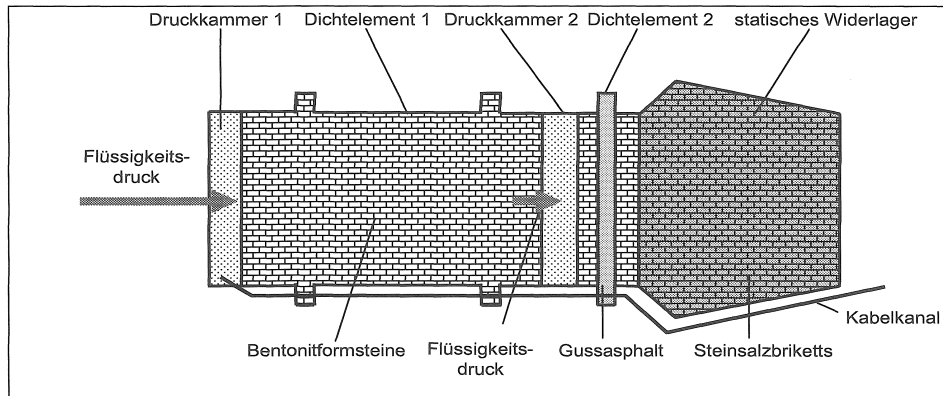


Abbildung 4-9: Versuchsverschlusssbauwerk Sondershausen (nach /SITZ et al. 2003b/)

4.2.10 Dammbauwerk Bergwerk Leopoldshall

Das erste in der Literatur erwähnte Streckenabdichtungsbauwerk stellt das im Staßfurter Revier im Jahre 1898 errichtete Dammbauwerk in der Grube Leopoldshall dar, welches die Grubenbaue Leopoldshall III auf der 300 m-Sohle gegen die absaufenden Bergwerke Leopoldshall I & II abdichten sollte /N.N. 1902/. Vor der Errichtung des 162 m langen Dammes in der ca. 10 m² messenden Strecke wurde der aufgelockerte Gebirgsbereich bis max. 1 m Tiefe nachgespitzt (vgl. Abbildung 4-10). Auf der Laugenseite wurde ein 75 m langer Aufsättigungsbereich aus Carnallitschüttung vorgeschaltet. Ein laugenseitiger, mit dem Gebirge verkeilter Holzdamme diente zur Fixierung einer Asphaltfuge. Eine zweite Asphaltfuge befindet sich im Inneren des tragenden und dichtenden Dammkörpers, welcher aus Ziegelmauerwerk mit Magnesia- und Portlandzementmörtel besteht. Der Damm war über den Betriebszeitraum von 20 Jahren dicht.

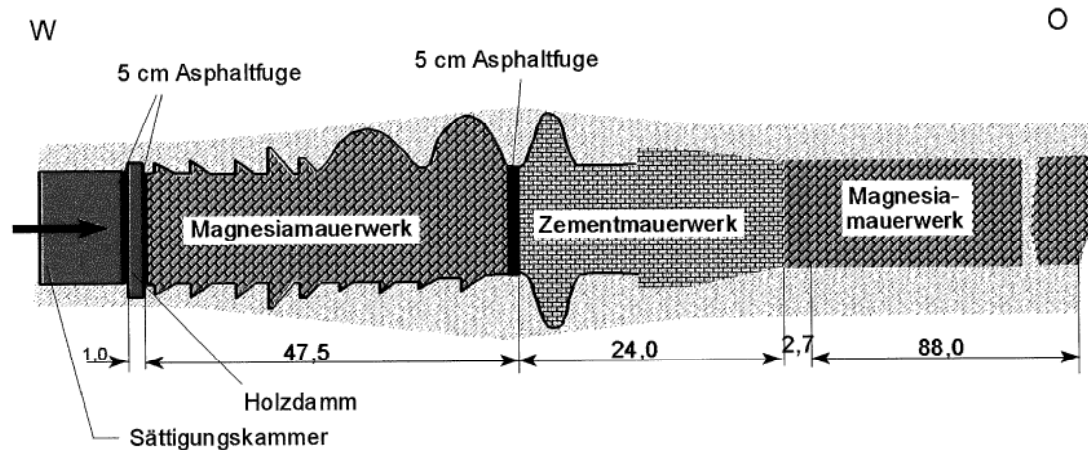


Abbildung 4-10: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Leopoldshall nach /N.N. 1902/

Ein weiteres Beispiel eines Dammes aus Mauerwerkssegmenten mit Magnesia- und Portlandzementmörtel stellt der Damm im Kalibergwerk Bismarckshall (Bischofferode) dar. Dieser 1916 zur Abdichtung eines Liegendzuflusses errichtete 70 m lange Damm konnte erst im Nachhinein durch das Vorsetzen eines weiteren 10 m langen Abschnittes und das Verpressen mit Magnesiazementleim vollständig abgedichtet werden. Der Damm ist bis heute funktionstüchtig. Über die Druckbelastung stehen keine zuverlässigen Angaben zur Verfügung /WAGNER 2005/.

4.2.11 Dammbauwerk Bergwerk Sachsen-Weimar

Im Kalibergwerk Sachsen-Weimar (heute: Unterbreizbach) wurde im Jahr 1927 eine flüssigkeitsführende Kluft (gesättigte NaCl-Lauge unter $p = 75$ bar) angefahren. Die Zulaufstelle konnte durch einen 21 m langen Damm (Streckendurchmesser ca. 10 m^2) abgedichtet werden. Während der Bauarbeiten wurden die zusitzenden Wässer durch 4 Rohre gefasst, welche durch den Bauwerkskörper geführt und nachträglich mit $2,5 \text{ m}^3$ Solezementleim unter 40 bar verpresst wurden. Im Bereich der Ortsbrust wurde zunächst eine ca. 1 m mächtige Tonschicht eingebracht und per Stampfen verdichtet. Das Widerlager hierzu bildet ein Mauerwerksverband aus Ziegeln und Hochofenzementmörtel. Daran schließt sich ein Abschnitt aus Stampfbeton mit Sand und Basalt als Zuschlagsstoffe an. Das statische Widerlager wird von einem 4fach prismatoidförmigen Mauerwerksverband aus Klinkermauerwerk gebildet /LOHMANN 1930/.

Da die o. g. Verpressungen über die Rohrleitungen keinen Abdichtungserfolg brachten, wurden nachträgliche Injektionen mit Chemikalien (Kieselsäure und Salzlösung) über mehr als 20 Injektionsbohrlöcher unter Drücken von bis zu 80 bar (vereinzelt bis 150 bar) durchgeführt, die den Mauerwerksverband sowie die Kontaktfuge abdichteten /LOHMANN 1930/.

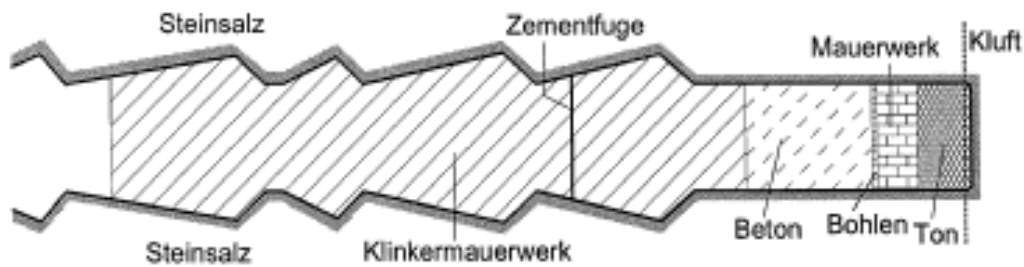


Abbildung 4-11: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Sachsen-Weimar (nach /LOHMANN 1930/)

4.2.12 Dammbauwerk Rocanville (Kanada)

Auf der kanadischen Kaligrube „Rocanville“ der Potash Corporation of Saskatchewan (PCS) kam es im Jahre 1984 im Zuge von Streckenvortriebsarbeiten in ca. 975 m Teufe zu einem Lösungszutritt in Höhe von bis zu ca. 20 m³/min /THYSSEN 2007/. Das innerhalb von 2 ½ Monaten unter permanentem Lösungszulauf errichtete Dammbauwerk (Querschnitt 7 m x 2,7 m, L = 28 m; Länge mit Vorschüttung: 76 m) mit Widerlagerfunktion besteht aus 2 Hälften, welche durch Dichtungskammern (gefüllt mit sog. Dowell-Chemical-Seal-Ring) getrennt sind. Als Baustoff der Widerlager kam Magnesiazement mit silikatischen Zuschlagsstoffen sowie Bentonit zum Einsatz. Ferner erfolgte eine systematische Injektion der Ringfuge zwischen Damm und Gebirge auf dem gesamten Dammquerschnitt.

Nach /THYSSEN 2007/ ist das Abschlussbauwerk bis zum damaligen Zeitpunkt gegenüber dem anstehenden Druck von 98 bar dicht.

4.2.13 Dammbauwerk Immenrode

Das Dammbauwerk Immenrode wurde zur Abtrennung der Grubenfelder Glückauf Sondershausen und Ludwigshall/Immenrode in einer Verbindungsstrecke (Kreisquerschnitt, 3 m Durchmesser) errichtet /ALAND et al. 1999/. Das symmetrisch ausgelegte, ca. 70 m lange Bauwerk besitzt eine zentrale Kerndichtung aus Bentonitformsteinen FS 50 (50% Feinsandanteil). Daran schließen sich beidseitig Abschnitte mit Bentonitformsteinen FS 70 an, welche gemeinsam mit der Kerndichtung das Langzeitelement darstellen. Dieses Langzeitelement soll nach ca. 500 a funktionstüchtig sein.

Die beiden Kurzzeitelemente bestehen aus je einem Bentonit-Dichtelement und einem mehrfach kegelstumpfförmigen Widerlager aus Solebeton, welche durch einen Bitumenanstrich des Gebirges gleitfähig gelagert sind. Die sich jeweils laugenseitig vom Bentonit-Dichtelement der Kurzzeitdichtung befindenden Widerlager aus Solebeton sind kraftschlüssig mit dem Gebirge verbunden und dienen der Begrenzung der Bentonit-Quelldeformation.

Der Damm ist bis dato noch nicht flüssigkeitsdruckbelastet. Insofern können keine Aussagen zur Funktionstauglichkeit getroffen werden.

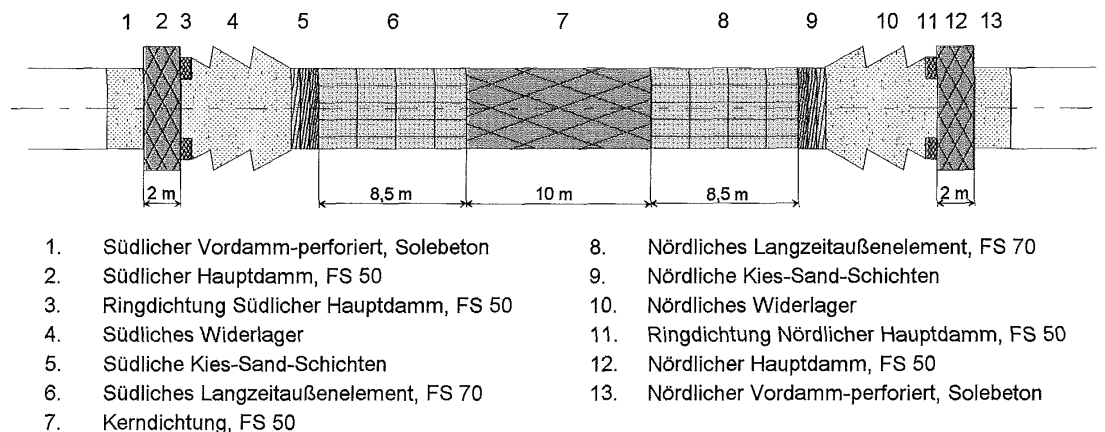


Abbildung 4-12: Dammbauwerk Immenrode (nach /ALAND et al. 1999/)

4.3 Beschreibung der Barriere und ihrer Komponenten / Ermittlung des Standes der technischen Machbarkeit

Eine Festlegung auf ein detailliertes technisches Konzept für Streckenverschlüsse in einem HAW-Endlager wurde noch nicht getroffen. Daher können zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Angaben zu Aufbau, Form und Anordnung der Elemente sowie zu den zu verwendenden Baustoffen und der Einbautechnik gemacht werden, da diese in hohem Maße konzeptabhängig sind.

Für Streckenverschlüsse empfehlen /KUDLA et al. 2006/ die Trennung von dichtenden und tragenden Bauteilen und die Auslegung mit redundanten und diversitären Bauteilen und Baustoffen. Folgende Baustoffe werden in Betracht gezogen und hinsichtlich ihrer Eignung diskutiert / KUDLA et al. 2006/:

- Arteigene Materialien im Salinar
 - Salzgrus
 - Salzbriketts / -blöcke
 - SVV (bei Zutritt von Lauge erhärtender Salzversatz; Entwicklung der GRS)
 - AISKRISTALL (bei Einbau erhärtende Evaporitmminerale; Entwicklung der DBE TECHNOLOGY)
- Basalt
- Bitumen / Asphalt
- Bentonit
- Beton mit Hartgesteinszuschlag (Solebeton, MgO-Beton)
- Beton mit Salzzuschlag (Salzbeton, MgO-Beton)

4.3.1 Dichtelement

Nach Bewertung aller potentieller Baustoffe hinsichtlich ihrer Eignung als Dichtmaterial für langzeitstabile Verschlüsse verbleiben nach /SITZ et al. 2003a/ nur natürliche Tone und Bitumen / Asphalte. Zementgebundene Materialien scheiden nach /SITZ et al. 2003a/ aus, da ihre Langzeitbeständigkeit unter wechselnden salinaren Bedingungen nicht nachgewiesen werden kann.

Bitumen / Asphalt

Bitumen- bzw. Asphaltdichtungen wurden bei den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Dämmen Leopoldshall und Hope in Form von je einer Strirn- und Innendichtung ausgeführt (5 bzw. 50 cm dick). Beide Dämme stehen unter Fluidlast und sind dicht.

Bautechnische Schwierigkeiten können während des Einbaus des Dichtelementes – meist als vertikale Scheibe ausgelegt - aus den rheologischen Eigenschaften des Baustoffs erwachsen. Auf die Lagestabilität der Dichtung, sowohl unter Eigenlast (Gewährleistung der Firstbündigkeit) als auch unter Fluidlast (Vermeidung des Abscherens der Asphaltfuge, vgl. Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen, /KUDLA et al. 2006/ ist besonderes Augenmerk zu legen. Es ist festzuhalten, dass der Einsatz von Gussasphalt bei horizontalen Absperrbauwerken deutlich problematischer ist, als beim Einsatz für Dichtelemente von Schachtverschlüssen.

Zur Zeit laufen an der TU Bergakademie Freiberg Untersuchungen, die auf eine Einbautechnologie hinzielen, bei der Asphaltblöcke mit geringen Überdrücken und moderaten Temperaturen homogen verschmolzen werden.

Zu erwähnen ist jedoch, dass Bitumen und Asphalt als organische Materialien einem gewissen mikrobiellen Angriff unterliegen /DBE 1999a/. Bei eingeschränkter Langzeitstabilität ist daher der Nachweis einer hinreichend geringen Zersetzungsrate zu führen.

Bentonit

Ein Bentonitdichtelement ist im Rahmen des Versuchsverschlussbauwerkes Sondershausen getestet worden (vgl. Abschnitt 4.2.9 und /SITZ et al. 2003b/. Während des Versuches kam es im Bereich eines Kabelkanals, welcher in der Sohle verlegt war, zu Umläufigkeiten. Dies zeigt, dass die Durchströmung eines Bentonitdichtelementes sehr sensitiv auf Inhomogenitäten zu reagieren scheint, und zu „piping“-Effekten führen kann. Die hieraus resultierende inhomogene Durchfeuchtung und Entwicklung des Quelldrucks kann die Funktion des Dichtelementes ebenso gefährden. Eine zusätzliche Anordnung von Elementen, welche ein gleichmäßiges Fortschreiten der Sättigungsfront ermöglichen, wäre hier eine mögliche Lösung (vgl. Äquipotentialsegmente, Universität Karlsruhe).

Arteigene Materialien

Ein Langzeit-Dichtelement aus gepressten Salzbriketts oder natürlichen Salzblöcken – wie es beispielsweise in den Planungen von /DBE 1998/ oder /SANDIA 1993/ vorgesehen ist – wurde bis dato (nach Kenntnis des Autors) nicht ausgeführt. Die sich in diesem Kontext stellende Frage nach der Entwicklung der Permeabilität des Verschlussbauwerkes in

Abhängigkeit der Gebirgskonvergenz und dem Einfluss der Mauerwerksfugen ist offen. Der Funktionsnachweis eines solchen Elementes steht noch aus.

Gleiches gilt für den in-situ Einsatz der Materialien SVV und AISKRISTALL.

4.3.2 Widerlager

Als Widerlagerbaustoffe kommen sowohl Naturwerksteine als auch arteigene Materialien in Frage. Für einen Streckenverschluss mit Langzeit- und Widerlager/Kurzzeitchichtelement (z. B. WIPP-site) ist ggf. der Einsatz von Betonen für das Widerlagerelement möglich. Aussagen zur Langzeitstabilität sind hier maßgeblich vom geochemischen Milieu (Zusammensetzung der zufließenden Lösung; ggf. durch Vorschüttungen einstellbar), Temperatur, etc abhängig.

Für das Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen wurde ein unvermörtelter Mauerwerksverband aus Salzbriketts gewählt. Durch die oben erwähnten Umläufigkeiten kam es zur Durchfeuchtung des Widerlagers und zur Reduktion der Festigkeit. Bei Anliegen des maximalen Druckes von 80 bar versagte das Widerlager (vgl. Kapitel 4.2.9).

Basalt

Basalt kann in Form von Naturwerksteinen (ggf. Schmelzbasalt) oder als Zuschlagsstoff Verwendung finden. Seine Langzeitbeständigkeit im Salinar konnte über Intrusionen nachgewiesen werden, welche als natürliches Analogon dienen.

4.3.3 Injektionsmaterialien

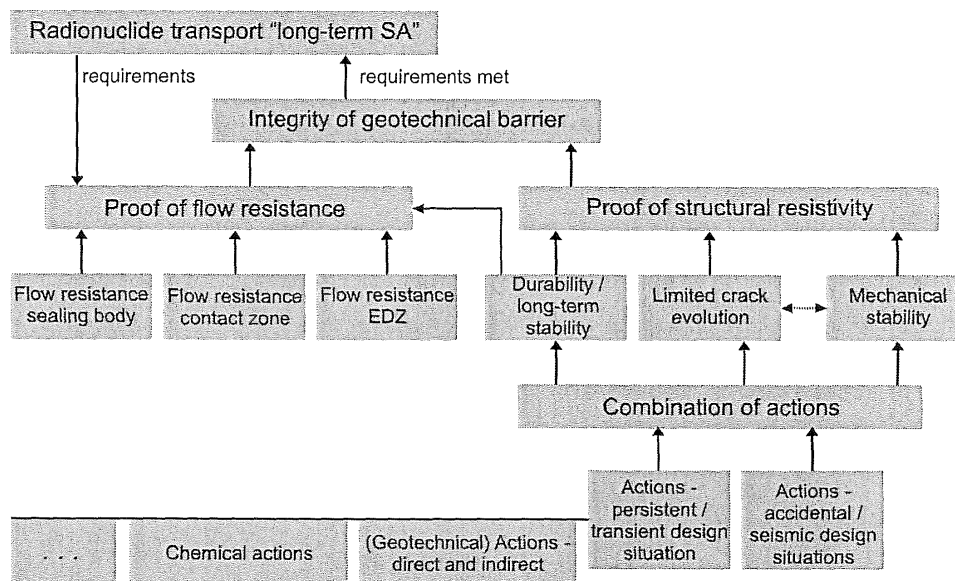
Falls Injektionen erforderlich werden, können die für den Kali- und Steinsalzbergbau üblichen und bewährten Injektionsverfahren und -güter (z. B. MgO-basierende Injektionsgüter) verwendet werden. Die Langzeitstabilität der Injektionsgüter ist für das vorhandene geochemische Milieu zu prüfen.

4.4 Konzept zum Nachweis der Integrität der geotechnischen Barriere / geotechnische Nachweisführung

Die Ableitung von Anforderungen an die geotechnischen bzw. technischen Barrieren erfolgt i.d.R. mit Hilfe von Stofftransportberechnungen im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse (LZSA). In der Langzeitsicherheitsanalyse werden geotechnische Barrieren als Strömungswiderstände parametrisiert, die Eingangsgrößen zur Bestimmung des Strömungswiderstandes sind Querschnitt, Länge und Permeabilität. Der bzw. die Strömungswiderstände, für die mit Hilfe der Langzeitsicherheitsanalyse die Einhaltung des radiologischen Schutzziels nach Strahlenschutzverordnung gezeigt wird, stellt die grundlegende Anforderung an die geotechnische Barriere dar. Auch hier kann eine Zuordnung zu den Größen Querschnitt, Länge und Permeabilität hergestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass die geotechnische

Barriere in Realität aus den drei Elementen Abdichtungskörper, der Kontaktzone zur Wirtsgesteinskontur und der Auflockerungszone im Gebirge besteht, die parallel geschaltete Strömungswiderstände beinhalten. Der Querschnitt beinhaltet alle drei Elemente und die Permeabilität stellt die aus dem Durchfluss rückgerechnete mittlere Permeabilität der Barriere dar. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Flächenanteile der drei Elemente und ihrer Ausbildung sowie durch das Regelwerk gefordert, ist der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes für alle drei Elemente zu führen (/MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/ vgl. Abbildung 4-13; Anmerkung: Unter Radionuclide transport „long-term SA“ sind hierbei im übertragenen Sinne die Stofftransportmodellierungen der LZSA zu verstehen. Diese hydraulischen Modellierungen umfassen die Bewegungen der zusitzenden unkontaminierten Fluide im Falle der ungestörten Endlagerentwicklung als auch den Transport von Radionukliden im Falle der gestörten Endlagerentwicklung).

Weiterhin kann die Permeabilität zunehmen, wenn die Bauwerksintegrität nicht mehr gegeben ist. Aus diesem Grund ist für die Konstruktion sinngemäß der Nachweis der Rissbeschränkung zu führen, der hier in verallgemeinerter Weise verstanden wird und in vielen Fällen den Nachweis der Standsicherheit abdeckt. Des Weiteren ist der Nachweis der Dauerhaftigkeit bzw. der Langzeitstabilität zu führen, mit dem nachgewiesen wird, dass sich die Permeabilität in Folge chemischer Einwirkungen, die z. B. zu Materialkorrosion führen, nicht in unzulässiger Weise erhöht (/MÜLLER-HOEPPE et al. 2006b & 2007/).



* i.S.v. Stofftransportberechnungen

Abbildung 4-13: Zusammenhang zwischen LZSA und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren (nach /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/)

Werden für die in den Transportmodellierungen erfassten Barrieren die in Abbildung 4-13 aufgeführten ingenieurtechnischen Einzelnachweise mit hinreichender Zuverlässigkeit erbracht, ist die Gültigkeit des Langzeitsicherheitsnachweises erbracht, da die aus ihm abgeleitete Anforderung an die geotechnische Barriere erfüllt ist (/MÜLLER-HOEPPE et al. 2006b & 2007/).

Als Elemente der Sicherheitsnachweisführung nach dem Stand der Technik sind folgende Einzelnachweise rechnerisch oder versuchsgestützt zu erbringen /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/:

- Nachweis der Dichtheit bzw. eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes
- Nachweis der Standsicherheit
- Nachweis der Dauerhaftigkeit / Langzeitstabilität der Konstruktion
- Nachweis der Herstellbarkeit

Die Nachweise zur Standsicherheit erfordern hierbei folgende Einzelschritte:

- Zusammenstellung möglicher/relevanter Einwirkungen bzw. daraus resultierender Beanspruchungen,
- Entwicklung von Gefährdungsbildern (abgeleitet aus einer möglichen Beeinträchtigung)
- Abbildung der Gefährdungssituationen in einem Rechenmodell,
- Bewertung der Ergebnisse des Rechenmodells.

Aus dem Standort des Endlagers sowie den Betriebszuständen und den definierten Szenarien für das Endlager ergeben sich Beanspruchungen für das Endlagerdammbauwerk und seine Umgebung, die für einen festgelegten Dammstandort ausgewertet werden müssen. Die Zusammenstellung der Beanspruchungen ist nachstehend aufgeführt. Die daraus abgeleiteten Gefährdungsbilder können Kombinationen der Beanspruchungen darstellen /DBE 1994b/.

Beanspruchungen aus dem Ausgangszustand des unverritzten Gebirges:

- geologische Verhältnisse im Salzgebirge
- primärer Gebirgsspannungszustand
- ursprüngliche Gebirgstemperatur
- tektonische Störzonen, Inhomogenitäten im Salzgebirge

Beanspruchungen aus dem Hohlraumausbruch:

- Spannungsänderungen
- Auflockerungen
- Temperaturänderungen infolge Bewetterung

Beanspruchungen aus der Einlagerung der Abfälle:

- thermisch induzierte Spannungen
- thermisch induzierte Deformationen
- thermische Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften des Gebirges und der technischen Barrieren
- thermische Beeinflussung der chemischen Eigenschaften des Gebirges und der technischen Barrieren
- Radiolysegas

Beanspruchungen aus Verfüllmaßnahmen:

- Spannungsumlagerungen infolge Versatz

Beanspruchungen aus Szenarien

- Zutritt von Wässern und Salzlösungen aus offenen Systemen
- Zutritt von Wässern und Salzlösungen aus geschlossenen Systemen
- Austritt von natürlichem Gas
- Austritt von Korrosionsgas

Beanspruchungen aus Seismizität:

- Erdbeben
- bergbauinduzierte Seismizität

Beanspruchungen aus dem Endlagerdammbauwerk:

Die Beanspruchungen aus dem Endlagerdammbauwerk selbst (z. B. Hydratationswärme bei Beton, Heißbitumen) können erst bei Vorliegen eines Konzeptes für ein Endlagerdammbauwerk zusammengestellt werden.

Beispiel: ERAM-Streckenabdichtungen (Deterministisches Nachweiskonzept)

Das oben vorgestellte Konzept wurde im Rahmen des ingenieurtechnischen Nachweises zur Integrität der Streckenabdichtungen im ERAM verwendet (vgl. /MAUKE et al. 2003 & 2006/).

Die Einzelnachweise basieren auf der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte und umfassen:

- den Nachweis eines ausreichend hohen Strömungswiderstandes im Baukörper, der Kontaktzone sowie der Auflockerungszone (Forderung der LZSA $k < 10^{-18} \text{ m}^2$)
- den Nachweis der Rissbeschränkung für verschiedene Zeitpunkte und Belastungssituationen (abdeckend für den Nachweis der Standsicherheit). Darunter zählten u. a.:
 - Nachweis der Einhaltung einer maximalen Temperaturdifferenz im Baukörper zur Vermeidung von thermisch induzierten Rissbildungen während des Hydratationsprozesses,
 - Einhaltung des Festigkeitskriteriums des Baukörpers für einen frühen Nachweiszeitraum (bis 100 Jahre, $\approx$ Lebensdauer üblicher Ingenieurbauwerke)
 - Einhaltung des Dilatanzkriteriums unter Ansatz der wirksamen Spannungen für Baukörper und Gebirge (ALZ) für den späten Nachweiszeitraum (ab 100 Jahre)
 - Einhaltung des Festigkeitskriteriums in der Kontaktzone für den frühen Nachweiszeitraum; maßgeblich ist geringfesteres Material
 - Einhaltung des Dilatanzkriteriums in der Kontaktzone für den späten Nachweiszeitraum unter Ansatz der wirksamen Spannungen
- Nachweis der Langzeitstabilität des verwendeten Baustoffs Salzbeton

Letztgenannter Nachweis konnte durch Untersuchungen des Korrosionsverhaltens erbracht werden /HERBERT et al. 2005/; /NOSECK et al. 2005/. Die Untersuchungen zeigten vernachlässigbare Korrosion, wenn eine ausreichend geringe Anfangspermeabilität von $k < 10^{-18} \text{ m}^2$ vorliegt.

Da die Kontaktzone zwischen Gebirge und Bauwerk häufig ein Bereich erhöhter hydraulischer Leitfähigkeit ist, schreibt das Technische Regelwerk Untersuchungen zur Bestimmung des hydraulischen Widerstandes der Kontaktzone an vergleichbaren Bauwerken vor. Als vergleichbares Bauwerk zu den in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Streckenabdichtungen des ERAM konnte der ebenfalls aus Salzbeton errichtete Asse Vordamm (Abschnitt 4.2.3) dienen, an dem u. a:

- Permeabilitätsmessungen,
- Hydrofrac-Untersuchungen,
- Ultraschalluntersuchungen der Kontaktzone
- Laborversuche (Scher- und Zugfestigkeit, etc.)

durchgeführt wurden /GLÄSS et al. 2005/. Obwohl dieser Vordamm lediglich als Widerlager ohne besondere Anforderungen an die hydraulische Dichtheit geplant war, zeigten die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen im Baukörper Werte von $k = 6 \cdot 10^{-19}$ bis $4,4 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$, wobei die Arbeitsfugen keine signifikant höhere Permeabilität aufwiesen. In der EDZ wurden Werte von $k = 6,5 \cdot 10^{-21}$ bis $2 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$ festgestellt. Mit einer Ausnahme wiesen auch die Messwerte der Permeabilitäten in der Kontaktzone zwischen Baustoff und Gebirge Werte $< 10^{-18} \text{ m}^2$ auf. Die hier im Firstbereich festgestellte Permeabilität von 10^{-14} m^2 kann auf das Bauverfahren (handverstopfter Bereich mit niedrigem Wasser/Zement-Faktor) zurückgeführt werden.

Die methodische Vorgehensweise beim hier vorgestellten Nachweis nach der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte nutzt akzeptierte Modelle, Kriterien und Verfahren. Dies ermöglicht Aussagen zum Sicherheitsniveau. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Nachweisführung besteht in der Möglichkeit der Anpassung an andere Rand- und Anfangsbedingungen.

Beispiel: Nachweis am Prototypen

Gemäß DIN EN 1990 ist ein Einzelnachweis am Prototypen (sog. versuchsgestützte Bemessung, Musterzulassung) zulässig. Für Nachweise am Prototypen ist allerdings bei – gegenüber dem Prototypen geänderten Spezifikationen (Material, Einbautechnik, Geometrie, etc.) bzw. Rand- und Anfangsbedingungen (z. B. Gebirgsdruck, Fluidruck) die Übertragbarkeit nachzuweisen. Aussagen zum Sicherheitsniveau sind aufgrund der begrenzten Anzahl an Prototypen schwierig /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/.

Beispiel: Probabilistisches Nachweiskonzept

Ein weiterer Ansatz zur Bemessung von untertägigen Verschlussbauwerken /WAGNER 2005/ wird in Abbildung 4-14 dargestellt. /WAGNER 2005/ präferiert die Analyse der Gefährdungsbilder (Kombinationen der im Nachweiszeitraum möglichen Einwirkungen) mittels mathematischer und physikalischer Modelle, was letztendlich eine Quantifizierung der Sicherheit ermöglicht. Im Rahmen der Berechnung und Bewertung konnte /WAGNER 2005/ mittels probabilistischer Verfahren am fiktiven Beispiel eines Verschlussbauwerkes im Salinar exemplarisch Versagenswahrscheinlichkeiten für die Grenzzustände:

- Abdichtung der Kontaktfuge
- Durch- und Umströmung des Dichtelementes und
- Setzung der Schottersäule (bei Betrachtung eines Schachtverschlussbauwerkes)

ermitteln. Unter Ansatz geschätzter Verteilungsparameter konnten auf die Lebensdauer bezogene Versagenswahrscheinlichkeiten von $1 \cdot 10^{-4} \leq p_f \leq 6 \cdot 10^{-3}$ ermittelt werden. Hierzu muss gesagt werden, dass die resultierenden Ergebnisse der Versagenswahrscheinlichkeiten in einem hohen Maße von der Qualität der Eingangsparameter abhängt. Durch den Einsatz redundanter Verschlussysteme sowie eine Verbesserung der Kenntnis der Eingangsgrößen kann die Versagenswahrscheinlichkeit weiter reduziert werden.

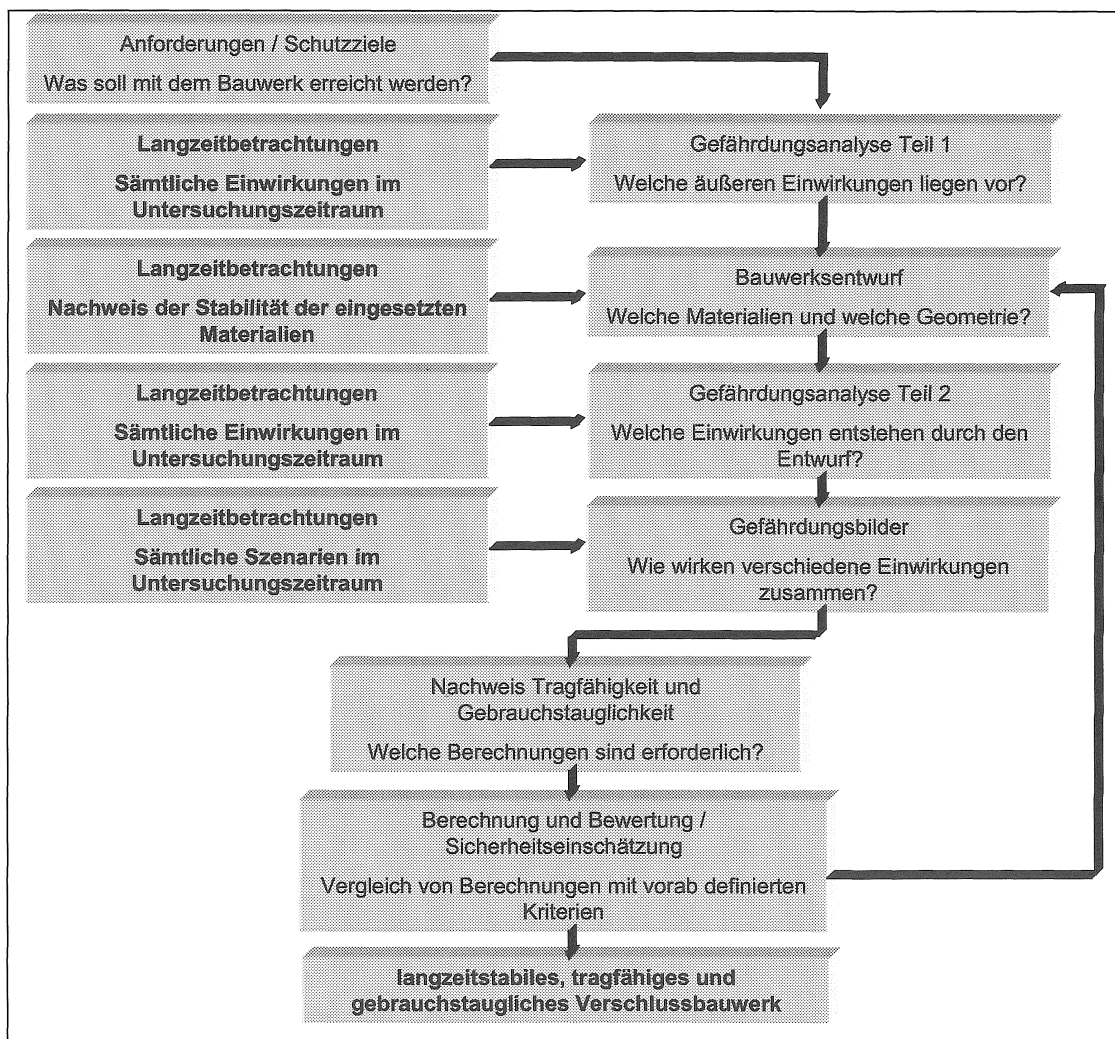


Abbildung 4-14: Algorithmus zu Entwurf und Bemessung untertägiger Verschlussbauwerke (nach /WAGNER 2005/)

4.5 Ableitung von offenen Fragen / Forschungsbedarf

Eine Festlegung auf ein detailliertes technisches Konzept für Streckenverschlüsse in einem HAW-Endlager wurde noch nicht getroffen. Im Gegensatz zu den Bauwerkskomponenten der Schachtverschlüsse, für die bereits Referenzen hinsichtlich der Materialwahl, einbauvorbereitender Arbeiten sowie Einbautechnik und -parametern existieren, können für die Streckenverschlüsse zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Angaben zu Aufbau, Form und Anordnung der Elemente sowie zu den zu verwendenden Baustoffen und der Einbautechnik gemacht werden, da diese in hohem Maße konzeptabhängig sind.

Für Streckenverschlüsse empfehlen /KUDLER et al. 2006/ die Trennung von dichtenden und tragenden Bauteilen und die Auslegung mit redundanten und diversitären Bauteilen und Baustoffen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Diverse und redundante Dichtstoffe“ 02C 1124 können hier u.U. weiterhelfen. Dies gilt ebenso für die in-situ Großversuche im Rahmen des laufenden Forschungsvorhabens CARLA. Hier erfolgen Tests von Einzelkomponenten eines langzeitstabilen Streckenverschlusses im Carnallitit.

Der begleitende in-situ Großversuch „Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen“ zum F&E Vorhaben „Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar“ (02C05472 und 02C0902) zeigte weitere Detailfragen auf, welche noch nicht abschließend gelöst sind. Dies betrifft zum einen das inhomogene Fortschreiten einer Fluidfront, welches sehr sensitiv auf Inhomogenitäten zu reagieren scheint („piping“-Effekt). Die hieraus resultierende inhomogene Entwicklung des Quelldrucks kann die Funktion des Dichtelementes ebenso gefährden. Eine zusätzliche Anordnung von Elementen, welche ein gleichmäßiges Fortschreiten der Sättigungsfront ermöglichen, wäre hier zu prüfen (vgl. Äquipotentialsegmente, Uni Karlsruhe). Zum Zweiten ist die Auslegung des langzeitstabilen Widerlagers zu überarbeiten (geänderter Mauerwerksverband, ggf. Vermörtelung oder Wahl eines Hartgesteinsmauerwerks). Zum Dritten zeigte der Versuch, dass die Asphaltinnendichtung für größere Verschiebungsbeträge ihre Funktion verliert, was durch ein geändertes Design vermieden werden kann.

Zu beachten ist, dass es sich bei CARLA und dem Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen um objektbezogene Speziallösungen handelt, die hinsichtlich Konstruktion und Material individuell geplant wurden. Ein speziell auf die zu erfüllenden Anforderungen und zu berücksichtigenden Einwirkungen ausgelegtes Konzept für Streckenverschlüsse für ein HAW-Endlager am Referenzstandort besteht noch nicht. Die bestehenden Konzepte sind unter Kenntnis der Nachweiszeiträume - welche im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse noch genauer spezifiziert werden müssen - sowie unter dem Aspekt von Fortschritten bei der Material-/Baustoffentwicklung sowie neuerer Erkenntnisse zu deren Langzeitstabilität zu überarbeiten. Dies betrifft beispielsweise Fragen zur

- Kompaktion und der damit gekoppelten Entwicklung der hydraulischen Parameter des Langzeitdichtelementes (z. B. Steinsalzbriketts),
- der Eignung von SVV- oder AISKRISTALL-Material (Übertragung der Forschungsergebnisse der GRS bzw. DBE TECHNOLOGY vom Labor- auf Großversuchsmaßstab) oder

- der Langzeitstabilität der Widerlagerbaustoffe bzw. ggf. eingesetzter Dichtmaterialien, wie Asphalt und Bitumen (vgl. aktuelle Forschungsarbeiten an der TU Bergakademie Freiberg).

Für die Bewertung des hydraulischen Widerstandes der geotechnischen Barrieren Strecken- und Schachtverschluss ist die mathematische Beschreibung (Beschreibbarkeit) der Auflockerungszone (geschädigter Gebirgsbereich) von besonderem Interesse. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Einfluss standortspezifischer Randbedingungen (z. B. Teufenlage und herrschender Gebirgsdruck, Fluidruck, rheologische Gebirgseigenschaften, Festigkeitseigenschaften, etc.) zu richten, die unmittelbaren oder mittelbaren Einfluss auf die Ausbildung und Größe der dilatanten Auflockerungszone haben. Für diesen geschädigten Gebirgsbereich können bis dato die für die hydraulische Nachweisführung erforderlichen Parameter Permeabilität und Porosität in Abhängigkeit des Schädigungsgrades nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Ebenso ist deren (zeitliche) Entwicklung in Abhängigkeit der sich ändernden Spannungsrandbedingungen (Aufkriechen des Gebirges, Aufbau eines Porendrucks) nicht hinreichend bekannt. Die hierzu erwarteten Ergebnisse des derzeit laufenden EU-Forschungsprojektes THERESA sind dahingehend auszuwerten.

Die weitere Untersuchung hydromechanischer Effekte (wie z. B. Rissvernetzung/Rissöffnung einer vorgeschädigten Probe bei einem Fluidruck $p > \sigma_{\min}$) erscheint im Rahmen von Laborversuchen unter endlagerrelevanten Randbedingungen sinnvoll, zumal zwangsläufig infolge des Nachschnittes/Spitzens im Bereich des hydraulischen Dichtelementes mit der (Wieder-) Ausbildung einer Auflockerungszone zu rechnen ist.

Mit dem im Abschnitt 4.4 vorgestellten deterministischen Konzept zum ingenieurtechnischen Nachweis der Integrität der Streckenabdichtungen /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007, MAUKE et al. 2006/ steht eine Methodik zur Nachweisführung zur Verfügung, welche auf geplante Streckenabdichtungen im ERAM angewendet wurde und prinzipiell auf Streckenverschlüsse eines HAW-Endlagers Anwendung finden kann.

5 Schachtverschluss

Die Schächte stellen als künstlich geschaffene Verbindung zwischen Biosphäre und Endlagerbergwerk eine zwangsweise Durchörterung der geologischen Barriere dar. Der Schachtverschluss soll die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wiederherstellen. Nach /AkEnd 2002/ kommt daher dem Verschluss der Schächte eine ähnliche Bedeutung hinsichtlich der Langzeitsicherheit zu, wie der Funktion der geologischen Barriere. In /AkEnd 2002/ kommt man zu der Empfehlung:

„Ein Endlagerbergwerk, dessen Sicherheitsnachweis im wesentlichen auf geologischen Barrieren aufbaut, muss in jedem Fall mit einem geotechnischen Bauwerk, dem Schachtverschluss, verschlossen werden.“

Nachdem für den Referenzstandort der Störfall "Lösungszutritt über den Hauptanhydrit" aufgrund der nicht vorhandenen durchgehenden Verbindung des Hauptanhydrites mit dem Deckgebirge ausgeschlossen werden kann, rückt die Konzeption und die Funktion des Schachtverschlusses als einzige durchgehende Verbindung zur Biosphäre weiter in den Mittelpunkt.

Die Hauptfunktion des Schachtverschlusses besteht darin, einen Wasser-/Laugenzutritt vom Deckgebirge ins Endlager nach dessen Schließung zu verhindern, und für den Fall, dass Radionuklide in der Nachbetriebsphase mobilisiert werden, diese durch entsprechende Dichtfunktion, Rückhaltefunktion im Endlager zurückzuhalten. Im Folgenden werden die funktionalen Anforderungen zur Erfüllung dieser Aufgabe zusammengestellt, sowie Schachtverschlusskonzepte vorgestellt.

5.1 Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen

Die funktionalen Anforderungen an die technische Barriere Schachtverschluss ergeben sich sowohl aus der Notwendigkeit der Einhaltung konventioneller und radiologischer Schutzziele (=direkte funktionale Anforderungen), als auch aus den zu erwartenden Einwirkungen sowie prinzipiellen Überlegungen. Auf Grundlage der derzeit gültigen Regeln und Vorschriften für die Verfüllung von Schächten:

- Richtlinien des LOBA NRW für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten, 1983
- /TA Abfall/; Abschnitt 10 „Besondere Anforderungen an UTD im Salzgestein, 1991
- Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik
- Untertagedeponierung besonders überwachungsbedürftiger Abfälle im Salzgebirge, 1993
- Richtlinie des OBA Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten, Teil C, 1996

wurden von /SITZ 2001/ folgende Grundanforderungen an Schachtverschlüsse abgeleitet:

- Schachtverschlüsse müssen Austritte aus dem Grubengebäude in das darüber liegende Deckgebirge verhindern.

- Schachtverschlüsse müssen Zuflüsse in die untertägigen Hohlräume verhindern.
- Eine Vollverfüllung ist anzustreben bzw. verbindlich vorgeschrieben (Salzbergbau).
- Das Setzen der Verfüllsäule ist so gering wie möglich zu halten.
- Maßnahmen sind zu treffen, die ein Auslaufen der Verfüllsäule verhindern.
- Soweit sicherheitstechnisch vertretbar, sind alle Einbauten in Schächten und in den Zugangsstrecken zu entfernen.
- Die eingebauten Konstruktionen müssen langzeitstabil und wartungsfrei sein.

Im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung /DBE 2008a/ wurden zusätzlich folgende funktionale Anforderungen an den Schachtverschluss formuliert und ergänzt:

- standsicher gegen Gebirgsdruck und mögliche Störfallmedien,
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien gegenüber korrosiven Lösungen und Gasen,
- einfache Wirkprinzipien der Bauteile,
- erprobte Komponenten/Bauteile,
- langfristig immer sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit (positiv überkritisches Verhalten).

Die Dichtwirkung sowie die Setzungsarmut der Stützsäule sind direkte funktionale Anforderungen, die übrigen Anforderungen werden aus den zu erwartenden Einwirkungen abgeleitet:

Die beidseitige Dichtwirkung gegenüber einem potentiellen Zutritt von Fluiden von übertage oder aus dem Endlager gewährleistet die Einhaltung des konventionellen Schutzzieles „Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen“ sowie des radiologischen Schutzzieles „Schutz der Biosphäre vor Radionukliden“. Gemäß /DBE 2008b/ ist hierbei der Nachweis der Einhaltung des radiologischen Schutzzieles abdeckend für den Nachweis des Grundwasserschutzes.

Die Setzungsarmut der Stützsäule soll sowohl die Einhaltung des konventionellen Schutzzieles „Schutz der Tagesoberfläche“ gewährleisten, als auch die Lagestabilität und somit die Integrität des aufliegenden Dichtelementes. Damit wird wiederum mittelbar die Einhaltung der Schutzziele „Schutz der Biosphäre vor Radionukliden“ sowie „Schutz des Grundwassers vor schädlichen Verunreinigungen“ gewährleistet.

Spezifizierung der Anforderungen:

Der redundant und diversitär zu den Streckenverschlüssen angeordnete Schachtverschluss ist der sicherheitstechnisch wichtigste Verschluss, da er die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wiederherstellt. Die Gewährleistung seiner Funktion ist über den gesamten Bemessungszeitraum (i.S.v. Lebensdauer) nachzuweisen. Die Dauer des Bemessungs- bzw. Nachweiszeitraumes des Schachtverschlusses ist hierbei vom Zeitpunkt des Erreichens einer hinreichenden Kompaktion des Salzgrusversatzes abhängig, welcher den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleisten soll. Für die im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung /DBE 2008a/ betrachteten Einlagerungskonzepte der gemeinsamen Bohrloch- und Streckenlagerung (Variante 1) sowie der reinen Bohrlochlagerung (Variante 2) lassen sich momentan keine hinreichend genauen Aussagen zum Zeitpunkt des Erreichens

des sicheren Einschlusses und somit auch zum Bemessungszeitraum der Schachtverschlüsse treffen. Der Bemessungszeitraum ist daher offen und wird unter dem gegenwärtigen Kenntnisstand dem gesamten Nachweiszeitraum gleichgesetzt.

In Anlehnung an die Anforderungen an Endlagerdammbauwerke (vgl. /DBE 1994b/) können Anforderungen an die Schachtverschlüsse definiert werden, die sich aus den örtlichen Gegebenheiten und den Belastungsszenarien ergeben. Diese sind für die betrachteten Zeitphasen des Endlagersystems Betriebsphase und Nachbetriebsphase unterschiedlich.

Da mit Fertigstellung der Baumaßnahmen zur Errichtung der Schachtverschlüsse die Betriebsphase des Endlagers endet, beziehen sich alle Anforderungen an die Dichtheit und daraus abgeleiteter Forderungen an den Schachtverschluss (Standssicherheit, Langzeitbeständigkeit, etc.) auf die Nachbetriebsphase des Endlagers. Nach /DBE 1994b/ sind während der Betriebsphase nur Anforderungen hinsichtlich der Errichtung von Endlagerdammbauwerken von Bedeutung. Diese sind auf die Schachtverschlüsse übertragbar und wurden folgendermaßen formuliert:

- *“... Die Endlagerdammbauwerke sind so frühzeitig vor Ablauf der Betriebsphase zu errichten, dass mit Beginn der Nachbetriebsphase ihre Dichtfunktion sichergestellt ist.*
- *Die Endlagerdammbauwerke sind im Rückbau zu errichten und so zu planen, dass sie unter der Bedingung von nur einseitiger Zugänglichkeit hergestellt werden können.*
- *Die Endlagerdammbauwerke müssen in Form, Material, Aufbau etc. so hergestellt werden, dass sie den Anforderungen bezüglich ihrer Gebrauchsfähigkeit (technische Dichtigkeit) genügen. ...“*

Hinsichtlich des letzten aufgeführten Punktes ist die Anwendung qualitätsgesicherter Verfahren zu beachten.

In der Nachbetriebsphase ergeben sich die Anforderungen aus der erforderlichen Dichtfunktion sowie der Forderung nach Setzungsstabilität der Dichtkörper-Widerlager (Stützsäule), vgl. o. g. Aufzählung. Die Anforderungen gelten für die transiente und monotone Phase gleichermaßen. Da nach Ende der monotonen Phase die Versatzkompaktion abgeschlossen ist und ein sicherer Einschluss vorliegt, erwachsen aus der sich anschließenden stationären Phase (= stabiler Endzustand) für die ungestörte Entwicklung zwar keine Anforderungen an die Dichtwirkung des Schachtverschlusses. Jedoch ist hierbei die Aufsättigung der aus dem Deckgebirge zusitzenden Wässer zu gewährleisten (z. B. im mit Salzgrus versetzten Infrastrukturbereich zwischen unterer Füllsäule und Streckenverschluss), um ein Vordringen der Lösungen zu den – zu diesem Zeitpunkt sicher eingeschlossenen Abfällen zu verhindern. Daher ist selbst unter Annahme des sicheren Einschlusses bei vollständiger Versatzkompaktion für die Zeitpunkte nach Ablauf des Bemessungszeitraumes der Schachtverschlüsse (= Dichtwirkung im Rahmen eines konservativen Ansatzes vernachlässigt) eine ausreichend niedrige Ablaugarate des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nachzuweisen. Dies erfordert beispielsweise die Betrachtung der Stabilität der sich einstellenden Fluid-Dichteschichtung im Bereich der permeablen Stützsäule gegenüber einem geothermisch induzierten potentiellen Strömungs- und Ablaupungsprozess. Hier können Konvektionsbewegungen nur ausgeschlossen werden, wenn die Grubenbaue versetzt sind.

Für die stationäre Phase lassen sich unter Annahme der ungestörten Endlagerentwicklung nur Anforderungen hinsichtlich der Setzungsarmut der Stützsäule ableiten, die der Einhaltung des konventionellen Schutzzieles „Schutz der Tagesoberfläche“ dient.

Im Falle der gestörten Endlagerentwicklung (kein sicherer Einschluss / Lösungszutritt an die Abfälle) sind durch die hydraulischen Widerstände von Strecken- und Schachtverschlüssen die Volumenströme an kontaminierter Lösung derart zu minimieren, dass die radiologischen Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden. Nach /DBE 1994b/ werden in der Nachbetriebsphase die zu unterstellenden endlagerseitigen Fluiddrücke durch folgende abdeckende Szenarien bestimmt:

- Zutritt von Lösungen mit unbegrenzten Zuflussvolumina in den Einlagerungshorizont: hydrostatischer Teufendruck (Wegsamkeit bis zur Biosphäre).
- Zutritt von Wässern mit begrenzten Zuflussvolumina (sog. Lösungseinschlüsse) in den Einlagerungshorizont: Infolge auflaufender Konvergenz und Abnahme des für die Aufnahme der Fluide zur Verfügung stehenden Resthohlraumvolumens ist konservativ als maximaler Fluiddruck der petrostatische Teufendruck zu unterstellen (Wiederherstellung des primären Gebirgsspannungszustandes).

Der maximale biosphärenseitige Fluiddruck entspricht daher dem hydrostatischen Laugendruck /WAGNER 2005/. Als maximaler endlagerseitiger Druck auf das Schachtverschlussbauwerk ist (hypothetisch für impermeable Verschlüsse) ein Fluiddruck bis maximal zur Größe des petrostatischen Druckes infolge auflaufender Konvergenz möglich /WAGNER 2005/.

Die Schachtverschlüsse sind außerdem tragsicher gegenüber dem anstehenden Gebirgsdruck auszulegen. Dieser ergibt sich aus dem petrostatischen Teufendruck unter Berücksichtigung von möglichen Spannungsumlagerungen /DBE 1994b/.

Für die im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung /DBE 2008a/ betrachteten Einlagerungskonzepte der gemeinsamen Bohrloch- und Streckenlagerung (Variante 1) sowie der reinen Bohrlochlagerung (Variante 2) lassen sich keine Unterschiede in der Funktion der Schachtverschlüsse herleiten. Da jedoch bei Variante 2 infolge der schnelleren Versatzkompaktion von einem früheren Zeitpunkt des sicheren Einschlusses ausgegangen werden kann, differieren die entsprechenden, noch zu spezifizierenden Bemessungszeiträume für Schachtverschlüsse.

5.2 Darstellung eines Barrierendesigns zur Erfüllung der funktionalen Anforderungen

Im Folgenden werden verschiedene vorgesehene Konzepte und Planungen zu Schachtverschlüssen von Endlagern kurz vorgestellt. Die dargestellten Konzepte beinhalten - ähnlich wie beim Streckenverschluss - Abdichtbauteile wie auch stützende/tragende Bauteile. Jedoch unterscheiden sie sich z. T. deutlich in der Anordnung dieser Elemente sowie den hierfür zum Einsatz kommenden Materialien. Die Großzahl der Konzepte verfügt über redundante Verschlussysteme mit diversitären Dichtelemente und Verschlussbaustoffen.

Im Folgenden werden auch Schachtverschlusskonzepte von Endlagern für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle bzw. aus dem klassischen Kali- und Steinsalzbergbau aufgeführt, da prinzipielle Grundsätze, wie z. B. Redundanz und Diversität der Dichtelemente übertragbar sind. Ein detailliertes Referenzkonzept eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager liegt momentan nicht vor.

5.2.1 Konzept eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager in Salz, 1998

Abbildung 5-1 zeigt das Prinzip eines solchen Schachtverschlusses mit Trennung von abdichtenden und stützenden/tragenden Bauteilen (nach /DBE 1998/). Auf eine Verfüllsäule aus setzungsarmem Material (z. B. Schotter) wird im Bereich kurz unterhalb des Salzspiegels ein Abdichtelement vorgesehen. Das setzungsarme Material kann Schotter sein, für die Abdichtung kommen sowohl Asphalt, Bitumen als auch Bentonite in Frage. Im Bereich des Abdichtelementes ist das Entfernen der Auflockerungszone vorgesehen. Je ein Widerlager im Liegenden und Hangenden der Abdichtung soll der Aufnahme der Gebirgs- und Fluidrückstände dienen, sowie die Lagestabilität der Kerndichtung gewährleisten. Die symmetrische Anordnung der Widerlager resultiert aus der geforderten beidseitigen Dichtwirkung gegenüber potentiellen Fluiden aus dem Endlager sowie von übertage.

Das Konzept sieht kein Ausrauben der Schachtröhre im Deckgebirgsbereich vor (wassererführende Schichten). An das Verfüllmaterial in diesem Bereich wurden keine Anforderungen hinsichtlich der Dichtheit gestellt, d. h. es existiert kein Dichtelement gegen die Zuflüsse aus dem Deckgebirge.

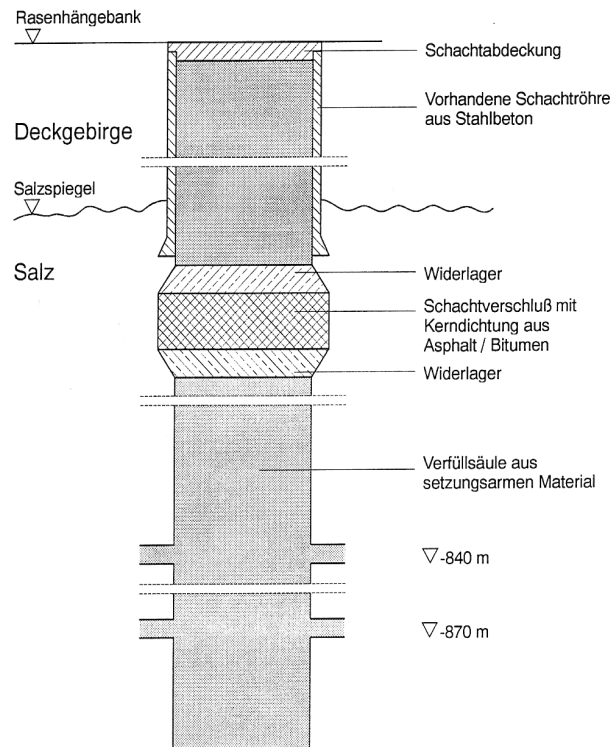


Abbildung 5-1: Prinzip eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager in Salz (nach /DBE 1998/)

5.2.2 Vorschlag eines Schachtverschlusses für ein Endlager im Salz (nach /SITZ 2001/)

Auf Basis des derzeitigen Entwicklungsstandes von Schachtverschlüssen, den Untersuchungen an Spülversatz und dem erfolgreich abgeschlossenen in-situ Großversuch Schachtverschluss Salzdetfurth (vgl. /BREIDUNG 2002/, sowie Abschnitt 5.3.1) wurde durch /SITZ 2001/ ein Vorschlag für den Verschluss von Endlagerschächten entworfen. Der prinzipielle Aufbau des Verschlusskonzeptes ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Zum Einsatz kommt demnach für die unterste Füllsäule als arteigenes Material Spülversatz (u. U. Schotter). Darauf folgt ein Dichtelement im Salinar aus hochkompaktiertem Bentonit, das gegen Zuflüsse aus dem Grubengebäude abdichten soll. Im Übergangsbereich von Salinar und Hutgestein wird ein schotterstabilisiertes und dichtegeschichtetes Asphalt-dichtelement vorgesehen, um dem möglichen Fluidruck von unten zu widerstehen. Zum Schutz gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge wird im Bereich Hutgestein/Deckgebirge ein Dichtelement aus Ton und Bentonit angeordnet. Die obere Füllsäule bis zur Tagesoberfläche soll aus einem Gemisch aus Schotter, Sand, Kies und Mineralgemisch hergestellt werden.

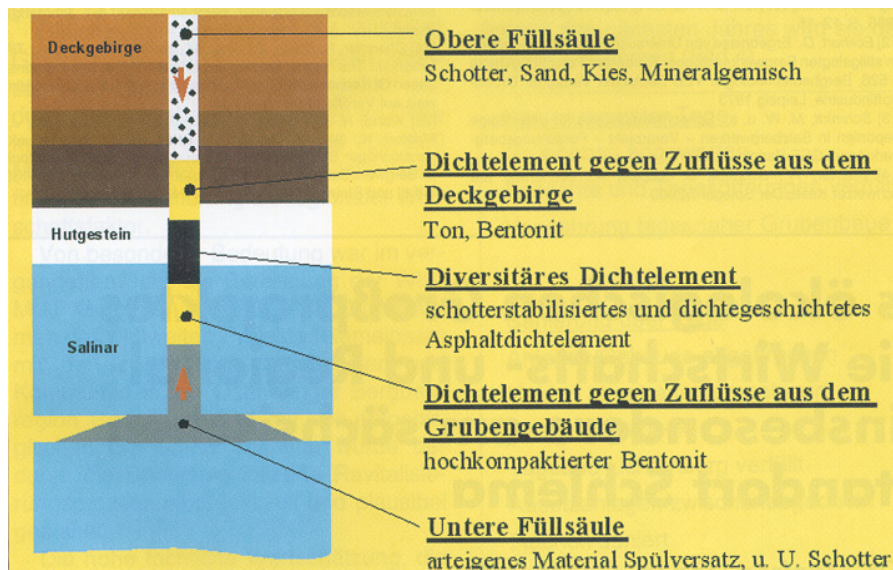


Abbildung 5-2: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar (nach /SITZ 2001/)

Für die Trockenverwahrung von Salzbergwerken, die nur gegenüber dem Flüssigkeitsdruck von oben auszulegen sind, sollte nach /SITZ 2001/ das Verfüllkonzept ähnlich aussehen. Es könnte jedoch auf die zusätzliche Anordnung von Asphaltdichtungen verzichtet werden. In Abbildung 5-3 ist ein entsprechender Vorschlag dargestellt, so wie er für trocken zu verwahrende Schächte im Werra-Gebiet nach /SITZ 2001/ zum Einsatz kommen könnte. Ein ähnlicher Vorschlag mit 2 Dichtelementen wurde von /Schmidt et al. 1996/ unterbreitet, wobei das obere Dichtelement unterhalb der Salinargrenze sitzt. Die zuzitenden Wässer aus dem Hangenden müssen daher zunächst über eine Verfüllsäule mit Salzzugabe (Salzgrus) – welche sich zwischen dem Salzspiegel und dem Ende des wasserdichten Ausbaus befindet – aufgesättigt werden. Von /SCHMIDT et al. 1996/ wurde noch keine Vorfestlegung auf Materialien getroffen.

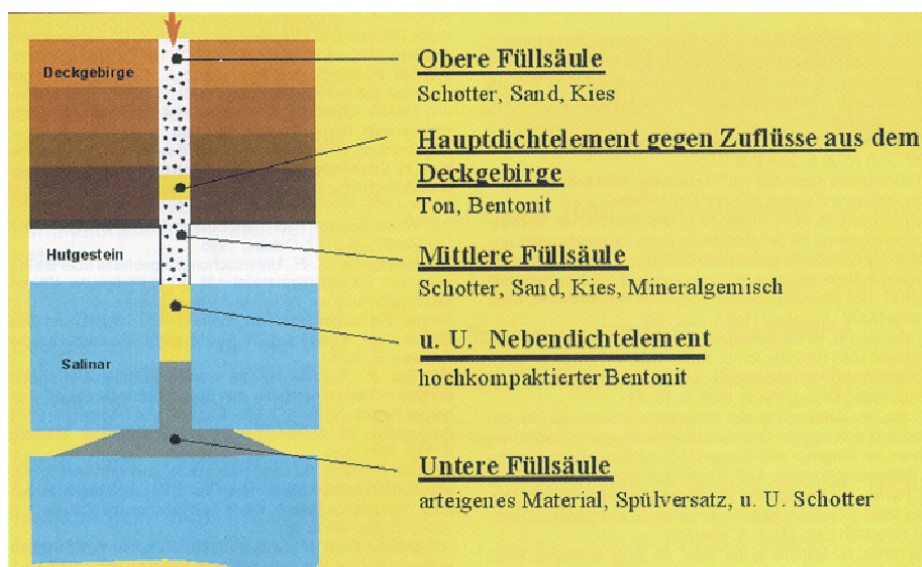


Abbildung 5-3: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept zur Trockenverwahrung von Bergwerken (nach /SITZ 2001/)

5.2.3 Konzept der Schachtverschlüsse für die WIPP-Site (USA)

Für die WIPP-site (Waste Isolation Pilot Plant, New Mexico, USA) - ein LLW-Endlager im Salz, flache Lagerung - wurden Pläne zum Verschluss der Schächte entwickelt, um damit eine langfristige Abdichtung der Verbindungen zur Biosphäre zu erreichen. Nach /SANDIA 2002/ besteht die Aufgabe der Schachtverschlusssysteme darin, das Eindringen von Wasser in die bestehenden Schächte nach der Endlagerstilllegung und das Austreten von Radionukliden durch die Schächte zu begrenzen. Das Endlager befindet sich in 650 m Teufe im Salz, in der sogenannten Salado Formation, die ab einer Teufe von 255 m beginnt. Darüber befinden sich zwei jeweils etwa 100 m (Rustler Formation) bzw. 160 m (Dewey Lake Redbeds) mächtige Formationen, die unterschiedliche Lagen von Salzen und Sedimenten beinhalten und zum Teil wasserführend sind. Das Endlager ist über 4 Tagesschächte erschlossen. Es gibt getrennte Schächte für Frischwetter, für Abwetter, für Abfallgebindertransport und für Haufwerkstransport. Die Schächte sind von der Tagesoberfläche bis in die Endlagerformation als Stahlbetonröhren, im Schacht für Haufwerkstransport teilweise mit Stahlmantel, ausgebaut. Die lichten Durchmesser betragen in einem Fall ca. 3,5 m, sonst ca. 7 m.

Für die Verfüllung aller vier Schächte wurden einheitlich folgende qualitative Auslegungsrichtlinien definiert:

- Begrenzung der Radionuklidfreisetzung zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte
- Verhinderung von Grundwasserströmung durch das Dichtungssystem
- Verwendung von Materialien, die mechanisch und chemisch stabil sind
- Vorsorge gegen Verlust der Tragfähigkeit von Systemkomponenten
- Begrenzung der Setzungen und Verhinderung von unbeabsichtigter Einwirkung Dritter
- Anwendung von bekannten Herstellverfahren und Baustoffen

Für alle Schächte ist die gleiche konservative und redundant ausgelegte Verfüll- und Verschlusskonzeption vorgesehen. Durch die Verwendung von verschiedenen Abdichtungskomponenten aus unterschiedlichen Materialien sollen Unsicherheiten bei der gewählten Auslegung der Schachtverfüllungen reduziert werden.

Die Schachtverfüllung besteht aus 13 Elementen, die den jeweiligen Schacht vollständig mit Baustoffen hoher Dichte und geringer Permeabilität füllen.

- Das untere Ende des Schachtes wird bis über das Füllort zum Einlagerungsbereich mit einer auslaufsicheren Schüttung verfüllt.
- Das Dichtsystem in der Salado Formation stellt die hauptsächliche Barriere dar und soll den Flüssigkeitszutritt und -austritt aus dem Endlager für 10.000 Jahre begrenzen. Für die Salado Salzformation ist eine Kombination von Verfüllungen mit Salzgrus und Bentonit und zwischengeschalteten Betonpfropfen vorgesehen. Auf die Füllortverfüllung wird zunächst eine kompaktierte Tondichtung von 30 m Länge gestellt. Darüber folgt ein zweiteiliger Betonpfropfen mit zwischengeschichteter Asphaltabdichtung. Hierauf folgt eine kompaktierte Salzgrusschicht von ca. 170 m. Danach wird wieder ein zweiteiliger Betonpfropfen mit zwischengeschichteter Asphaltabdichtung angeordnet. Anschließend ist ein ca. 100 m Abschnitt mit kompaktiertem Bentonit vorgesehen, gefolgt von einem zweiteiligen Betonpfropfen mit Asphaltzwischenabdichtung. Der Übergang von der Salado zur Rustler

- Formation wird mit einer ca. 40 m mächtigen Asphaltsäule gefüllt und mit einem einfachen Betonpfropfen abgeschlossen.
- Die Dichtungen in der Rustler Formation sollen den Zufluss von Wässern aus den wasserführenden Schichten in dieser Formation begrenzen. In diesem Bereich wird die Schachtröhre aus Stahlbeton zu großen Teilen entfernt, um eine bessere Anbindung der Dichtung an das Gebirge zu erreichen. Die Dichtung besteht aus einer ca. 70 m mächtigen Füllsäule aus kompaktiertem Bentonit.
 - Der Schachtbereich in den oberen Sedimentschichten wird mit einer ca. 140 m mächtigen kompaktierten Haufwerkssäule verfüllt. Darauf folgt ein Betonpfropfen und eine abschließende ca. 20 m mächtige Restverfüllung mit kompaktiertem Haufwerk bis zur Tagesoberfläche.

In Abbildung 5-4 ist der Längsschnitt durch den Schacht mit den 13 Verfüll- und Abdichtelementen dargestellt.

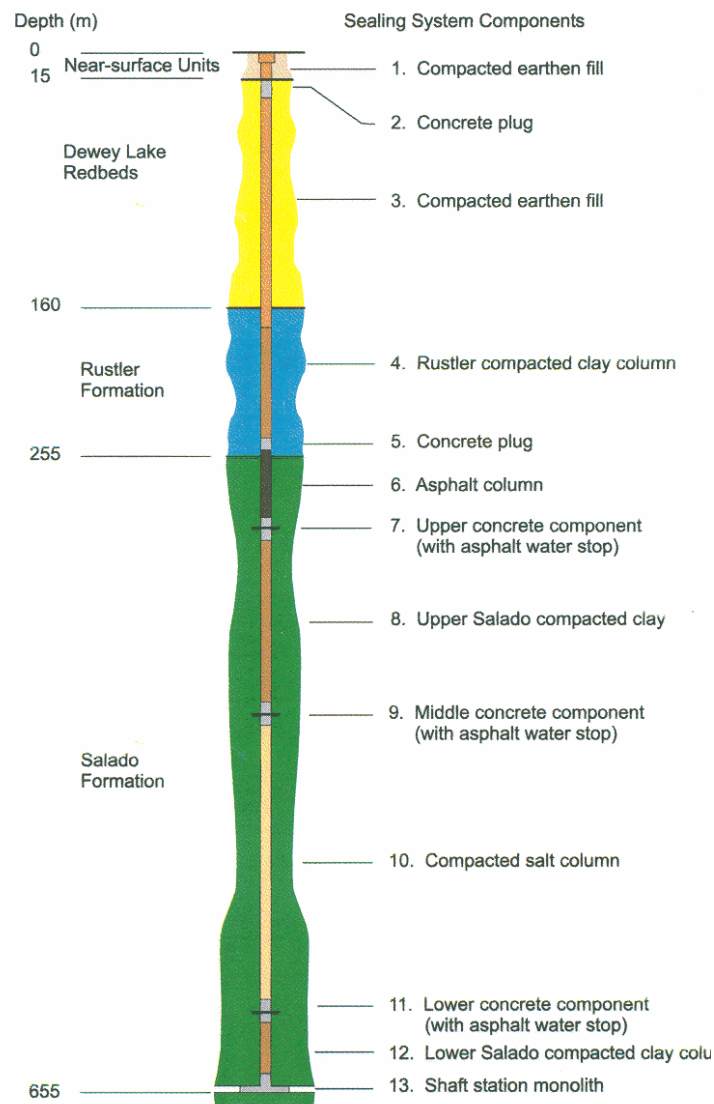


Abbildung 5-4: Planung zur Verfüllung und Abdichtung der 4 Tagesschächte für das amerikanische Endlager WIPP (nach /SANDIA 2002/)

5.2.4 Konzept der Schachtverschlüsse für das ERAM

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfallstoffe Morsleben (ERAM) wurde ein Konzept für die Verfüllung und den Verschluss der beiden Schächte Marie und Bartensleben erarbeitet. Nach /RAUCHE et al. 2004/ haben die Schachtverfüllungen in Verbindung mit der Begrenzung der Auflockerungszone die Aufgabe, den Zutritt des Transportmediums Wasser aus oberflächennahen wasserführenden Schichten zu den radioaktiven Abfällen zu begrenzen, eine Radionuklidfreisetzung aus dem vollgelaufenen Endlager über die Schächte auf ein zulässiges Maß zu minimieren sowie zur Stabilisierung der Schächte beizutragen. Folgende Anforderungen an das Verschlusssystem wurden definiert:

- Nachweis der Wirksamkeit des Verschlusssystems über einen Zeitraum von 30.000 Jahren
- Verschluss- und Verfüllmaterialien müssen langzeitstabil sein
- Die Materialauswahl ist den unterschiedlichen Gebirgsverhältnissen und -eigenschaften zweckmäßig anzupassen
- Die Materialien sind so zu wählen und kombinieren, dass die in der Langzeitsicherheitsanalyse geforderte Barrierewirkung (maximaler Volumenstrom $2 \text{ m}^3/\text{a}$) erreicht wird
- Durch das Entfernen von Auflockerungszonen sollen mögliche Umläufigkeiten zwischen Gebirge und Dichtelementen begrenzt werden

An Hand dieser Anforderungen, den gültigen Vorschriften zur Schachtverwahrung und unter Berücksichtigung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse an den Schachtstandorten wurde für die Verfüllung der Schächte Marie und Bartensleben ein im Grunde gleiches Verschlusssystem gewählt. Dabei wurde großer Wert auf die Redundanz der Verschlusssysteme, die Diversität der Dichtelemente und Verschlussbaustoffe sowie die funktionale Trennung von statischen und dichtenden Aufgaben gelegt. Das Verschlusssystem besteht aus folgenden Elementen /RAUCHE et al. 2004/:

1. eine obere Verfüllsäule

Die obere Verfüllsäule dient zur Stützung des Schachtes im Deckgebirge und wird aus einem setzungsarmen Mineralgemisch hergestellt. Die hydraulische Leitfähigkeit des Mineralgemisches liegt im Bereich der niedrigsten Leitfähigkeit des Deckgebirges.

2. ein mehrteiliges Dichtelementesystem

a) Dichtelement 1

Durch das Dichtelement 1, das aus Bentonit hergestellt wird, werden die Grubenbaue gegen Zuflüsse aus dem Deckgebirge abgedichtet. Die Quellsfähigkeit des Bentonit bewirkt eine Abdichtung des Schachtquerschnittes und der Kontaktfuge zwischen Dichtelement und anstehendem Gebirge.

b) Kombiniertes Widerlager-Dichtelement 2

Der Lastabtrag aus oberer Verfüllsäule und Dichtelement 1 ins Gebirge erfolgt durch den Schotter des kombinierten Widerlager-Dichtelementes 2. Der Porenraum des

Schotter wird mit Asphalt/Bitumen gefüllt, so dass ein Zufluss von Deckgebirgswässern verhindert wird. Das Asphalt/Bitumen-Gemisch wirkt als redundante und diversitäre Dichtung zum Dichtelement 1 (Bentonit).

c) Asphaltsicherung

Die Asphaltsicherung soll dauerhaft die beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente 2 und 3 voneinander trennen. Sie besteht aus Ton, der zwischen zwei Filterschichten angeordnet wird.

Die obere Filterschicht besteht aus Feinsand, die untere aus abgestuftem Schotter, Sand und Feinsand. Damit die Tonschicht zwischen den beiden Filterschichten nicht austrocknet, wird die obere Filterschicht mit Lauge versetzt und die untere Filterschicht mit Asphaltplatten überdeckt.

d) Kombiniertes Widerlager-Dichtelement 3

Das kombinierte Widerlager-Dichtelement 3 ist wie das Widerlager-Dichtelement 2 ausgelegt. Es dichtet den Schacht gegen Lauge aus dem Grubengebäude und trägt die Lasten von unten ins Gebirge ab.

3. eine untere Widerlagersäule (Stützsäule)

Die untere Widerlagersäule wird aus einer setzungsarmen Hartgesteinsschottersäule hergestellt, die gegen Auslaufen in die Füllörter gesichert wird. Der obere Bereich des unteren Widerlagers (Asphaltsicherung) wird mit einer Zementsuspension verfestigt, damit darüber liegendes Material des Dichtelementesystems nicht eindringt (fungiert als Asphaltsicherung).

5.3 Beschreibung der Barriere und ihrer Komponenten / Ermittlung des Standes der technischen Machbarkeit

Die in Abschnitt 5.2 dargestellten Konzepte berücksichtigen eine Trennung von stützenden und abdichtenden Bauteilen. Der Langzeitbeständigkeit der hierfür verwendeten Baustoffe gilt besonderes Augenmerk. /SITZ 2001/ verweist in diesem Zusammenhang auf die möglichen Ungenauigkeiten bei der Vorausberechnung von Materialverhalten über lange Zeiträume (10.000 bis 100.000 Jahre) und empfiehlt die Nutzung der natürlichen und historischen Analoga als Ergänzung zu Experimenten und darauf aufbauenden Berechnungen. Folgende Baustoffe und Materialien werden genannt für die im Salinar auf diese Weise ihre Langzeitbeständigkeit nachgewiesen wurde: Tone, Bentonite, Asphalte, Bitumen und Injektionsmaterialien für den Einsatz als Dichtmaterialien, Spülversatz aus salinaren Komponenten, Salzgrus, Salzblöcke, schüttfähige Hartgesteine und Naturwerksteine als Trag-/Stützmaterialien. Die salinaren Baustoffe besitzen hierbei die Besonderheit, infolge ihrer rheologischen Eigenschaften (bzw. chemisch-mineralogischen Eigenschaften im Falle der provozierten Mineralgenese) unter bestimmten Randbedingungen sowohl stützend, als auch abdichtend wirken zu können. Der Einbau und die hierfür verwendete Technik ist vom Verschlusskonzept abhängig.

Im Rahmen eines FuE-Vorhabens wurde der Nachweis der technischen Realisierbarkeit und der Funktionstüchtigkeit eines setzungsarmen und flüssigkeitsdichten Schachtverschlusskonzeptes im Salinar unter definierten Randbedingungen erbracht. Die Hauptelemente des Schachtverschlusskonzeptes waren eine setzungsstabile Schottersäule als statisches Widerlager und der Einsatz von Bentonit als Material für das Dichtelement. In in-situ Versuchen wurde im Bergwerk Salzdetfurth die Dichtwirkung eines Bentonit - Dichtelementes (Bohrschachtversuch) und das Setzungsverhalten einer Schottersäule (Schächte I und II), die mit Hilfe einer Kübelförderung eingebaut wurde, untersucht. In Ergänzung zu diesen Versuchen wurde zusätzlich die Setzungsstabilität einer über eine Fallleitung eingebrachten Schottersäule auf dem Bergwerk Bergmannsseggen-Hugo untersucht.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der o. g. in-situ Versuche kurz dargestellt. Darüber hinaus werden Erfahrungen von /BODENSTEIN et al. 2002/ wiedergegeben, die während Planung und Bau von Schachtverschlüssen im Südharz-Kalirevier gewonnen wurden. Die Erfahrungen resultieren aus der Verfüllung und Abdichtung von 19 Tageschächten nach dem Stand der Technik, wobei Vorgaben des Bundesberggesetzes und die standortspezifischen geologischen und bergbaulichen Bedingungen berücksichtigt werden mussten.

5.3.1 Dichtelement

Erfahrungen aus Planung und Bau von Schachtverschlüssen

Bei der von /BODENSTEIN et al. 2002/ beschriebenen Verwahrung von Kalischächten im Südharz-Kalirevier wurden die Konzepte entsprechend der Schutzziele für jedes einzelne Bergwerk ausgerichtet.

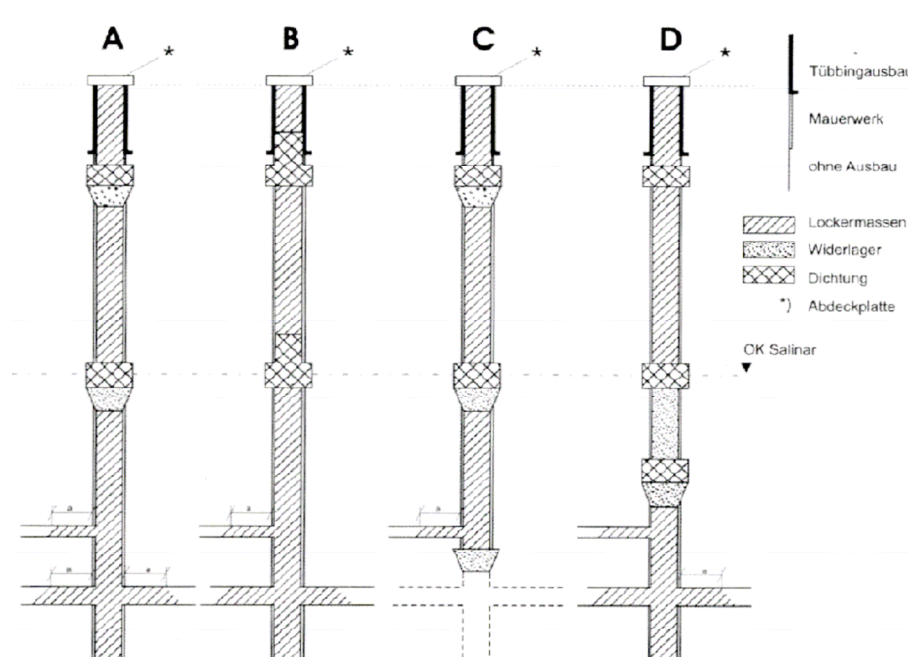
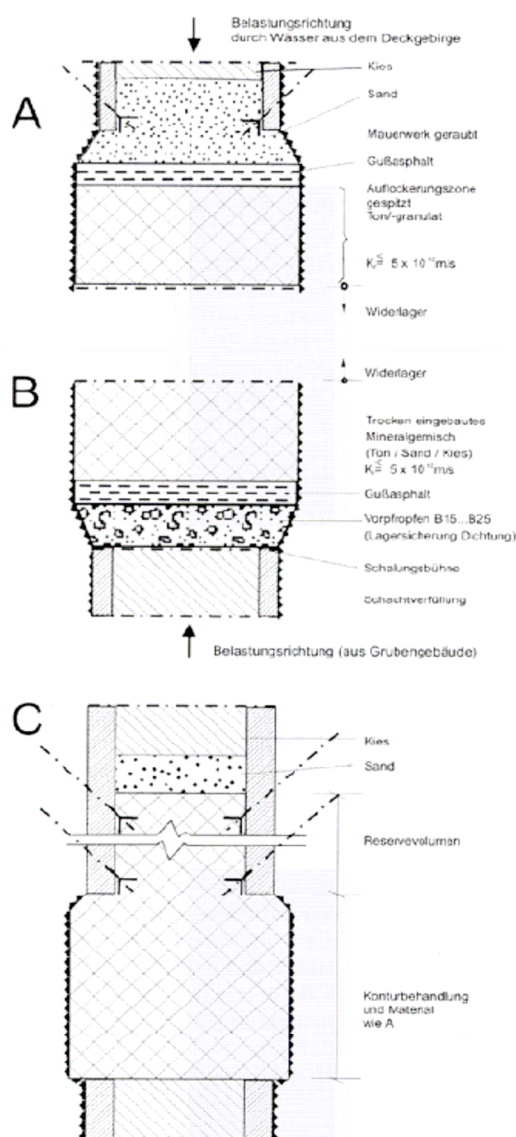


Abbildung 5-5: Arten von Schachtverwahrungen und Anordnung der Dichtelemente (nach /BODENSTEIN et al. 2002/)

Laut /BODENSTEIN et al. 2002/ lassen sich die ausgeführten 19 Schachtverwahrungen in vier unterschiedliche Gruppen einordnen (siehe Abbildung 5-5):

- A: Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule, Dichtungen im Bereich des Salzspiegels und unterhalb des wasserabdichtenden Tübbingausbaus, Lagesicherung der Dichtungen durch Widerlager
- B: Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule mit integrierten Dichtungen einschließlich Reservevolumina
- C: Teilverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule auf Widerlager, Dichtungen analog A
- D: Totalverfüllung in Form einer geschichteten Verfüllsäule, Dichtungen wie A, zusätzliche Dichtungen gegen aufsteigende Medien

Erfahrungen zeigten, dass die Bereiche in den Schachtröhren, in denen die Dichtungen und Widerlager positioniert werden sollen, sorgfältig erkundet (abgetastet) werden müssen /BODENSTEIN et al. 2002/.



Bei der Planung der Schachtverschlüsse wurde auf Basis der jeweils gültigen Vorschriften und Verordnungen für die Dichtungen folgendes Grundprinzip angewandt. Durch geeignete Materialauswahl und Dimensionierung sollten Barrieren entstehen, die den an der Einbaustelle vorhandenen natürlichen Bedingungen nahe kommen und dabei einen k_f -Wert von $\leq 5 \times 10^{-10}$ m/s einhalten. Dementsprechend bestehen die bisher geplanten Dichtungen aus einer Tonpackung unterschiedlicher Ausbildung und zumeist einer druckseitig angeordneten Asphalt-schicht. Die Tonpackung wurde widerlagerseitig mit Sand abgemagert. Gestaffelte Filterschichten werden beim Übergang von der Dichtung zum Verfüllmaterial vorgesehen. Abbildung 5-6 zeigt die für die vorgenannten Schachtverschlussgruppen gewählten Dichtungsarten.

Abbildung 5-6: Aufbau der Dichtungen für die vorgenannten Schachtverwahrprinzipien (nach /BODENSTEIN et al. 2002/)

Untersuchungen zum Dichtelement im Rahmen eines in-situ-Versuches (Bohrschachtversuch Salzdetfurth)

Im Rahmen eines in-situ Großversuchs - dem sog. Bohrschachtversuch in Salzdetfurth - erfolgten Untersuchungen an einem Dichtelement aus hochkompaktiertem Bentonit /BREIDUNG 2002/. Für den Versuch wurden im Bergwerk Salzdetfurth in einem Bohrschacht mit 2,5 m Durchmesser zwei durch eine Druckkammer getrennte Dichtelemente von 5 m bzw. 5,5 m Länge mit Bentonittrockendichten von $1,70 \text{ g/cm}^3$ bis $1,75 \text{ g/cm}^3$ eingebaut. Für die Herstellung der Dichtelemente wurde ein hochkompaktiertes binäres Bentonitgemisch aus Ca-Bentonit (Calcigel der Südchemie AG) in Form von Briketts und Granulat eingesetzt /BREIDUNG 2002/; /SITZ et al. 2003a/.

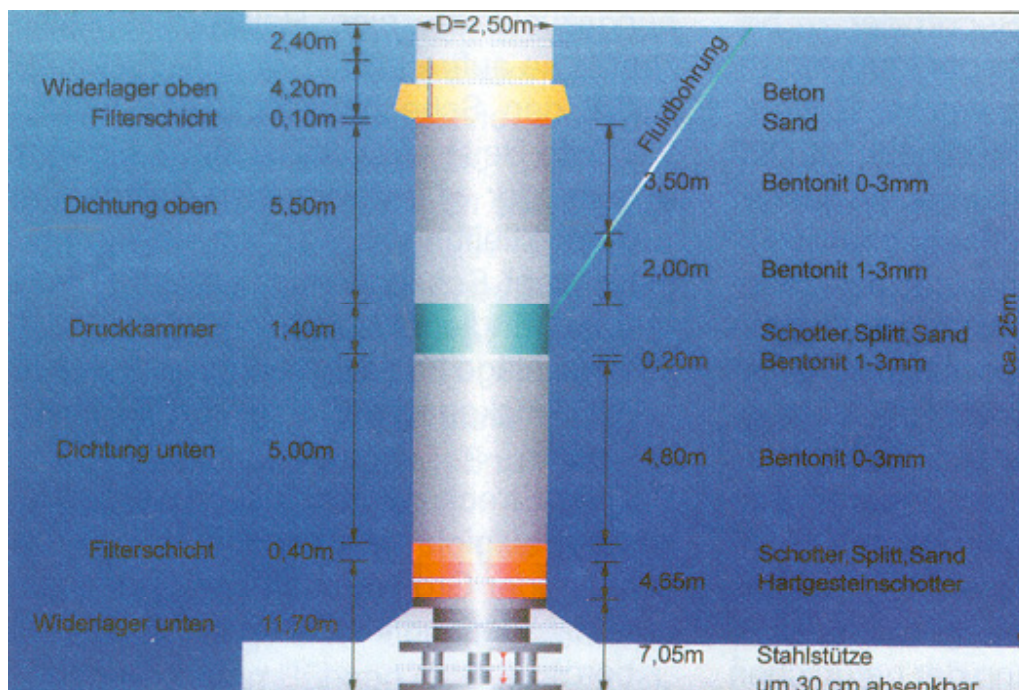


Abbildung 5-7: Bohrschachtversuch in Salzdetfurth zur Untersuchung von Dichtelementen mit binärem Calciumbentonit (nach /BREIDUNG 2002/)

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 5-7 dargestellt und bestand von unten ausgehend aus:

- dem unteren Widerlager (Schottersäule), auf einer Stahlkonstruktion gegründet
- der Filterschicht zwischen dem unteren Widerlager und der unteren Bentonitdichtung
- der unteren Bentonitdichtung
- der Druckkammer
- der oberen Bentonitdichtung
- der Drainageschicht und
- dem oberen Widerlager aus Beton.

Die untere Dichtung wurde mit Granulat 0-3 mm über 4,80 m und darüber in einer Schicht von 0,2 m mit Granulat 1-3 mm ausgeführt. Die obere Dichtung bestand über 2 m mit Granu-

lat 1-3 mm und über 3,5 m mit Granulat 0-3 mm. Die Flüssigkeitszuführung erfolgte über eine geneigte Bohrung in die Druckkammer. Als Fluid wurde gesättigte NaCl-Lösung verwendet. Das Eindringen von Bentonit in die Schichten der Druckkammer wurde durch in der Körnung abgestufte Materialien (Schotter, Splitt und Feinsand) verhindert /BREIDUNG 2002/.

Auf Grund der geforderten Einbaudichte von mindestens $1,6 \text{ t/m}^3$ wurden Briketts und Granulat lagenweise eingebracht und mit Hilfe eines Rüttlers intensiv durchmischt und verdichtet. Die Auslegung der Dichtung erfolgte für einen Flüssigkeitsdruck von 7 MPa. Das Versuchsprogramm sah eine stufenweise Belastung bis auf 4 MPa und anschließend auf 7 MPa mit Konstanthaltungsphasen vor. In das Belastungsregime war eine provozierte Flutung eines Teils des oberen Dichtelementes integriert. Aus diesem Grunde war der untere Abschnitt des oberen Dichtelementes über eine Länge von 2 m mit Granulat 1-3 mm ausgeführt. Dies entspricht nicht den in der Praxis auftretenden Bedingungen. Dadurch sollte ein Zeitraffereffekt bzw. eine schnelle Sättigung eines Teiles des trocken eingebauten Dichtelementes erreicht werden /BREIDUNG 2002/.

Im Verlauf des Versuches traten mehrfach Druckabfälle in der Druckkammer auf, die auf Bildung von Wegsamkeiten im oberen Dichtelement infolge der schnellen Flutung in der Anfangsphase zurückzuführen waren. Im Verlauf des Versuches konnte gezeigt werden, dass die Wegsamkeiten nach Wartezeiten durch Aufbau von Quelldruck verheilten. Es wurden Quelldrücke von bis zu 1,2 MPa nachgewiesen /Manthee et al. 2002/. Im Ergebnis des Versuches konnte gezeigt werden, dass beide Dichtelemente einem Druck von 7 MPa über 100 Tage stand hielten /Breidung 2002/. In Abhängigkeit der Aufsättigung entwickelte der Bentonit einen Quelldruck der ausreichend war, um die geforderte Abdichtwirkung zu erreichen.

Die geforderte mittlere hydraulische Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ wurde eingehalten; der im Versuch ermittelte Wert betrug $4,4 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$.

Ableitung von Ergebnissen aus dem in-situ-Versuch (Bohrschachtversuch)

Nach /BREIDUNG 2002/ sind folgende Kriterien Voraussetzung für die Realisierung eines langzeitstabilen Dichtelementes im Salinar:

A Standortauswahl und vorbereitende Maßnahmen

- Auswahl von Schachtabschnitten mit intaktem Steinsalz (geologische und geotechnische Begutachtung)
- Quantifizierung der Auflockerungszone durch Permeabilitätsmessungen
- Herstellen einer glatten Kontur am Schachtstoß im Bereich des Dichtelementes

B Einbau des Dichtelementes

- Referenzmaterial für Dichtelemente im Salinar ist das im Vorhaben entwickelte und im Bohrschachtversuch erfolgreich getestete binäre Ca-Bentonit-Gemisch.
- Die Dimensionierung des Dichtelementes erfolgt in Abhängigkeit vom erwarteten Flüssigkeitsdruck, dem zugelassenen Volumenstrom (der geforderten Dichtheit), dem Schachtdurchmesser, der Permeabilität des Schachtstoßes, des erforderlichen Quelldruckes sowie von möglichen axialen Verschiebungen (Auflockerungen). Ergebnis dieser

Dimensionierung ist die erforderliche Einbautrockendichte des Dichtmaterials (in der Regel $> 1,6 \text{ t/m}^3$) und die notwendige Länge.

- Vermeidung schlagartiger Belastung ungesättigter Bereiche des Dichtelementes mit hohen Fluidrücken durch Vorschalten von Bentonit-Zuschlagstoffgemischen, die so eingestellt werden, dass eine stufenweise Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit erfolgt. Auf diese Weise werden schon bei geringen Flüssigkeitsdrücken gesättigte Bereiche ausgebildet, die als „Schutzschichten“ die reine Bentonitdichtung vor schlagartigen Belastungsdrücken abschirmen.
- Positionierung des Dichtelementes zwischen zwei setzungsstabilen Widerlagern aus Schotter (Vermeidung von Auflockerungen)

Nach /MANTHEE et al. 2002/ wurde durch die Ergebnisse des Bohrschachtversuches der Nachweis erbracht, dass aus dem entwickelten binären Gemisch und bei qualitätsgerechtem Einbau flüssigkeitsdichte Schachtverschlüsse errichtet werden können. Es wurde gezeigt, dass sich bei konstantem Flüssigkeitsdruck (Enddruck) und NaCl-Lösung mit zunehmender Belastungszeit die Dichtwirkung verbessert und das System einen Gleichgewichtszustand erreicht. Diese Erkenntnisse sind auf alle zukünftigen Schachtverschlüsse im Salinar übertragbar.

Langzeitstabilität

Die Frage der Beständigkeit von mineralischen Dichtmaterialien unter salinaren Bedingungen wurde von /SITZ et al. 1998/ im Rahmen eines Forschungsvorhabens ermittelt. Damit liegen Daten vor, die als Planungsgrundlagen für Schachtverschlusskomponenten verwendet werden können. Von /SITZ et al. 2003a/ wird vorgeschlagen, den Nachweis der Langzeitbeständigkeit über natürliche Analoga zu führen. Bei der Auswertung aller dafür potenziell in Frage kommenden Baustoffe für Dichtelemente verbleiben danach nur Bitumen / Asphalte und Tone. /SITZ et al. 2003a/ verweist ferner darauf, dass die Langzeitbeständigkeit von zementgebundenen Materialien nicht nachgewiesen werden kann. Bitumen / Asphalte müssen hingegen wegen ihrer flüssigkeitsähnlichen Eigenschaften mit anderen Materialien kombiniert werden.

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Asphalt /Bitumina weisen /DBE 1999a/ jedoch darauf hin, dass es sich um Stoffe organischen Ursprungs handelt, die durch einen mikrobiellen Angriff gefährdet sind. Andererseits bietet ein solches hydrostatisches Dichtelement den Vorteil eines natürlichen, systemimmanenten Wirkmechanismus aufgrund der Schwerkraftwirkung. Aufgrund des Dichteunterschiedes gegenüber den zusitzenden Wässern und Laugen ist das Fluidkriterium im Dichtelement und in der Kontaktfuge zum Gebirge immer erfüllt.

Zum Beleg, dass insbesondere Bentonit als langzeitbeständiges Material für Dichtungen verwendet werden kann, wird von /GRUNER et al. 2003/ Salzton als natürliches Analogon angeführt, da die abdichtende Wirkung der Salztone für das Salinar bereits viele Millionen Jahre nachweislich wirkt. Salztone kommen in verschiedenen Ausprägungen vor (z. B.: grauer Salzton, roter Salzton, Tonhorizonte des Werra-Gebietes). Von /GRUNER et al. 2003/ wird festgehalten, dass die im Zechstein auftretenden Salztone als natürliche Analoga für Bentonitdichtelemente angesehen werden können. Nach Zutritt von Salzlösungen ist lang-

fristig mit einem Endzustand als Chlorit-Illit-Gemisch zu rechnen, so wie er in den natürlich vorkommenden Salztönen des Zechstein ansteht. Der Salztön wird dabei als ein konservatives Analogon betrachtet, weil das natürliche System Salztön im Vergleich zum technischen Bentonitdichtelement ungünstigeren Bedingungen unterworfen war.

Die Problematik der Langzeitstabilität (Materialien, Nachweisführung) wird derzeit noch kontrovers diskutiert.

5.3.2 Setzungsstabile Stützsäule

Erfahrungen aus Planung und Bau von Schachtverschlüssen

Anhand der bei der Verwahrung von Kalischächten im Südharz- und Unstrut-Kalirevier gewonnenen Erfahrungen empfiehlt /BODENSTEIN et al. 2002/ stets eine Totalverfüllung anzustreben. Nur in begründeten Ausnahmefällen sollte auf eine Teilverfüllung entsprechend „Variante C“ der Abbildung 5-5 zurückgegriffen werden. Der überwiegende Teil der Schächtröhren außerhalb der Widerlager und Dichtungsbereiche wurde mit Lockermassen verfüllt. Dafür kamen entweder Hartgesteinsschotter, aber auch Kiese und bindige Sande zum Einsatz. In Teilbereichen kamen auch Dammbaustoffe oder unterschiedliche Betonarten in Frage, die vorzugsweise über Schachtversturzeleitungen verstürzt wurden.

Die Bedeutung der setzungsstabilen Schottersäule zeigte sich ebenfalls bei der Verwahrung von Tagesschächten des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet. Mangelhafte Schachtverwahrungen in der Vergangenheit (z. B. Teilverfüllungen oder Verzicht auf Verfüllung und nur Abdeckung) wurden zum Teil erst viele Jahrzehnte nach Betriebseinstellung offenkundig. Die Folgen dieser Verwahrungstechniken zeigten sich an Tagesbrüchen, wie z. B. am 2. Januar 2000 im Bochumer Stadtteil Wattenscheid, wo der größte Tagesbruch im Ruhrgebiet-Bergbau um einen 1904 verfüllten 432 m tiefen Steinkohlenschacht entstand.

Großversuch im Schacht I Salzdetfurth

Im Rahmen des FuE-Vorhabens Schachtverschluss Salzdetfurth wurde das Setzungs- und Verformungsverhalten einer Füllsäule aus Hartgesteinsschotter in Schacht Salzdetfurth I als Vorversuch über vier Jahre untersucht /TEICHMANN et al. 2002a/. Bei einer Füllhöhe von 41 m sollte die Einbringtechnik getestet sowie Modellvorstellungen zur Silotheorie anhand von Druck- und Setzungsmessungen verifiziert werden (Trockenphase). Durch Fortsetzung der Messungen bei einer teilweisen Flutung der Schottersäule und gezielten Veränderungen des Fluidstandes war der Einfluss auf die Druckverhältnisse in der Schottersäule zu untersuchen (Flutungsphase).

Der Schacht I steht von 852 m Teufe bis zur Schachtsohle im Anhydrit. Der lichte Durchmesser beträgt 5,25 m. Bis zur Sohle bei 918,64 m Teufe wurde der Schacht freigelegt und gesäubert. Der Schachtausbau besteht aus Ziegelmauerwerk mit einer Dicke von ca. 0,5 m. Die Sohle ist mit Ziegeln ausgelegt. Bei 902,55 m Teufe liegt die Sohle des Füllortes der 900-m-Sohle. Aus dem Füllort zweigt nach NW die mit 2% ansteigende Füllortstrecke ab. Vor Beginn des Versuches wurden im Untersuchungsbereich sämtliche Schachteinbauten entfernt.

Der Schotter wurde über Tage gleichmäßig befeuchtet und mit Hilfe eines Kübels mit einem Fassungsvermögen von ca. 8,5 t nach unter Tage verbracht und etwa 20 m oberhalb des jeweiligen Befüllungsniveaus verkippt. Es wurden ca. 2.100 t Gleisschotter mit der Körnung 32/80 mm verwendet. Die Einbaudichte betrug ca. 1,79 t/m³. Im Füllortbereich lag diese zwischen 1,4 t/m³ und 1,6 t/m³.

Die gemessenen Setzungen lagen zwischen 8 mm und 16 mm im Messhorizont 16 m über der Schachtsohle. Im Bereich oberhalb des Füllortes lagen die Setzungen auf Grund von Auflockerungen durch ein fehlendes Widerlager in der abzweigenden Strecke im dm-Bereich.

In der anschließenden Flutungsphase sollte der Schacht mit gesättigter MgCl₂-Lösung (Dichte ca. 1,32 t/m³) bis Oberkante Füllort entsprechend einem Fluidstand von 23,5 m über der Schachtsohle geflutet werden. Auf Grund von Umläufigkeiten eines zur Abdichtung in der abzweigenden Strecke errichteten Damms konnte jedoch nur kurzzeitig ein Fluidstand von 20,9 m erreicht werden. Zum Vermessen der Böschung wurde der Fluidstand anschließend bis auf das Sohlenniveau des Füllortes (16,7 m über der Schachtsohle) abgesenkt. Während der Flutung kam es zu keinen wesentlichen Verschiebungen der Schotteroberkante.

Entgegen der ursprünglichen Planung wurden die Arbeiten danach fortgesetzt, da ein teilweiser Ausbau der Schottersäule und im Füllortbereich ein verdichteter Wiedereinbau vorgesehen wurde sowie neu entwickelte Setzungsmessgeräte getestet werden sollten. Es wurden 1.110 t Schotter im Füllortbereich ausgefördert und anschließend 1.576 t Schotter wieder eingebracht, wobei die Böschung flacher als der natürliche Böschungswinkel eingestellt und der Schotter nachverdichtet wurde. Während der Verdichtung kam es zu Auflockerungen über der Füllortfirste. Bis zum Abschluss dieser Arbeiten Anfang Januar 2000 traten dadurch Setzungen von bis zu 189 mm im Messhorizont 27 m über Schachtsohle auf. Im Zuge der weiteren Verfüllung des Schachtes kam es bis Februar 2002 zu Setzungen von bis zu 40 mm im gleichen Messhorizont. Im April 2002 wurde eine Höhe der Schottersäule von 262 m erreicht.

Großversuch im Schacht II Salzdetfurth

Der Schacht II steht von 768,21 m Teufe bis zum Füllort auf der 774-m-Sohle im Hauptanhydrit /TEICHMANN et al. 2002b/. Dieser Bereich ist mit ca. 0,5 m dickem Mauerwerk ausgebaut. Der lichte Schachtdurchmesser an der Schachtsohle beträgt 4,25 m. Ab ca. 7 m über der Schachtsohle bis zum Füllort auf der 774-m-Sohle beträgt er 5,10 m. Oberhalb des Füllortes steht der Schacht bei Durchmessern von 5,60 m bis 7,70 m bis (zur geplanten Schotteroberkante bei 513 m Teufe) unausgebaut überwiegend im Älteren Steinsalz (z2HS). In geringer Mächtigkeit sind in diesem Bereich auch Schichten des Kaliflözes Staßfurt (z2SF) aufgeschlossen. Im Zuge der Errichtung der Schottersäule über eine Höhe von etwa 260 m wurden die insgesamt vier Füllörter firstbündig und über eine Länge verfüllt, die etwa der zweifachen Füllorthöhe entspricht (Abbildung 5-8).

Vor Beginn der Befüllung der entsprechenden Abschnitte wurden alle Schachteinbauten entfernt.

Der Schotter mit einer Körnung von 32/80 wurde mit bodenentleerenden Kübeln analog zum Vorversuch aus einer Höhe von 20 m oberhalb der jeweiligen Befüllniveaus verkippt. Im ausgebauten Schachtbereich wurde der Schotter mit 1%_m Wasser und in den unausgebauten Schacht- und Füllortbereichen mit 1%_m gesättigter Lösung vorbefeuchtet. Die Verfüllung der Füllörter erfolgte firstbündig über eine Länge, die der zweifachen Füllorthöhe entsprach. Die Verteilung und Verdichtung des Schotters in den Füllörtern erfolgte mit Hilfe von Spezialfahrzeugen.

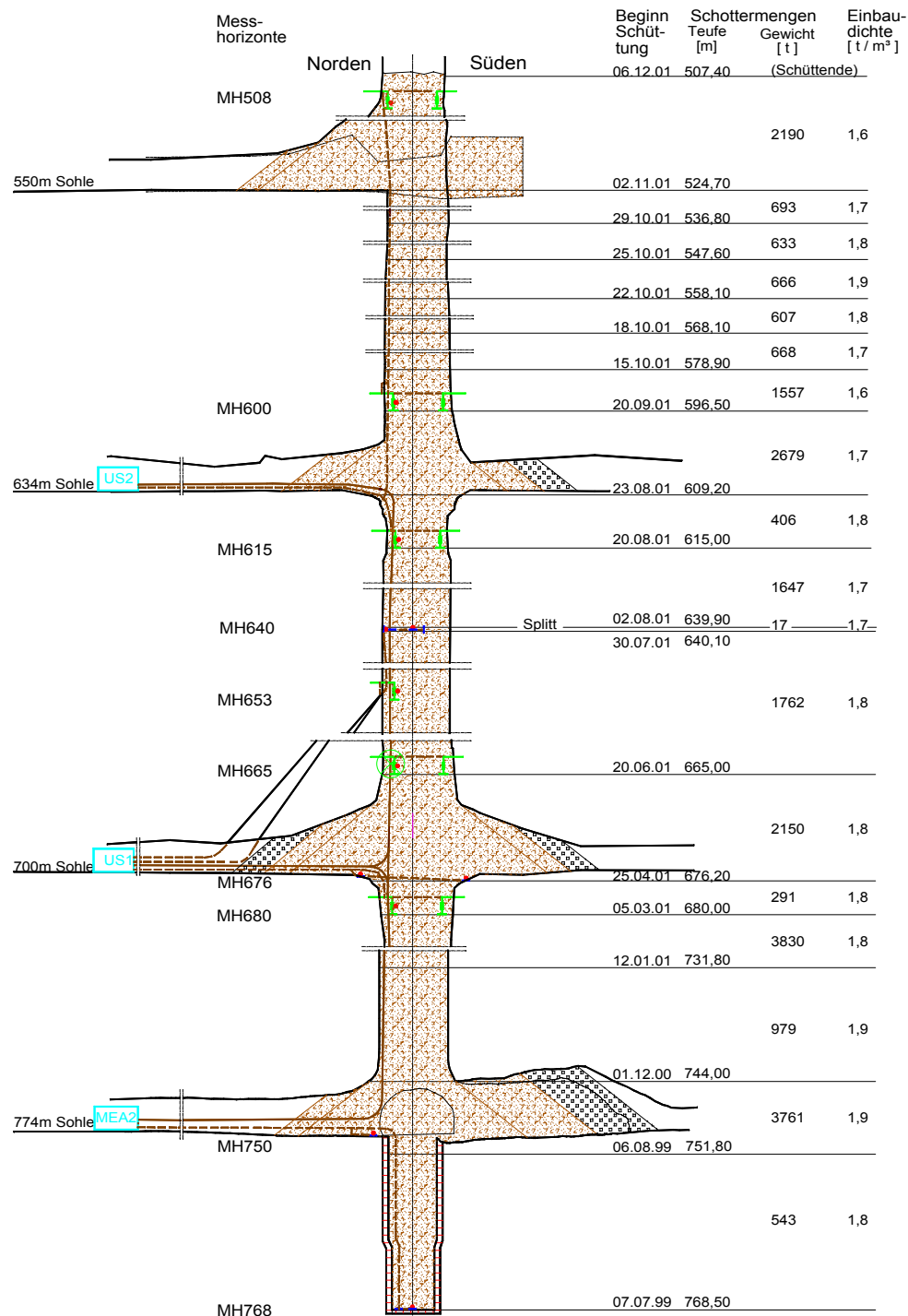


Abbildung 5-8: Salzdetfurth Schacht II mit Schotterverfüllung (nach /TEICHMANN et al. 2002b/)

Die Einbaudichten lagen zwischen $1,6 \text{ t/m}^3$ und $1,9 \text{ t/m}^3$. Die entsprechenden Porenanteile betrugen 45 % bzw. 34,7 %. Die durchschnittliche Einbaudichte - ermittelt aus der Gesamtmasse des eingebrachten Schotters und dem Gesamthohlraumvolumen - betrug $1,76 \text{ t/m}^3$.

Während des Einbaus kam es zu geringfügigen abschnittsweisen Setzungen innerhalb der Schottersäule. Nach Fertigstellung der Schottersäule im Dezember 2001 wurden innerhalb von 4 Monaten Setzungen von weniger als 2 mm festgestellt.

Folgende Schlussfolgerungen konnten aus den Großversuchen in den Schächten Salzdetfurth I und II gezogen werden /BREIDUNG 2002/:

Folgende Schlussfolgerungen konnten aus den Großversuchen in den Schächten Salzdetfurth I und II gezogen werden /BREIDUNG 2002/:

Materialauswahl

- Auswahl des langzeitstabilen Grundmaterials: Basalt oder Diabas
- Kornkennlinie 32/80 mm
- Bei Alternativmaterial ist der Eignungsnachweis des Schotters durch Untersuchung des Drucksetzungsverhaltens und der eingetretenen Veränderung der Kornverteilung infolge Druckbelastung zu führen. Die Untersuchungsergebnisse sind mit den Eigenschaften des vorliegenden Referenzmaterials zu vergleichen.

Maßnahmen im Schacht

- Vollständige Räumung des Schachtsumpfes
- Entfernung aller Schachteinbauten vor dem Schottereinbau
- Entfernung des Schachtausbaus, wenn kein Formschluss zwischen Ausbau und Gebirge besteht
- Durch das Schotterentladegefäß soll ein Radius des geschütteten Ringes des Schotterkegels von ca. 1,6 m angestrebt werden, damit in Richtung Schachtstoß bereits beim Einbau eine hohe Verdichtung erreicht wird.
- Fallhöhe beim Einbringen ca. 20 m

Maßnahmen im Füllortbereich

- Räumung des Füllortes bis auf das feste Salz, Brechen aller schwachen Kanten
- Verdichtung der Schotterböschung im Füllortbereich während des Einbaus
- Böschungswinkel der Schotterböschung im Füllortbereich $< 36^\circ$
- Verdichtete Vorschüttung aus Hartgesteinsschotter über die Länge der gemittelten Füllorthöhe
- Salzvorschüttung vor die Schottervorschüttung in den Füllortbereichen über die Länge der gemittelten Füllorthöhe. Das Material soll der Lagerstätte des Füllortes entsprechen.
- Neigungswinkel der Vorschüttung $< 30^\circ$

Einbauparameter

- Angestrebte Einbaudichte 1,80 t/m³
- Keine großen Dichteunterschiede in der Schotterverfüllung
- Vorbefeuchtung des Schotters vor Einbau mit gesättigter Salzlösung (1%_m)
- Flutung des unteren Schachtabschnittes mit gesättigter Salzlösung entsprechend der anstehenden Lagerstätte (zum Ausschluss unkontrollierbarer Löseprozesse – ist im Konzept eines Schachtverschlusses eines HAW-Endlagers nicht vorgesehen)

Durch den Versuch im Schacht II wurde der Nachweis der Realisierbarkeit einer über lange Zeiträume setzungsstabilen Schottersäule erbracht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nach /BREIDUNG 2002/ auf andere Schächte im Salinar übertragbar.

Schacht Ottoshall der Schachtanlage Bergmannsseggen-Hugo

Ziel des Vorhabens war die ergänzende Entwicklung und Erprobung von Verfahren für die Verfüllung von Schächten ohne Fördereinrichtung. In Ottoshall wurde der Schotter über eine API - Rohrleitung eingebracht /SCHMIDT et al. 1996/; /HAVERKAMP et al. 2002/.

Der ca. 600 m tiefe Schacht Ottoshall steht von –86 mNN bis zur Schachtsohle bei –538 mNN im Staßfurtsteinsalz (z2HS). Von der Rasenhängebank bis in 142 m Teufe ist der Schacht mit einer Vorbausäule ausgebaut, um den dahinter liegenden Tübbingausbau abzdichten. Darunter folgt Mauerwerk bis zur Sohle. Im Füllortbereich betragen die Dicke des Mauerwerks ca. 1 m und der Schachtinnendurchmesser ca. 4,6 m. Der Schachtsumpf ist rd. 18,5 m mit Salz verfüllt, das sich im Laufe der Zeit durch Süßwasserzuflüsse verhärtet hat. Vor Beginn des Versuches wurde der oberste Meter der verhärteten Salzverfüllung entfernt und der entstandene Hohlraum mit Beton (KR 0-32, B25) ausgegossen. Zur Erhöhung der Stabilität wurden zusätzlich Baustahlmatten eingesetzt.

Der Schotter wurde von über Tage durch eine 400 m lange 13 3/8" API-Rohrleitung und von da ab in freiem Fall in den etwa 600 m tiefen Schacht eingebracht. In der so hergestellten etwa 40 m hohen Schottersäule (siehe Abbildung 5-9) wurden die Setzungen und Drücke über 6 Monate durch Messsysteme erfasst und ausgewertet.

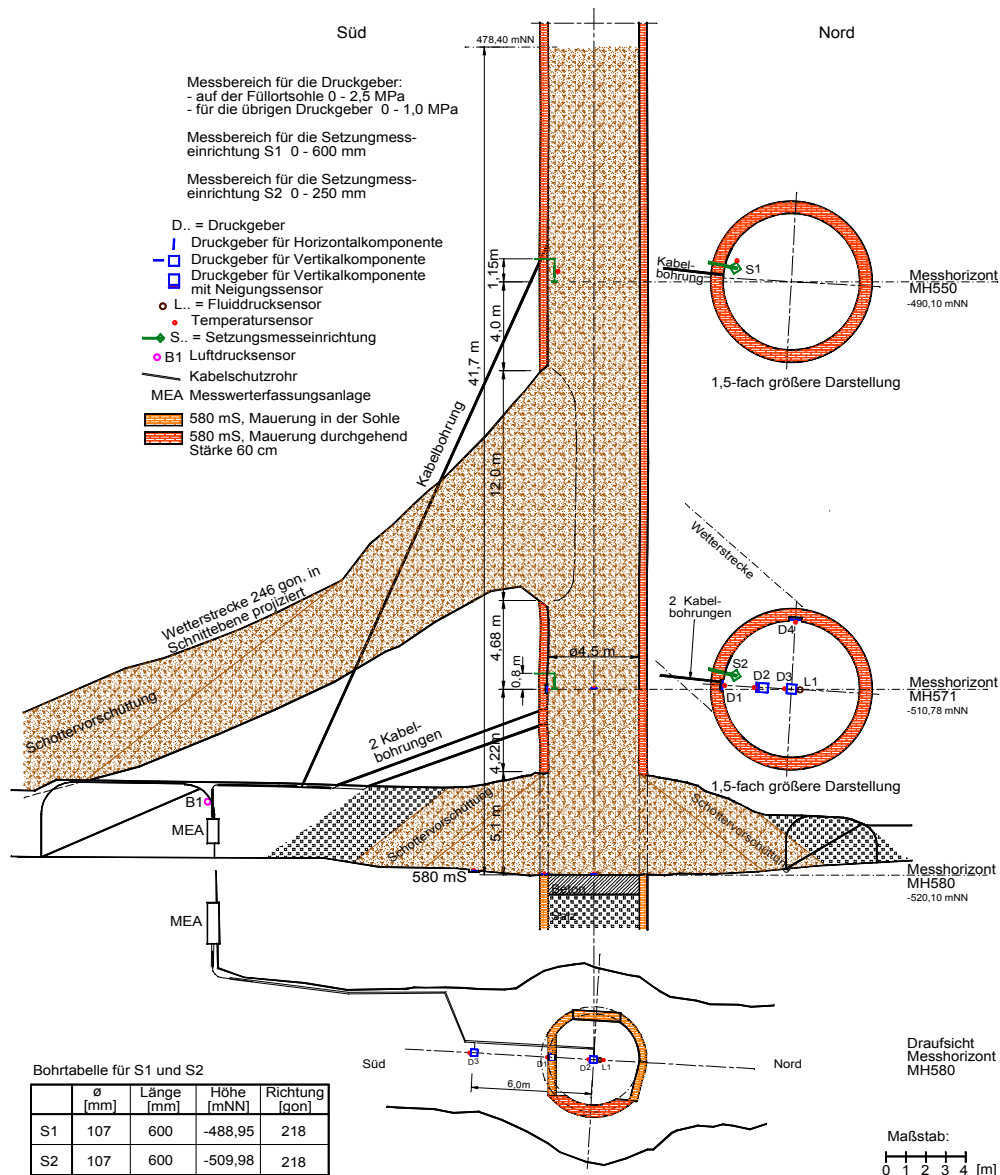


Abbildung 5-9: Bergmannsseggen-Hugo Schacht Ottoshall mit Schotterverfüllung /HAVERKAMP et al. 2002/

Es wurden zunächst das Füllort auf der 580-m-Sohle mit seinen beiden Streckenabgängen und die ca. 15 m höher nach Süden abgehende Wetterstrecke verfüllt. Die Verfüllung des Füllortes erfolgte firstbündig über eine Länge von etwa dem Zweifachen der Füllorthöhe von ca. 5 m. Im Anschluss daran wurde die Schottersäule weitere ca. 35 m aufgebaut /HAVERKAMP et al. 2002/.

Zum Einsatz kam der gleiche Schotter wie in Salzdetfurth mit einer Körnung von 32/80. Dieser wurde über Tage mit 1%_m gesättigter NaCl-Lösung vorbefeuchtet.

Als Ergebnisse dieses Großversuches ist nach /HAVERKAMP et al. 2002/ im Wesentlichen festzuhalten:

- Infolge des Verstürzens über die Rohrleitung wurde eine im Gegensatz zu den beiden Versuchen in Salzdetfurth sehr hohe Einbaudichte von durchschnittlich 2,24 t/m³ erreicht (Porenanteil 23 %). Dies kann nur durch die höhere Aufprallgeschwindigkeit und damit verbundener substanzieller Zerstörung von Schotterkörnern und Verbreiterung des Kornspektrums hin zu kleineren Korngrößen erklärt werden.
- Die Setzungen in der etwa 40 m hohen Schottersäule waren sehr gering und betrugen maximal ca. 2 mm (MH 550, ca. 30 m über Schachtsohle).
- Die Druckverhältnisse lassen sich mit Hilfe der Silotheorie beschreiben.
- Aussagen über Setzungen nach Flutungen lassen sich direkt nicht treffen, da jedoch die Standfestigkeit der Schottersäule im Schacht Ottoshall mindestens ebenso hoch einzuschätzen ist wie die der Schottersäule in Schacht Salzdetfurth I und da dort nach der Flutung keine Setzungserscheinungen beobachtet wurden, sind auch für diesen Fall im Schacht Ottoshall keine nennenswerten Setzungen zu erwarten.

Langzeitstabilität

Für den Einsatz sind alle Baustoffe geeignet, deren Langzeitverhalten durch Naturanaloga oder weitergehende Untersuchungen zum Chemismus belegt ist /DBE 1999a/. Als Tragelemente eines Schachtverschlusses wären dies: alle Arten natürlicher Gesteine, die mit einer salinaren Umgebung verträglich sind, Salzgrus oder Spülversatz.

5.3.3 Widerlager

Erfahrungen aus Planung und Bau von Schachtverschlüssen

Bei der von /BODENSTEIN et al. 2002/ beschriebenen Verwahrung von Kalischächten im Südharz-Kalirevier richtete sich die Auslegung der Widerlager und die Wahl der Widerlagerform nach den angetroffenen geogenen und technogenen Bedingungen sowie den anzusetzenden Lastfällen (z. B.: hydrostatischer Druck aus dem Deckgebirge, hydrostatischer Druck aus dem Grubengebäude, petrostatischer Druck aus dem Grubengebäude oder Kombinationen daraus). Maßgeblich für die Wahl der Widerlagerform war der für ein Widerlager zur Verfügung stehende Teufenabschnitt.

Das Verhältnis der Bauhöhe zum Schachtradius beträgt nach /BODENSTEIN et al. 2002/:

- bei einem gleitfähig ausgebauten Widerlager Länge / Radius = 3 ... 4 und
- bei einem kohäsiven Verfüllabschnitt Länge $\geq 20 \times$ Radius.

In Abbildung 5-10 sind die beiden Widerlagergrundformen (kohäsive Verfüllung, gleitfähiger Pfropfen) dargestellt. Mit Blick auf den erheblichen bergmännischen und bautechnischen Aufwand wurde die Form des gleitfähigen Pfropfens nur dort eingesetzt, wo die Platzverhältnisse eine Widerlager-Dichtungs-Kombination mit geringer Bauhöhe erforderten. Hinsichtlich der Wahl der Baustoffe stellt /BODENSTEIN et al. 2002/ fest, dass im Deckgebirge und innerhalb des verbleibenden Ausbaus Normalbeton verwendet werden kann. Bei direktem Kontakt mit dem anliegenden Salinar wird Solebeton (Kies, Zement, gesättigte NaCl-Sole) oder Magnesiabeton (Rohsalz, MgO und MgCl₂-Sole) als langjährig erprobter Baustoff, der dem Stand der Technik im Salzbergbau entspricht, empfohlen. Darüber hinaus erscheint Salzbeton (Steinsalz als Zuschlag, Zement und NaCl-Sole) als besonders geeignet für Ver-

wahrungsmaßnahmen im Salinar. /SITZ et al. 2003c/ weisen darauf hin, dass bei nichtsulfatischen Steinsalzlaugen beliebige Zemente verwendet werden können, bei sulfatischen Laugen in der Regel kalkarme Zemente eingesetzt werden und bei konzentrierten $MgCl_2$ -Laugen nur Magnesiazemente (Sorelzemente) beständig seien. Es werden keine Möglichkeiten gesehen, Langzeitbeständigkeit mit hinreichend günstigen Baustoffeigenschaften zu koppeln.

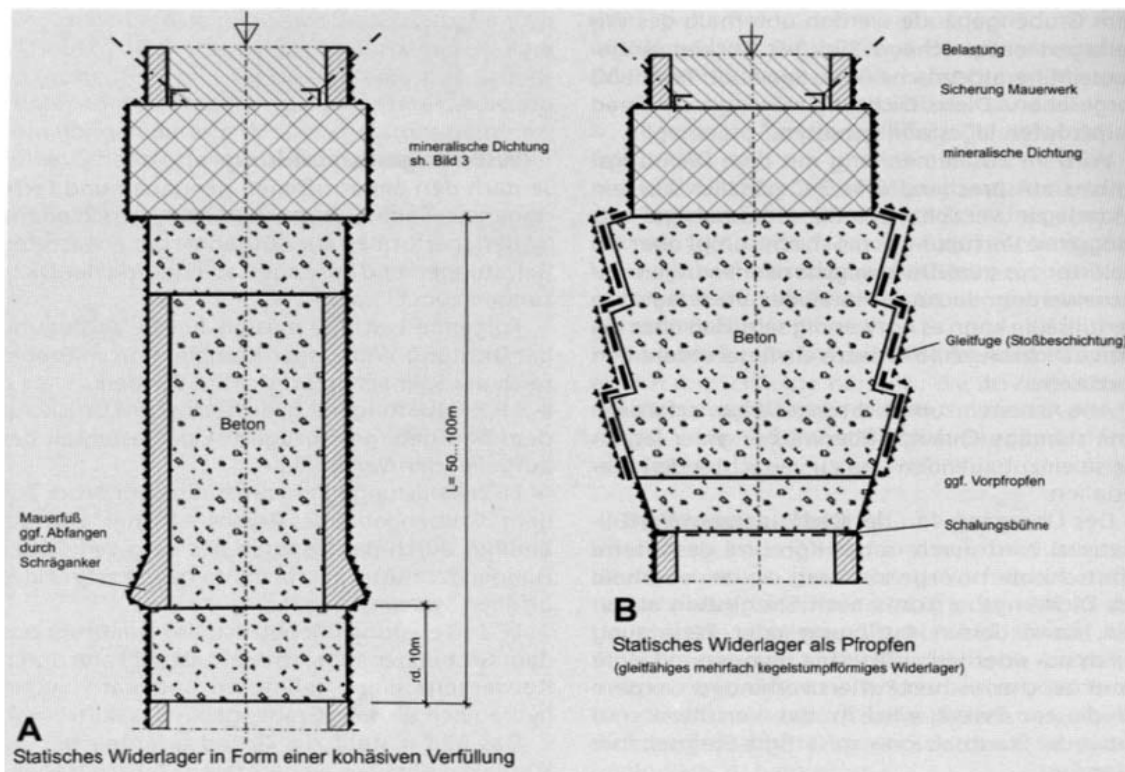


Abbildung 5-10: Widerlagerformen; kohäsive Verfüllung (A) bzw. gleitfähiger Pfropfen (B)
(nach /BODENSTEIN et al. 2002/)

Die Dimensionierung der gleitfähigen Widerlager erfolgte mittels FEM-Methode auf der Grundlage von bekannten Berechnungsansätzen nach /OELLERS et al. 1985/, die für die kohäsiven Verfüllssäulen nach /HÜLSMANN et al. 1991/.

5.4 Konzept zum Nachweis der Integrität der geotechnischen Barriere / geotechnische Nachweisführung

Auf die geotechnische Nachweisführung wurde im Abschnitt 4.4 eingegangen. Das in diesem Abschnitt vorgestellte Konzept nach /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/ konnte bereits auf die geotechnische Barriere Streckenverschluss angewendet werden und ist auf die geotechnische Barriere Schachtverschluss übertragbar.

Als Beispiel eines Einzelnachweises am Prototypen gemäß DIN EN 1990 (sog. versuchsgestützte Bemessung, Musterzulassung) eines untertägigen Schachtverschlussbauwerkes für die trockene Verwahrung kann der Bohrschacht Salzdetfurth dienen.

5.5 Ableitung von offenen Fragen / Forschungsbedarf

Für die im Rahmen der konzeptionellen Endlagerplanung /DBE 2008a/ betrachteten Einlagekonzepte der gemeinsamen Bohrloch- und Streckenlagerung (Variante 1) sowie der reinen Bohrlochlagerung (Variante 2) lassen sich momentan keine Aussagen zum Zeitpunkt des Erreichens des sicheren Einschlusses treffen. Der sich daraus ableitende Bemessungszeitraum der Schachtverschlüsse ist daher ebenfalls offen.

Es existiert z. Z. kein detailliertes Referenzkonzept für einen Schachtverschluss eines HAW-Endlagers. Die bestehenden Konzepte (vgl. Abschnitt 5.2) sind unter Berücksichtigung neuester Erkenntnisse zur Langzeitstabilität der Baustoffe zu überarbeiten, bzw. weiter zu detaillieren. Die Ergebnisse laufender Forschungsvorhaben können hier u. U. einen wesentlichen Beitrag liefern. Hierzu sind vorrangig zu nennen:

- Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke, FKZ 02 C 1124
- Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leicht löslichen Salzgestein (Carnallitit); CARLA
- Verbundprojekt: Optimierung von Magnesiabindersystemen für die Verwendung in Verschlussbauwerken für untertägige Deponien und Endlager für radioaktive Abfälle im Salinar

Bauwerkskomponente „Dichtelement & setzungsstabile Stützsäule“

Für die Komponenten „Dichtelement“ und „setzungsstabile Stützsäule“ liegen nach erfolgreicher Durchführung der in-situ Großversuche in den Schächten Salzdetfurth Referenzen hinsichtlich der Materialwahl, einbauvorbereitenden Arbeiten sowie Einbautechnik und –parametern vor. Die Langzeitstabilität der Materialien für das Dichtelement (binärer Calciumbentonit) sowie das Schotterwiderlager (Basalt oder Diabas) konnte ebenfalls anhand natürlicher Analoga gezeigt werden.

Eine – in diesem Kontext offene Frage – stellt sich im Zusammenhang mit der Übertragbarkeit der Ergebnisse des Bohrschachtversuchs Salzdetfurth auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtverschlusses. Zur Gewährleistung der Übertragbarkeit der Ergebnisse ist ein geometrisches ($\varnothing = 2,50 \text{ m} \rightarrow \text{ca. } 8 \text{ m}$) sowie zeitliches up-scaling (100 d $\rightarrow$ Bemessungszeitraum) erforderlich. Darüber hinaus sind Unterschiede in den standortspezifischen Randbedingungen (z. B. Teufenlage und herrschender Gebirgsdruck, Fluiddruck, rheologische Gebirgseigenschaften, Festigkeitseigenschaften, etc.) zu beachten und ggf. zu transformieren.

Besonderes Augenmerk ist hierbei auf die Parameter zu richten, die unmittelbaren oder mittelbaren Einfluss auf die Ausbildung und Größe der dilatanten Auflockerungszone haben. Für diesen geschädigten Gebirgsbereich können bis dato die für die hydraulische Nachweisführung erforderlichen Parameter Permeabilität und Porosität in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Ebenso ist deren (zeitliche) Entwicklung in Abhängigkeit von den sich ändernden Spannungsrandbedingungen (Aufkriechen des Gebirges, Aufbau eines Porendrucks) nicht hinreichend bekannt. Die hierzu

erwarteten Ergebnisse des derzeit laufenden EU-Forschungsprojektes THERESA sind dahingehend auszuwerten.

Die weitere Untersuchung hydromechanischer Effekte (wie z. B. Rissvernetzung / Rissöffnung einer vorgeschädigten Probe bei $p_{fl} > \sigma_3$) erscheint im Rahmen von Laborversuchen unter endlagerrelevanten Randbedingungen (hier z. B. $\sigma_3 \approx p_{quell}$) sinnvoll, zumal zwangsläufig infolge des Nachschnittes / Spitzens im Bereich des Dichtelementes mit der (Wieder-) Ausbildung einer dilatanten Zone zu rechnen ist.

Bauwerkskomponente „Widerlager“

Die Größe der maximal zu erwartenden Fluiddrücke lässt ggf. im Rahmen der Konzeption eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager die Anordnung eines biosphärenseitigen (und u. U. endlagerseitigen) Widerlagers erforderlich werden. Die Anordnung eines Widerlagers wird dann erforderlich, wenn die Fluid- und Gebirgsdrücke nicht sicher abgeleitet werden können und die Integrität bzw. die Lagestabilität des Dichtelementes nicht nachgewiesen werden kann.

Für die als Baustoffe vorgeschlagenen Materialien konnte jedoch der Nachweis der Langzeitstabilität – bis dato auf Analogiebasis geführt - noch nicht erbracht werden.

6 Behälter

In diesem Kapitel werden die funktionalen Anforderungen an Behälter, d. h. Endlagergebinde, für hochradioaktive und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (im Folgenden nur als wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bezeichnet) beschrieben. Es werden die in diesem Vorhaben betrachteten Endlagergebinde mit Wiederaufarbeitungsabfällen (HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C), mit gezogenen Brennstäben ausgedienter Brennelemente aus Leichtwasserreaktoren in Brennstabkokillen und POLLUX-Behältern und mit ausgedienten Brennelementen aus Forschungsreaktoren in CASTOR-Behältern der Typen AVR/THTR, MTR 2 und KNK berücksichtigt.

In diesem Kapitel werden u. a. die Begriffe „Endlagerbehälter“ (Behälter bzw. Verpackungen zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle) und „Endlagergebinde“ (Einheit aus radioaktivem Abfall und Endlagerbehälter) verwendet. Abweichend dazu stehen Bezeichnungen wie z. B. POLLUX-Behälter, CASTOR-Behälter sowohl für Endlagerbehälter als auch für Endlagergebinde. Die sicherheitstechnischen Anforderungen an Endlagergebinde sind im Wesentlichen durch Behältereigenschaften/-auslegung zu gewährleisten.

Die an Endlagergebinde zu stellenden sicherheitstechnischen Anforderungen sind im Bericht /DBE 2008a/ beschrieben. Dort werden für die Endlagergebinde Grenz- bzw. Richtwerte hinsichtlich „Unterkritikalität“, „Dosisleistung“, „Integrität“, „Temperatur“ und „Gasbildung“ abgeleitet und Vorschläge für die jeweiligen Nachweiszeiträume bzw. Nachweiszeitpunkte gemacht.

Im Folgenden werden planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde bei ungestörtem Betrieb des Endlagers und außerplanmäßige Einwirkungen bei gestörtem Endlagerbetrieb beschrieben. Im Vergleich zu Störfällen haben Betriebsstörungen und betriebliche Lasten nur einen geringen Einfluss auf die Integrität der Endlagergebinde. Daher werden insbesondere die außerplanmäßigen mechanischen und thermischen Einwirkungen auf Endlagergebinde bei gestörtem Endlagerbetrieb für die auslegungsbestimmenden Störfälle beschrieben, für die die Integrität bzw. Dichtheit der Endlagergebinde nachzuweisen ist.

6.1 Einwirkungen auf Endlagergebinde bei ungestörtem und gestörtem Endlagerbetrieb

Auf die Integrität der Endlagergebinde haben sowohl planmäßige Einwirkungen bei ungestörtem Betrieb des Endlagers als auch außerplanmäßige Einwirkungen bei gestörtem Endlagerbetrieb Einfluss. In einem Vorschlag der GRS /GRS 2003b/ werden Sicherheitskriterien und grundlegende Anforderungen für die Betriebs- und Nachbetriebsphase von Endlagern beschrieben. Im Zusammenhang mit den „Einwirkungen von innen“ ist in einer Störfallanalyse zu untersuchen, welche Betriebsstörungen und Störfälle in der Betriebsphase des Endlagers auftreten können. Im Zusammenhang mit den „Einwirkungen von außen“ sind naturbedingte Einwirkungen, wie Sturm, Regen, Schneefall, Frost, Blitzschlag, Hochwasser, Erdbeben und Erdbeben als betriebliche Lasten oder als auslegungsbestimmende Störfälle zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der radiologischen Schutzziele wird in /GRS 2003b/ für die Betriebsphase des Endlagers auf die derzeit gültige Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2001/ wie folgt Bezug genommen:

- § 5 Dosisbegrenzung
- § 6 Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung
- § 46 Begrenzung der Strahlenexposition der Bevölkerung
- § 47 Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe
- § 49 Sicherheitstechnische Auslegung für den Betrieb von Kernkraftwerken, für die standortnahe Aufbewahrung bestrahlter Brennelemente und für Anlagen des Bundes zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle
- § 55 Schutz bei beruflicher Strahlenexposition

Demnach beträgt der Grenzwert für die effektive Dosis der durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus dem Endlager während der Betriebsphase jeweils bedingten Strahlenexposition 0,3 mSv im Kalenderjahr für Einzelpersonen der Bevölkerung (§ 47 StrlSchV). Für die Nachbetriebsphase wird für eine Einzelperson in der Bevölkerung ein Richtwert für die effektive Dosis von 0,1 mSv im Kalenderjahr für wahrscheinliche Szenarien und ein Richtwert von 1 mSv im Kalenderjahr für weniger wahrscheinliche Szenarien vorgeschlagen.

In diesem Zusammenhang ist die Integrität der Endlagergebinde für den ungestörten Betrieb des Endlagers und bei gestörtem Endlagerbetrieb für Betriebsstörungen, betriebliche Lasten und auslegungsbestimmende Störfälle zu gewährleisten. Störfälle, die aufgrund ihrer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit dem Restrisiko zugeordnet werden, sind nicht auslegungsrelevant; gegen diese Störfälle werden Maßnahmen zur Restrisikominimierung und damit zum Schutz der Allgemeinheit getroffen. Die planmäßigen Einwirkungen auf Endlagergebinde bei ungestörtem Endlagerbetrieb sind in Kapitel 6.1.1 beschrieben. In Kapitel 6.1.2 sind die außerplanmäßigen Einwirkungen auf Endlagergebinde bei gestörtem Endlagerbetrieb beschrieben.

6.1.1 Planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde bei ungestörtem Betrieb des Endlagers

Zu den planmäßigen Einwirkungen während der Betriebsphase zählen

- dynamische mechanische Einwirkungen bei der Handhabung der Endlagergebinde.

Während der Nachbetriebsphase kommt es zu

- statischen mechanischen Einwirkungen durch Gebirgsdruck auf die Endlagergebinde, durch thermisch induzierte Spannungen in den Endlagergebänden und durch überlagerte thermisch induzierte Spannungen im Gebirge auf die Endlagergebinde,
- quasistationären thermischen Einwirkungen durch die Wärmeleistung der Endlagergebinde und aus der Temperatur des angrenzenden Wirtsgesteins, welches durch die benachbarten Endlagergebinde aufgeheizt wird,

- korrosiven Einwirkungen durch Radiolyse, Kristallwasserfreisetzung und Luftsauerstoff.

In der Tabelle 6-1 sind die planmäßigen Einwirkungen auf Endlagergebinde während der Betriebs- und Nachbetriebsphase zusammengestellt. Die dynamischen mechanischen Einwirkungen auf Brennstabkokillen wurden aus /DBE 2006/ entnommen und auf HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C übertragen (Geschwindigkeiten) bzw. davon abgeleitet (Lasten/Kräfte). Für POLLUX- und CASTOR-Behälter sind die dynamischen mechanischen Einwirkungen nicht auslegungsrelevant.

Die statischen mechanischen Einwirkungen wurden aus /SAE 1984/ entnommen. Für die isostatischen Belastungen wird ein Außenüberdruck von 30 N/mm² (= 30 MPa) durch den Gebirgsdruck angenommen. Für die nicht isostatischen Belastungen wird ein nicht isostatischer Druck mit einem auf definierte Flächen wirkenden stirnseitigen Druck von 20 N/mm² (= 20 MPa) und einem mantelseitigen Druck von maximal 25 N/mm² (= 25 MPa) angenommen /SAE 1984/.

Im Zusammenhang mit dem Nachweis der mechanischen Stabilität von Brennstabkokillen (BSK) wurden die Einwirkungen aus dem Gebirge unter Berücksichtigung des Wärmeeintrags aus den BSK untersucht. Die BSK ist laut Beschreibung /GNB 1998/ auf einen maximalen isostatischen Gebirgsdruck von 30 MPa ausgelegt. Bisherige Spannungsanalysen lieferten jedoch Beanspruchungen, die zum Teil deutlich über 30 MPa lagen. Die Berechnungen an einem Einzelbohrloch zeigen, dass die maximal auf die Behälter einwirkenden Radialspannungen im wesentlichen durch die Zwischenlagerzeit und die Einlagerungsteufe beeinflusst werden. Eine Vergrößerung der Salzgrusschicht im die BSK umgebenden Ringraum kann den Aufbau der Radialspannungen nur kurzfristig verzögern. In einem Einlagerungsfeld ist eine Überlagerung von Temperatur- und Spannungsfeldern zu erwarten. Für eine genaue Analyse der Temperatur- und Spannungsentwicklung ist die Modellierung des gesamten dreidimensionalen Einlagerungsfeldes erforderlich.

Über die in der Tabelle 6-1 aufgeführten statischen mechanischen Einwirkungen auf die Endlagergebinde durch Gebirgsdruck (isostatischer Druck = isotrope Spannungen und nicht isostatischer Druck = anisotrope Spannungen) sind auch thermisch induzierte Spannungen in den Endlagergebinden und überlagerte thermisch induzierte Spannungen aus dem Gebirge (isotrope und anisotrope Spannungen) auf die Endlagergebinde zu berücksichtigen. Zum jetzigen Zeitpunkt wird angenommen, dass bei den POLLUX- und CASTOR-Behältern aufgrund des Einlagerungskonzeptes (Streckenlagerung), der Abmessungen und der Wandstärke isotrope und anisotrope Spannungen eine untergeordnete Rolle beim Nachweis der Integrität der Endlagergebinde spielen.

Tabelle 6-1: Planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde während der Betriebs- und Nachbetriebsphase

Planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde	HAW-Kokillen CSD-B CSD-C	Brennstab- kokille	POLLUX-Behälter CASTOR AVR/THTR CASTOR MTR 2 CASTOR KNK
Betriebsphase: Dynamische mechanische Einwirkungen			
Hubgeschwindigkeit (= Nenngeschwindigkeit)	10 m/min		nicht auslegungsrelevant
Aufsetzgeschwindigkeit (= Schleichgeschwindigkeit)	1 m/min (entspricht 10 % der max. Hubgeschwindigkeit)		
Max. Zuglast	8 kN _{HAW-Kokillen} 8 kN _{CSD-B} 13 kN _{CSD-C}	81 kN	
Max. Bremskraft	27 kN _{HAW-Kokillen} 27 kN _{CSD-B} 47 kN _{CSD-C}	288 kN	
Nachbetriebsphase: Statische mechanische Einwirkungen durch Gebirgsdruck			
Isostatischer Druck	30 MPa ¹⁾		
Nicht isostatischer Druck	20 MPa stirnseitig ¹⁾ 25 MPa mantelseitig ¹⁾		

¹⁾ auf der Basis von /SAE 1984/. Zusätzlich sind thermisch induzierte Spannungen der Endlagergebinde und überlagerte thermisch induzierte Spannungen aus dem Gebirge auf die Endlagergebinde zu berücksichtigen.

Aus den quasistationären thermischen und korrosiven Einwirkungen können keine direkten Auslegungsanforderungen an Endlagergebinde abgeleitet werden. Stattdessen wird die Integrität der Endlagergebinde durch thermomechanische Rechnungen und entsprechende Endlagerauslegung sowie durch experimentell ermittelte Korrosionsraten der eingesetzten Behältermaterialien nachgewiesen. In diesem Zusammenhang werden auch die im Rahmen der sicherheitstechnischen Anforderungen in /DBE 2008a/ abgeleiteten wärmetechnischen Anforderungen an Endlagergebinde, z. B. maximale Hüllrohrtemperaturen der Brennstäbe sowie maximale Temperatur des Glasproduktes in HAW-Kokillen, berücksichtigt.

6.1.2 Außerplanmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde bei gestörtem Endlagerbetrieb

Die Integrität der Endlagergebinde ist bei einem gestörtem Endlagerbetrieb für Betriebsstörungen, betriebliche Lasten und auslegungsbestimmende Störfälle zu gewährleisten. Im Folgenden sind die entsprechenden außerplanmäßigen Einwirkungen auf die Endlagergebinde beschrieben.

6.1.2.1 Außerplanmäßige Einwirkungen infolge von Betriebsstörungen und betrieblichen Lasten

Im Vergleich zu Störfällen haben Betriebsstörungen und betriebliche Lasten nur einen geringen Einfluss auf die Integrität der Endlagergebinde. Betriebsstörungen und betriebliche Lasten sind ausschließlich der Betriebsphase zuzuordnen.

Zu den außerplanmäßigen Einwirkungen im Zusammenhang mit Betriebsstörungen zählen:

- $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$ maximale vertikale Beschleunigung beim Schachttransport aufgrund schweren Übertreibens /DBE 1994a/, /DBE 2007a/
- $1,4\text{ g} = 13,73\text{ m/s}^2$ maximale Beschleunigung beim schienengebundenen Transport (Aufprall eines Plateauwagens Puffer auf Puffer) /DBE 2007b/

Die Funktionsfähigkeit von Komponenten, die von Betriebsstörungen betroffen sind, kann durch Bergungs- und Reparaturmaßnahmen wieder hergestellt werden. Im Rahmen des Vorhabens „Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente“ wurden für den untertägigen Transport folgende Betriebsstörungen analysiert und Bergungsmaßnahmen zu deren Behebung geplant und vom Betriebspersonal durchgeführt: Betriebsstörungen am Plateauwagen (entgleister Plateauwagen, fahruntüchtiger Plateauwagen), an der Einlagerungsvorrichtung (Traglaschen schwenken nicht aus, Behälterschiefelage durch Versatzmaterial, Fahrwerk lässt sich nicht einschwenken, Ausfall einer Stütze) und an der Batterie-Lokomotive (Trennen der Kupplungsverbindung bei Störung) /DBE 1995/.

Betriebliche Lasten haben im Vergleich zu Störfällen ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf die Integrität der Endlagergebinde und werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

6.1.2.2 Außerplanmäßige Einwirkungen infolge von Störfällen

Im Folgenden werden außerplanmäßige Einwirkungen auf Endlagergebinde bei gestörtem Endlagerbetrieb für auslegungsbestimmende Störfälle betrachtet, die entsprechenden außerplanmäßigen Einwirkungen beschrieben und daraus Auslegungsanforderungen an Endlagergebinde abgeleitet.

6.1.2.2.1 Außerplanmäßige Einwirkungen auf POLLUX- und CASTOR-Behälter infolge von auslegungsrelevanten Störfällen

In diesem Vorhaben wird davon ausgegangen, dass die Endlagergebinde direkt an das Endlager angeliefert werden. Demnach ist die Integrität der Endlagergebinde auch für die Beförderung und ggf. für eine vorangegangene Zwischenlagerung nachzuweisen. Für die Endlagerung ist eine Zulassung der Endlagergebinde nach Transport- und Lagerrecht aber keine zwingende Voraussetzung. Eine Auslegung der Endlagergebinde in Anlehnung an das Transport- und Lagerrecht ist jedoch sinnvoll, da die zu erbringenden Nachweise grundsätzlich ähnlich sind. Alternativ könnte der Nachweis der Integrität der Endlagergebinde auch durch betriebliche Nachweise erbracht werden.

Im Folgenden werden außerplanmäßige Einwirkungen auf Endlagergebäude aus dem Transport- und Lagerrecht dargestellt. Anschließend werden außerplanmäßige Einwirkungen bei der Endlagerung beschrieben; diese sind auslegungsbestimmend und stellen damit die Auslegungsanforderungen für die Endlagergebäude dar.

Beförderung der POLLUX- und CASTOR-Behälter als Typ B(U)-Versandstücke auf Strasse/Schiene/See

Für die Beförderung von Typ B(U)-Versandstücken erfolgt der Nachweis der „dichten Umschließung“ entsprechend den in ADR /ADR 2002/; Abschnitt 6.4.8.7 festgelegten Anforderungen für normale Beförderungsbedingungen und Unfall-Beförderungsbedingungen. Die Prüfungen zum Nachweis Widerstandsfähigkeit unter Unfall-Beförderungsbedingungen sind im Abschnitt 6.4.17 festgelegt. In diesem Zusammenhang wird ein Prüfmuster des Versandstücks u. a. einer mechanischen Prüfung und einer Erhitzungsprüfung unterzogen. Nach jeder Prüfung ist zu ermitteln, ob die Unversehrtheit der dichten Umschließung und der Abschirmung in dem geforderten Maße erhalten geblieben ist (ADR, Abschnitt 6.4.13).

Mechanische Auslegung

- Fall aus 9 m Höhe auf ein Aufprallfundament
- Fall aus 1 m Höhe auf einen Dorn
- Quetschprüfung – Fall einer Baustahlplatte aus 9 m Höhe

Thermische Auslegung

- Brand bei 800 °C für die Dauer von 30 Minuten

Zwischenlagerung der POLLUX- und CASTOR-Behälter

Die außerplanmäßigen Einwirkungen auf POLLUX-Behälter im Transportbehälterlager Gorleben sind im Bericht /GNB 1996a/ hinsichtlich der mechanischen Auslegung und im Bericht /GNB 1996b/ hinsichtlich der thermischen Auslegung beschrieben.

Mechanische Auslegung

- Erdbeben
 - Horizontale Beschleunigung $a_H = \pm 0,2 \text{ g}$
 - Vertikale Beschleunigung $a_V = \pm 0,1 \text{ g}$
- Kippen nebeneinander stehender Behälter

Bei einer Kranfahrt mit einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von $v_0 = 0,4 \text{ m/s}$ trifft eine Masse von $M_0 = 125 \text{ Mg}$ in einer optimalen Anstoßhöhe h_{opt} punktförmig auf einen gelagerten Behälter.
- Behälterabsturz auf den Hallenboden während der Handhabung mit dem Kran

Absturzhöhe: ca. 4 m auf den Behälterboden auf die Hallensohlplatte

Thermische Auslegung

- Brand bei 600 °C für die Dauer von 60 Minuten
- Verschüttung im Lager

Im Folgenden wird beispielhaft die Zwischenlagerung von Transport- und Lagerbehältern im Transportbehälterlager Gorleben (TBL-Gorleben) und im Standortzwischenlager in Biblis (SZL Biblis) betrachtet. Bei der Zwischenlagerung von den in diesem Vorhaben betrachteten CASTOR-Behältern in diesen Zwischenlagern kann von vergleichbaren außerplanmäßigen Einwirkungen ausgegangen werden.

Im TBL Gorleben und im SZL Biblis können nur Abfallgebinde zwischengelagert werden, die zum Zeitpunkt der Einlagerung über eine gültige verkehrsrechtliche Zulassung als Typ B-Versandstück verfügen. Darüber hinaus werden an die Abfallgebinde weitere zwischenlager-spezifische Anforderungen gestellt. /GEISER 2006/, /BfS 2003/ Bei der Behälterabfertigung werden für die Primärdeckelbarriere sowie für die Sekundärdeckelbarriere der Behälter Standard-Helium-Leckageraten von jeweils höchstens $1 \cdot 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ nachgewiesen. Die Dichtwirkung der Metaldichtungen bleibt über 40 Jahre ab dem Zeitpunkt der Beladung erhalten. /BfS 2003/

Im SZL Biblis werden Störfälle durch mechanische Einwirkungen aufgrund technischer Defekte beziehungsweise menschlichen Versagens bei Handhabungsvorgängen (Absturz des Behälters aus dem Krangehänge, Anprall und Kippen eines Behälters) und thermischen Einwirkungen durch Störfälle bei Handhabungsvorgängen (Brand des Transportfahrzeuges im Verladebereich) als Störfälle durch Einwirkungen von innen berücksichtigt. Störfälle durch naturbedingte Einwirkungen wie Erdbeben, Hochwasser, Blitzschlag sowie Brand außerhalb des SZL Biblis werden als Störfälle durch Einwirkungen von außen berücksichtigt. Für den abdeckenden Lastfall der mechanischen Einwirkungen ist eine Standard-Helium-Leckagerate von maximal $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ sichergestellt. Hinsichtlich des abdeckenden Lastfalls der thermischen Einwirkung hat die Prüfung ergeben, dass die thermische Belastung des Transport- und Lagerbehälters in Folge der inneren und äußeren Einwirkungen im Zwischenlager insgesamt geringer ist als die thermische Belastung, die der Behälterauslegung zugrunde gelegt wurde; /BfS 2003/:

Endlagerung der POLLUX- und CASTOR-Behälter

Bei der Endlagerung der POLLUX- und CASTOR-Behälter ist der Nachweis der Integrität unter Endlagerungsbedingungen zu führen. Dazu sind die abdeckenden Lastfälle der außerplanmäßigen Einwirkungen zu ermitteln und bei der mechanischen und thermischen Auslegung zu berücksichtigen.

In diesem Vorhaben wird davon ausgegangen, dass die Endlagergebinde direkt an das Endlager angeliefert werden. Daher ergeben sich sicherheitstechnische Anforderungen aus der übertägigen Handhabung, dem über- und untertägigen Transport, der untertägigen Handhabung und der Endlagerung in der Strecke.

Für den Nachweis der Integrität der Endlagergebinde unter Endlagerungsbedingungen sind die abdeckenden Lastfälle der außerplanmäßigen Einwirkungen zu ermitteln und bei der mechanischen und thermischen Auslegung zu berücksichtigen:

Mechanische Auslegung

- Handhabung über Tage mit/ohne Stoßdämpfer
- Handhabung unter Tage ohne Stoßdämpfer

Erdbeben für die übertägige Handhabung; bei der untertägigen Handhabung werden keine Erdbeben unterstellt /DBE 2007a/

- Horizontale Beschleunigung $a_H = \pm 0,2 \text{ g}$
- Vertikale Beschleunigung $a_V = \pm 0,1 \text{ g}$

Thermische Auslegung

- Brand bei 800 °C für die Dauer von 30 Minuten über Tage mit/ohne Stoßdämpfer
- Brand bei 800 °C für die Dauer von 30 Minuten unter Tage ohne Stoßdämpfer /DBE 2007a/

Bei der mechanischen Auslegung sind die abdeckenden Lastfälle für den Fall der Endlagergebinde auf das Aufprallfundament bzw. den Dorn zu ermitteln. Dazu gehört die Festlegung der Absturzhöhen, der Fallrichtungen: horizontal auf die Mantellinie, vertikal auf den Behälterboden/-deckel, auf die Behälterkante etc. und der Aufprallfundamente (z. B. Beton, Salz).

In der übertägigen Umladehalle werden die POLLUX-Behälter vom Anlieferfahrzeug auf einen Plateauwagen umgeladen. Dabei werden auch die Stoßdämpfer von den POLLUX-Behältern entfernt. Die abdeckende Absturzhöhe während der übertägigen Handhabung kann mit 3 m (Abstand zwischen Hallenboden und Unterkante POLLUX-Behälter durch entsprechende Hubhöhenbegrenzung des Krans) angenommen werden. Bei der übertägigen Handhabung entspricht das Aufprallfundament Beton, analog /DBE 2007a/. Demnach ist ein Betonmaterialmodell entsprechend den Angaben im Bericht Nr. GNB B 208/2004 Rev. 2 „Absturz des Transport- und Lagerbehälters CASTOR® V/19 vom Halbportalkran im KKK“ anzusetzen. Abweichend von den Angaben in dem Bericht ist eine Bewehrung mit einem Mindestanteil von 2,5 % zu berücksichtigen. Dieser Lastfall ist auch abdeckend für die mechanischen Einwirkungen auf POLLUX-Behälter während des übertägigen Transports im Endlager.

Bei der untertägigen Handhabung in der Einlagerungsstrecke errechnet sich der Abstand zwischen Streckensohle und Unterkante POLLUX-Behälter mit 1.520 mm (Abstand der Behältermitte von der Streckensohle) + 210 mm (Hubhöhe zum Freiheben des POLLUX-Behälters) – 780 mm (Radius des POLLUX-Behälters) = 950 mm. Als Aufprallfundament wird eine Salzsohle entsprechend der Betonqualität B 20 berücksichtigt /DBE 1995/. Dieser Lastfall ist auch abdeckend für die mechanischen Einwirkungen auf POLLUX-Behälter während des untertägigen Transports im Endlager.

In der Tabelle 6-2 sind die abdeckenden Lastfälle der mechanischen Einwirkungen auf Endlagergebinde bei gestörtem Endlagerbetrieb für über- und untertägige auslegungsrelevante

Störfälle zusammengestellt. In diesem Vorhaben wird davon ausgegangen, dass die CASTOR-Behälter der Typen AVR/THTR, MTR 2 und KNK in gleicher Weise gehandhabt und transportiert werden wie die POLLUX-Behälter und die Angaben in der Tabelle 6-2 auch für die CASTOR-Behälter angenommen werden können.

Tabelle 6-2: Abdeckende Lastfälle der mechanischen Einwirkungen auf POLLUX- und CASTOR-Behälter bei gestörtem Endlagerbetrieb (auslegungsrelevante Störfälle)

Übertägige Handhabung POLLUX- und CASTOR-Behälter (jeweils ohne Stoßdämpfer) einschließlich Transport	Fallhöhe	3 m
	Aufprallfundament	Beton (analog /DBE 2007a/)
Untertägige Handhabung POLLUX- und CASTOR-Behälter (jeweils ohne Stoßdämpfer) einschließlich Transport	Fallhöhe	0,950 m
	Aufprallfundament	Salzsohle (Betonqualität B 20 /DBE 1995/)

Dichtheitskriterien

Bei einem Vergleich der Nachweise der Integrität der POLLUX-Behälter und CASTOR-Behälter nach Transport- und Lagerrecht und aus Endlagersicht ist zu beachten, dass unterschiedliche Dichtheitskriterien herangezogen werden (s. Tabelle 6-3). Die ausführliche Beschreibung erfolgt im Bericht /DBE 2008a/.

Tabelle 6-3: Dichtheitskriterien beim Nachweis der Integrität der Endlagergebinde für die Beförderung, Zwischen- und Endlagerung

Beförderung	Normale Beförderungsbedingungen $10^{-6} A_2$ pro Stunde ¹⁾	Unfall- Beförderungsbedingungen A_2 pro Woche ¹⁾
Zwischenlagerung	Bestimmungsgemäßer Betrieb $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (= $10^{-7} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$)	auslegungsrelevante Störfälle $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (= $10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$)
Endlagerung	Ungestörter Endlagerbetrieb $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (= $10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$)	auslegungsrelevante Störfälle während des gestörten Endlagerbetriebes $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (= $10^{-3} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$)

¹⁾ A_2 = Aktivitätswert von radioaktiven Stoffen nach /ADR 2002/

Weiterhin ist zu beachten, dass bei der thermischen Auslegung bei der transportrechtlichen Zulassung (Brand mit Stoßdämpfer, 800 °C, ½ Stunde), bei der Zwischenlagerung (Brand ohne Stoßdämpfer, 600 °C, 1 Stunde) und im Endlager (Brand ohne Stoßdämpfer, 800 °C, ½ Stunde) teilweise unterschiedliche Randbedingungen gelten.

6.1.2.2.2 Außerplanmäßige Einwirkungen auf HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C und Brennstabkokillen infolge von auslegungsrelevanten Störfällen

Für die HAW-Kokillen, CSD-B, CSD-C und Brennstabkokillen ist die Bohrlochlagerung ohne zusätzliche Verpackung vorgesehen. Die sicherheitstechnischen Anforderungen an diese Endlagergebinde ergeben sich aus der übertägigen Handhabung, dem über- und untertägigen Transport, der untertägigen Handhabung und der Endlagerung im Bohrloch.

Die Endlagergebinde werden über Tage in selbst abschirmende Transferbehälter umgeladen und auf Plateauwagen für den weiteren innerbetrieblichen Transport nach unter Tage abgesetzt. Unter Tage wird mit Hilfe der Einlagerungsvorrichtung der Transferbehälter vom Plateauwagen übernommen, in die Aufnahme des Bohrlochschiebers gestellt, Transferbehälter und Bohrlochschleuse werden geöffnet und das Endlagergebinde wird mittels Kokillengreifer ins Bohrloch abgelassen.

Für den Nachweis der Integrität der Endlagergebinde unter Endlagerungsbedingungen sind die abdeckenden Lastfälle der außerplanmäßigen Einwirkungen zu ermitteln und bei der mechanischen und thermischen Auslegung zu berücksichtigen. Dazu sind im Folgenden die Auslegungsanforderungen an den Transferbehälter für Brennstabkokillen aufgeführt /DBE 2007a/. Bei den mechanischen und thermischen Störfällen ist die zulässige Dosisleistung in 1 m Abstand von der Gebindeoberfläche, d. h. dem Transferbehälter, auf 10 mSv/h begrenzt; dies entspricht der maximalen Dosisleistung nach den verkehrsrechtlichen Vorschriften des ADR für die ‚Beförderung unter ausschließlicher Verwendung‘ /ADR 2002/. In einem späteren Vorhaben ist die Integrität der Brennstabkokillen selbst nachzuweisen. Bisher liegen keine Angaben zu den außerplanmäßigen Einwirkungen auf die Endlagergebinde selbst vor. Es wird angenommen, dass die Auslegungsanforderungen an den Transferbehälter für Brennstabkokillen auch für die Transferbehälter für HAW-Kokillen, CSD-B und CSD-C gelten.

Mechanische Auslegung

- Handhabung in einer Konditionierungsanlage (über Tage)
 - Bodenflachfall des Transferbehälters aus 5 m Höhe in einen Stoßdämpfer
- Handhabung in einer übertägigen Umladestation
 - Aufprall des Transferbehälters auf die Mantellinie (ohne Tragzapfeneingriff) aus 3 m Höhe (Aufprallfundament: Beton)
 - Slap-Down-Fall des Transferbehälters mit erstem Aufschlag auf die bodenseitige Transferbehälterschleuse aus 3 m Höhe (Aufprallfundament: Beton)
Der Transferbehälter trifft mit der Kante der bodenseitigen Transferbehälterschleuse auf das Fundament, so dass sich der Transferbehälter anschließend bis zum Aufprall der deckelseitigen Behälterschleuse um die Kante der bodenseitigen Schleuse dreht.
- Handhabung in der Einlagerungsvorrichtung (unter Tage)
 - Horizontalfall des Transferbehälters (ohne Tragzapfeneingriff) aus 3 m Höhe auf zwei in axialer Bohrlochzellerrichtung um die Bohrlochschleuse positionierte Stoßdämpfer
 - Slap-Down-Fall des Transferbehälters mit erstem Aufschlag auf die bodenseitige Transferbehälterschleuse aus 3 m Höhe in zwei in axialer Bohrlochzellerrichtung um die Bohrlochschleuse positionierte Stoßdämpfer

Der Transferbehälter trifft mit der Kante der bodenseitigen Transferbehälterschleuse auf den ersten Stoßdämpfer, so dass sich der Transferbehälter anschließend bis zum Aufprall der deckelseitigen Behälterschleuse auf den zweiten Stoßdämpfer um die Kante der bodenseitigen Schleuse dreht.

- Aufprall des Transferbehälters mit der Kante des bodenseitigen Schleusenkörpers auf die Bohrlochsleuse aus 0,5 m Höhe
- Aufprall des Transferbehälters mit der bodenseitigen Behälterschleuse mittig auf die Bohrlochsleuse aus 0,6 m Höhe

Erdbeben

- Horizontale Beschleunigung: $a_H = \pm 0,2 \text{ g}$
- Vertikale Beschleunigung: $a_V = \pm 0,1 \text{ g}$

Thermische Auslegung

- Brand bei 800 °C für die Dauer von 30 Minuten (in Anlehnung an die ADR als Typ B(U)-Versandstück)

Zum jetzigen Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass die vorgenannten außerplanmäßigen Einwirkungen auf die Transferbehälter und damit auf die Endlagergebinde (HAW-Kokillen, Brennstabkokillen etc.) die Einwirkungen auf die Endlagergebinde während der untertägigen Handhabung, insbesondere beim Entladen der Endlagergebinde aus dem Transferbehälter und beim Ablassen ins Bohrloch sowie der Endlagerung im Bohrloch abdecken.

6.2 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für den Nachweis der Integrität bzw. Dichtheit der Endlagergebinde eine Vielzahl von Nachweisen für planmäßige Einwirkungen bei ungestörtem Betrieb des Endlagers und außerplanmäßige Einwirkungen bei gestörtem Endlagerbetrieb zu führen sein werden. Für den Nachweis der Integrität der Endlagergebinde unter Endlagerungsbedingungen ist wie für die Beförderung und die Zwischenlagerung solcher Abfallgebinde der Abfallablieferer zuständig. Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die an Endlagergebinde unter Endlagerungsbedingungen gestellten Anforderungen abgeleitet, da konkrete Annahmebedingungen mit solchen Anforderungen an Abfallgebinde für ein HAW-Endlager derzeit noch nicht existent sind.

Für den gestörten Endlagerbetrieb sind insbesondere die außerplanmäßigen mechanischen und thermischen Einwirkungen auslegungsbestimmend. Die in diesem Zusammenhang zu erstellenden Nachweise sind grundsätzlich ähnlich zu den Nachweisen, die für die Beförderung (d. h. nach Transportrecht) und ggf. für eine vorangegangene Zwischenlagerung (d. h. nach Lagerrecht) zu erbringen sind. Daher können für einen Teil der Endlagergebinde bereits einige Nachweise als erbracht angesehen werden.

Der Nachweis der Integrität der Endlagergebinde unter Endlagerungsbedingungen ist bislang jedoch nicht für alle in diesem Vorhaben betrachteten Endlagergebindetypen erfolgt oder unter der Annahme von Rahmenbedingungen, die nur eingeschränkt auf die heutigen Behäl-

ter- bzw. Endlagerkonzepte übertragen werden können. Nach derzeitiger Datenlage ist der Nachweis der Integrität der in Bohrlöchern endzulagernden Endlagergebäude, insbesondere von Brennstabkokillen und HAW-Kokillen, aufgrund statischer mechanischer Einwirkungen durch den Gebirgsdruck sowie durch thermisch induzierte Spannungen der Endlagergebäude und überlagerte thermisch induzierte Spannungen aus dem Gebirge auf die Endlagergebäude von besonderem Interesse. Ein weiterer Schwerpunkt ist der Nachweis der Integrität der Endlagergebäude für die auslegungsrelevanten Störfälle und die damit im Zusammenhang stehenden mechanischen und thermischen Einwirkungen.

Für den Fall, dass die Integrität von Endlagergebäuden während der Betriebsphase des Endlagers nicht nachgewiesen werden kann, wird hinsichtlich der Gewährleistung der radiologischen Betriebssicherheit auf den Bericht /DBE 2008c/ verwiesen.

7 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde der aktuelle Kenntnisstand zum Nachweiskonzept der Integrität der einschlusswirksamen (geo-)technischen Barrieren für ein Endlager für hochradioaktive und wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle zusammengestellt. Betrachtet wurden die Behälter, (bzw. die Endlagergebinde), sowie der Versatz (Salzgrus), Bohrlochverschluss, Streckenverschluss und Schachtverschluss.

Innerhalb eines langen Zeitraums geht Versatz aus Salzgrus (siehe Kapitel 2) in seinem Verhalten in das des festen Steinsalzes über. Mit diesem Übergang ist der Versatz Bestandteil der geologischen Barriere. Das Nachweiskonzept bei der ungestörten Entwicklung des Endlagers sieht vor, dass technische Barrieren die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bis zum Zeitpunkt dieses Überganges des Salzgrus zum festen Steinsalz sicherstellen.

Das Kompaktionsverhalten von Salzgrus wurde für die Streckenlagerung im Projekt BAMBUS, für die Bohrlochlagerung im Projekt DEBORA sowohl numerisch als auch im Rahmen von in-situ-Versuchen untersucht. Auch wenn in beiden Projekten der Bereich der geringen Porositäten und Permeabilitäten in-situ nicht erreicht wurde, lässt sich aus den Ergebnissen jedoch ableiten, dass eine hinreichende Kompaktion im Fall der Bohrlochlagerung deutlich schneller als bei der Streckenlagerung zu erreichen ist. Zur Führung des Nachweises einer hinreichenden Kompaktion sind aber noch weitere Kenntnisse erforderlich, die das Kompaktionsverhalten in Abhängigkeit von den Beanspruchungen in der jeweiligen Einlagerungsvariante bis in den Übergangsbereich vom Salzgrus zum Steinsalz beschreiben.

Für den Fall der gestörten Entwicklung des Endlagers ist die Permeabilität die entscheidende Größe, um die Freisetzungsrates zu begrenzen. In der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung muss der Bereich kleiner Porositäten noch abgesichert werden. Neben der Beherrschbarkeit von Gasen muss auch der Einfluss von Feuchtigkeit und Lösung auf das Kompaktionsverhalten des Salzgrus berücksichtigt werden. Hierfür liegen zwar bereits Erkenntnisse vor, dieser Einfluss muss aber noch detaillierter betrachtet werden. Zusätzlich zum Kompaktionsverhalten des Versatzes unter dem Einfluss von Lösung stellt die Untersuchung einer möglichen Ausbildung von Strömungskanälen im Versatz eine zentrale Aufgabenstellung für den Nachweis der radiologischen Schutzziele im Zusammenhang mit einer begrenzten Freisetzung dar.

Bezüglich der Stoffmodelle für Salzgrus kann festgestellt werden, dass bereits Konzepte existieren, die das physikalische Verhalten des Versatzes in der numerischen Materialbeschreibung abbilden, diese müssen aber noch in Hinblick auf kleine Porositäten und Permeabilitäten sowie Feuchteinfluss erweitert und validiert werden.

Der Bohrlochverschluss (siehe Kapitel 3) dient während der Betriebszeit des Endlagers zunächst der Abschirmung der ionisierenden Strahlung der eingelagerten Abfallbehälter. Langfristig soll der Bohrlochverschluss dann eine Dichtfunktion übernehmen und zusammen mit dem Steinsalz den sicheren Einschluss der Endlagerbehälter gewährleisten. Im Rahmen des DEBORA-Projektes erfolgten bereits Untersuchungen für einen als lose Salzgrusschüt-

tung ausgeführten Bohrlochlochverschluss für die Einlagerung von HAW-Kokillen in 300 m tiefen Bohrlöchern. Hier wurden sowohl numerische Berechnungen zur Quantifizierung der zu erwartenden Einwirkungen als auch ein in-situ-Versuch durchgeführt. Hinsichtlich des Nachweises der hinreichenden Kompaktion des Salzgrus besteht jedoch noch Forschungsbedarf, da diese im Rahmen des DEBORA-Versuchs in-situ noch nicht gezeigt werden konnte und für numerische Untersuchungen vorhandene Stoffmodelle für den Bereich geringer Porositäten und Permeabilitäten noch weiter abgesichert werden müssen. Untersucht werden sollte auch eine Modifikation des Designs. Der Bohrlochverschluss könnte auch aus Salzformstücken mit einem Ringraum aus Salzgrus ausgeführt werden. Eine hinreichende Kompaktion des Salzgrus wäre mit diesem Design früher zu erreichen als bei einem Verschluss, der komplett aus Salzgrus besteht.

Streckenverschlüsse (Kapitel 4) dichten an noch genauer festzulegenden Positionen die Verbindungsstrecken von den Schächten zu den Einlagerungsbereichen des Endlagers ab. Konzeptionelle Arbeiten zu Streckenverschlüssen wurden in den letzten Jahren insbesondere im Rahmen der Arbeiten zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) und des Forschungsbergwerks Asse durchgeführt. Das hierfür entworfene Nachweiskonzept ist prinzipiell auf die geotechnischen Barrieren Strecken- und Schachtverschlüsse anwendbar und konnte exemplarisch für eine Referenz-Streckenabdichtung des ERAM geführt werden. Das Nachweiskonzept beinhaltet den Nachweis eines ausreichend geringen hydraulischen Widerstandes der einzelnen Elemente des Abdichtungskörpers (Baukörper, Kontaktzone, Gebirge inkl. Auflockerungszone), sowie ingenieurtechnische Einzelnachweise der Bauwerksintegrität (Nachweis der Rissbeschränkung), sowie den Nachweis der Dauerhaftigkeit bzw. Langzeitstabilität um zu gewährleisten, dass es zu keiner unzulässigen Permeabilitätserhöhung im Nachweiszeitraum kommt. Die an die ERAM-Streckenabdichtung gestellten Anforderungen (Nachweiszeitraum 30000 a, querschnittsgemittelte Permeabilität $k < 10^{-18} \text{ m}^2$, maximale Fluidruckbelastung $p_{\text{max}} = 6 \text{ MPa}$, etc.) unterscheiden sich jedoch von denen eines HAW-Endlagers. Im Rahmen anderer Vorhaben wie z. B. dem Projekt CARLA oder für das Versuchsverschlussbauwerk Sondershausen werden und wurden in-situ-Großversuche zu Streckenverschlüssen durchgeführt. Diese Vorhaben sind zusammenfassend in Kapitel 4.2 dargestellt. Zu beachten ist, dass es sich um objektbezogene Speziallösungen handelt, die hinsichtlich Konstruktion und Material individuell geplant wurden. Ein speziell auf die zu erfüllenden Anforderungen und zu berücksichtigenden Einwirkungen ausgelegtes Konzept für Streckenverschlüsse für ein HAW-Endlager am Referenzstandort besteht noch nicht. Die bestehenden Konzepte sind unter Kenntnis der Nachweiszeiträume - welche im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse noch genauer spezifiziert werden müssen - sowie unter dem Aspekt neuerer Erkenntnisse zur Langzeitstabilität der Baustoffe zu überarbeiten. Dies betrifft beispielsweise Fragen zur Kompaktion und der damit gekoppelten Entwicklung der hydraulischen Parameter des Langzeitdichtelementes (z. B. Steinsalzbricketts) oder der Langzeitstabilität der Widerlagerbaustoffe bzw. ggf. eingesetzter Dichtmaterialien, wie Asphalt und Bitumen.

Die Betrachtung für den Schachtverschluss erfolgte in Kapitel 5. Für die Komponenten „Dichtelement“ und „setzungsstabile Stützsäule“ liegen nach erfolgreicher Durchführung der in-situ-Großversuche in den Schächten Salzdettfurth Referenzen hinsichtlich der Materialwahl, einbauvorbereitenden Arbeiten sowie Einbautechnik und -parametern vor. Die

Übertragbarkeit der Ergebnisse des Bohrschachtversuchs Salzdetfurth auf die Randbedingungen eines Endlagerschachtverschlusses muss jedoch geprüft werden. Hier ist sowohl ein geometrisches als auch zeitliches up-scaling sowie eine Überprüfung der Übertragbarkeit standortspezifischer Randbedingungen und Parametern (insbesondere in Hinblick auf die Ausbildung der Auflockerungszone) erforderlich. Vorgestellt werden in Kapitel 5 auch u. a. die Konzepte zum Schachtverschluss ERAM, WIPP-Site sowie ein allgemeines Konzept für einen Schachtverschluss im Salz. Die bestehenden Konzepte sind unter Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse zur Langzeitstabilität der Baustoffe zu überarbeiten. Im Rahmen der Nachweisführung steht die Übertragung des Konzeptes der Teilsicherheitsbeiwerte auf probabilistische Verfahren zur Angabe von Versagenswahrscheinlichkeiten noch aus.

Für die Bewertung des hydraulischen Widerstandes der geotechnischen Barrieren Strecken- und Schachtverschluss ist die Beschreibung (Beschreibbarkeit) der Auflockerungszone (geschädigter Gebirgsbereich) von besonderem Interesse. Besonderes Augenmerk ist hierbei auf den Einfluss standortspezifischer Randbedingungen (z. B. Teufenlage und herrschender Gebirgsdruck, Fluiddruck, rheologische Gebirgseigenschaften, Festigkeitseigenschaften, etc.) zu richten, die unmittelbaren oder mittelbaren Einfluss auf die Ausbildung und Größe der dilatanten Auflockerungszone haben. Für diesen geschädigten Gebirgsbereich können bis dato die für die hydraulische Nachweisführung erforderlichen Parameter Permeabilität und Porosität in Abhängigkeit des Schädigungsgrades nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Ebenso ist deren (zeitliche) Entwicklung in Abhängigkeit der sich ändernden Spannungsrandbedingungen (Aufkriechen des Gebirges, Aufbau eines Porendrucks) nicht hinreichend bekannt. Die hierzu erwarteten Ergebnisse des derzeit laufenden EU-Forschungsprojektes THERESA sind dahingehend auszuwerten.

Die weitere Untersuchung hydromechanischer Effekte (wie z. B. Rissvernetzung/Rissöffnung einer vorgeschädigten Probe bei einem Fluiddruck $p > \sigma_{\min}$) erscheint im Rahmen von Laborversuchen unter endlagerrelevanten Randbedingungen sinnvoll, zumal zwangsläufig infolge des Nachschnittes/Spitzens im Bereich des hydraulischen Dichtelementes mit der (Wieder-)Ausbildung einer dilatanten Zone zu rechnen ist.

Letztendlich ist für das Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren der Begriff „sicherer Einschluss“ von Bedeutung und in Hinblick auf die endliche Dichtheit und begrenzte Lebensdauer der geotechnischen Barrieren und der schwer prognostizierbaren Salzgruskompression sinnvoll zu definieren.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass Konzepte zur Nachweisführung für die (geo-)technischen Barrieren bereits vorliegen. Aus der Langzeitsicherheitsanalyse werden Vorgaben an den hydraulischen Widerstand der Barrieren ermittelt. Für jede zu betrachtende Barriere muss dann der Nachweis der Standsicherheit, der Rissbeschränkung und der Dauerhaftigkeit geführt werden. Zudem ist auch der Nachweis der Herstellbarkeit zu führen. Die Einhaltung des vorgegebenen hydraulischen Widerstands für Dichtkörper, Kontaktzone und Auflockerungszone ergibt dann zusammen mit den vorgenannten Nachweisen den Integritätsnachweis für das jeweilige geotechnische Bauwerk. Die Einzelnachweise können dann auf Basis der Methode der Teilsicherheitsbeiwerte geführt werden, womit Aussagen zum

Sicherheitsniveau ermöglicht werden. Ein weiteres Nachweiskonzept stellt die Analyse von Gefährdungsbildern mittels mathematischer und physikalischer Modelle zur Herleitung Lebensdauer bezogener Versagenswahrscheinlichkeiten dar.

Im Ergebnis der Bearbeitungen zu den einzelnen Barrieren ist festzustellen, dass weitere Arbeiten hinsichtlich des Nachweises einer ausreichenden dichten Auflockerungszone der geotechnischen Barrieren sowie der Übertragung der Vorgehensweise nach Eurocode bei deutlich längeren Nachweiszeiträumen erforderlich sind. Diese weiteren Arbeiten hängen von den noch genauer zu spezifizierenden Vorgaben aus der Langzeitsicherheitsanalyse ab. Von zentraler Bedeutung für diese Vorgaben und auch für die Quantifizierung von Einwirkungen ist die vertiefte Untersuchung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus bei kleinen Porositäten und Permeabilitäten. Diese Fragestellung ist auch beim Design des Bohrlochverschlusses zu berücksichtigen. Arbeiten hierzu werden von den ISIBEL-Projektpartnern im Forschungsprojekt REPOPERM seit 10/2007 durchgeführt.

Für die Behälter ergeben sich Anforderungen an die Integrität bereits während der Betriebsphase des Endlagers, da dies eine Grundvoraussetzung für die Barriereintegrität während der Nachbetriebsphase ist. Daher wurden in Kapitel 6 die planmäßigen Einwirkungen auf Endlagergebäude bei ungestörtem Betrieb des Endlagers während der Betriebs- und Nachbetriebsphase und außerplanmäßige Einwirkungen bei gestörtem Betrieb des Endlagers während der Betriebsphase, insbesondere durch auslegungsrelevante Störfälle, beschrieben. Die Einhaltung der Schutzziele bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die den Schutz von Mensch und Umwelt vor der Schädigung durch ionisierende Strahlung dieser Abfälle gewährleisten sollen, ist sowohl für die ungestörte als auch für die gestörte Entwicklung des Endlagers nachzuweisen. Dazu wurden für den Nachweis der Integrität der Endlagergebäude Dichtheitskriterien für die Betriebsphase des Endlagers abgeleitet. Das Nachweiskonzept sieht vor, dass die Barriereigenschaften der Behälter, d. h. der technischen Barriere, für den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe zeitlich begrenzt sind bis die anderen geotechnischen Barrieren (Versatz, Bohrloch-, Strecken- und Schachtverschluss) planmäßig ihre volle Wirksamkeit erreicht haben.

Der Nachweis der Integrität, d. h. Dichtheit, ist bislang nicht für alle in diesem Vorhaben betrachteten Endlagergebündetypen erfolgt. Im Zusammenhang mit dem Nachweis der Barriereintegrität von Endlagergebünden wurden insbesondere für POLLUX-Behälter, Brennstabkokillen und HAW-Kokillen bereits zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Eine umfassende Bewertung, inwieweit die dabei zugrunde gelegten Annahmen bzw. Randbedingungen auf die heutigen Endlagerkonzepte übertragen werden können und auch für die im Rahmen dieses Vorhabens abgeleiteten Einwirkungen auf Endlagergebäude gelten, steht derzeit noch aus. Aus heutiger Sicht sind beispielsweise auch mechanische Einwirkungen auf Endlagergebäude durch thermisch induzierte Spannungen der Endlagergebäude und überlagerte thermisch induzierte Spannungen im Gebirge zu berücksichtigen; diese Spannungen sind insbesondere beim Nachweis der Barriereintegrität von Brennstabkokillen zu berücksichtigen.

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 4-1: Zusammenstellung von Konzepten zu bzw. bereits ausgeführten Streckenschlussbauwerken (nach /WAGNER 2005/)	44
Tabelle 4-2: Bestandteile des Abdichtungssystems sowie verwendete Materialien	49
Tabelle 6-1: Planmäßige Einwirkungen auf Endlagergebäude während der Betriebs- und Nachbetriebsphase	98
Tabelle 6-2: Abdeckende Lastfälle der mechanischen Einwirkungen auf POLLUX- und CASTOR-Behälter bei gestörtem Endlagerbetrieb (auslegungsrelevante Störfälle)	103
Tabelle 6-3: Dichtheitskriterien beim Nachweis der Integrität der Endlagergebäude für die Beförderung, Zwischen- und Endlagerung	103

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1-1: Methodischer Ansatz zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis	9
Abbildung 1-2: Sicherheitskonzept „Sicherer Einschluss“	10
Abbildung 1-3: Zusammenhang zwischen Langzeitsicherheitsanalyse und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren /MÜLLER-HOEPPE et al. 2006b/	12
Abbildung 1-4: Bohrlochverschluss aus Salzgrus	13
Abbildung 1-5: Entwurf Streckenverschluss ERAM /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/	14
Abbildung 1-6: Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar /SITZ 2001/	15
Abbildung 3-1: Bohrlochverschluss aus Salzgrus	34
Abbildung 4-1: Darstellung eines zweiseitig wirkenden Endlagerbauwerks (nach /FISCHER 1991/)	47
Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Versuchsdammes /FISCHER 1991/	49
Abbildung 4-3: Prinzip eines Streckenverschlusseses für ein HAW-Endlager in Salz (nach /DBE 1998/)	50
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung des Verschlußkonzeptes für Strecken im ERAM (nach /WITTKE 1996/)	51
Abbildung 4-5: Konzept eines Streckenverschlusses des ERAM (nach /MÜLLER-HOEPPE et al. 2004/)	52
Abbildung 4-6: Konzept eines Streckenverschlusses der WIPP-Site (nach /SANDIA 1993/)	53
Abbildung 4-7: Konzept eines Streckenverschlusses im Carnallitit (nach /SITZ et al. 2006/)	54
Abbildung 4-8: Darstellung des Verschlußbauwerkes Bergwerk Hope (Draufsicht, nach /FISCHLE et al. 1987/)	55
Abbildung 4-9: Versuchsverschlußbauwerk Sondershausen (nach /SITZ et al. 2003b/)	56
Abbildung 4-10: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Leopoldshall nach /N.N. 1902/	57
Abbildung 4-11: Längsschnitt des Dammbauwerkes im Bergwerk Sachsen-Weimar (nach /LOHMANN 1930/)	58
Abbildung 4-12: Dammbauwerk Immenrode (nach /ALAND et al. 1999/)	59
Abbildung 4-13: Zusammenhang zwischen LZSA und dem ingenieurtechnischen Nachweis technischer Barrieren (nach /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/)	62
Abbildung 4-14: Algorithmus zu Entwurf und Bemessung untertägiger Verschlussbauwerke (nach /WAGNER 2005/)	66

Abbildung 5-1:	Prinzip eines Schachtverschlusses für ein HAW-Endlager in Salz (nach /DBE 1998/)	74
Abbildung 5-2:	Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept für Endlager im Salinar (nach /SITZ 2001/)	75
Abbildung 5-3:	Vorschlag für ein Schachtverschlusskonzept zur Trockenverwahrung von Bergwerken (nach /SITZ 2001/)	75
Abbildung 5-4:	Planung zur Verfüllung und Abdichtung der 4 Tagesschächte für das amerikanische Endlager WIPP (nach /SANDIA 2002/)	77
Abbildung 5-5:	Arten von Schachtverwahrungen und Anordnung der Dichtelemente (nach /BODENSTEIN et al. 2002/)	80
Abbildung 5-6:	Aufbau der Dichtungen für die vorgenannten Schachtverwahrprinzipien (nach /BODENSTEIN et al. 2002/)	81
Abbildung 5-7:	Bohrschachtversuch in Salzdettfurth zur Untersuchung von Dichtelementen mit binärem Calciumbentonit (nach /BREIDUNG 2002/)	82
Abbildung 5-8:	Salzdettfurth Schacht II mit Schotterverfüllung (nach /TEICHMANN et al. 2002b/)	87
Abbildung 5-9:	Bergmannsseggen-Hugo Schacht Ottosshall mit Schotterverfüllung /HAVERKAMP et al. 2002/	90
Abbildung 5-10:	Widerlagerformen; kohäsive Verfüllung (A) bzw. gleitfähiger Pfropfen (B) (nach /BODENSTEIN et al. 2002/)	92

Literaturverzeichnis

- /ADR 2002/ Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Strasse (ADR-Übereinkommen) vom 30. September 1957, zuletzt geändert durch die 16. Änderungsverordnung vom 14.12.2002 (BGBl. 2002 II S. 2922 Anlagenband)
- /AkEnd 2002/ Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd, Dezember 2002
- /ALAND et al. 1999/ Aland, H.-J.; Handke, N.; Leuschner, J.; Bodenstein, J.; Maelzer, K.; Gruner, M.; Sitz, P.; Springer, H.: Langzeitfunktionstüchtiger Streckenverschluß aus kompaktiertem Bentonit im Bergwerk Sondershausen. Kali und Steinsalz 12 (1999), Nr. 9, S. 24 - 29
- /BfS 2003/ Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standortzwischenlager in Biblis der RWE Power AG und der RWE Rheinbraun AG, AZ.: GZ-V 3 – 8531 5 10 vom 22. September 2003 (S. 41, 119, 120), veröffentlicht unter:
http://www.bfs.de/de/transport/gv/dezentrale_zl/standort/kwb.html
- /BGR 1995/ Stührenberg, D.; Zhang, C.L.: Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus als Versatzmaterial für Endlagerbergwerke im Salz unter besonderer Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz. BGR-Bericht, Archiv-Nr. 113 259, Hannover: BGR, 1995
- /BGR 1998/ Stührenberg, D.; Zhang, C.L.: Projekt Gorleben - Kompaktion und Permeabilität von Salzgrus (AP 9G 21382100) - Endbericht 1995 - 1997. BGR, Hannover, 1998. unveröffentlicht
- /BGR 2007/ Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. Abschlussbericht für das Vorhaben ISIBEL, AP3, BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007
- /BODENSTEIN et al. 2002/ Bodenstein et al.: Zehn Jahre Schachtverwahrung im Südharz-Kalirevier, Erfahrungen aus Sicht von Planung und Ausführung, Glückauf 138, 4/2002
- /BREIDUNG 2002/ Breidung, K. P.: Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, K+S AG, Bad Salzdetfurth, August 2002

- /BUSCH 1991/ Busch, W.: Abschlußbauwerke als wesentlicher Bestandteil des Mehrbarrierenkonzeptes für Endlager von radioaktiven Abfällen. In: Dammbau im Salzgebirge, Vorträge zur Informationsveranstaltung am 5. und 6. Dezember 1990, DBE, Peine, 1991
- /DBE 1994a/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8221), Simulation des Schachttransportes, Funktionsprüfung der SELDA-Anlage (TA 8), März 1994 (S. 3-6)
- /DBE 1994b/ Dammbau im Salzgebirge, Neukonzipierung – Arbeitspaket 1: Grundlagenermittlung, DBE, Peine August 1994
- /DBE 1995/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02 E 8191), Handhabungsversuche zur Streckenlagerung, Versuche zur Behebung von Betriebsstörungen (TA 4), September 1995 (S. 3-18)
- /DBE 1998/ Filbert, W.; Engelmann, H.-J.: Aktualisierung des Konzepts „Endlager Gorleben“ Abschlußbericht, DBE, Peine 1998
- /DBE 1999a/ Müller-Hoeppe, N.; Krone, J.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087) – Abschlussbericht Hauptband. Peine: DBE, 1999
- /DBE 1999b/ Müller-Hoeppe, N.; Pöhler, M.: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager. Dokumentierte Erfahrung hinsichtlich dichter Dammbauwerke im Salinar, Technischer Anhang 2, FKZ 02 E 9087, DBE, Peine, 1999
- /DBE 2006a/ DBE Technology GmbH, DENKMAL, Komponentenbeschreibung Einlagerungsvorrichtung, 24.03.2006 (Blatt 33)
- /DBE 2007a/ DBE Technology GmbH, Lastenheft, Detailplanung interner Transferbehälter für BSK 3, 26.06.2007 (Blatt 16, 17, 18, 19)
- /DBE 2007b/ persönliche Mitteilung von Hr. Wehrmann zum Gespräch mit GNS am 09.05.2007
- /DBE 2008a/ Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008

- /DBE 2008b/ Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
- /EC 1999/ European Commission: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS Project) - Final Report. Nuclear Science and Technology, EUR 19124 EN. Luxemburg: European Communities, 1999
- /EC 2004/ European Commission: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS II Project) - Final Report. Nuclear Science and Technology, EUR 20621 EN. Luxemburg: European Communities, 2004
- /ENGELMANN 1991/ Engelmann, H.J.: Entwicklung von Dammbauwerken für ein Endlager im Salzgestein In: Dammbau im Salzgebirge, Vorträge zur Informationsveranstaltung am 5. und 6.12.1990 in Peine, DBE, Oktober 1991
- /ENGELMANN et al. 1988/ Engelmann, H.J., Fischer, H.; Hänsel, W., Wallner, M.: Dams as Sealing Systems in Rock Salt Formations - Test Dam Construction, WM'88, Tucson, Az, Vol. 1, p. 283-287
- /EUR 1995/ The HAW project: Test disposal of highly radioactive radiation sources in the Asse mine, Final report, GSF, 1995
- /EUR 1996/ The Debora project Phase 1: Development of borehole seals for high-level radioactive waste repositories in salt formations, GSF, ECN 1996
- /EUROCODE 2002/ DIN EN 1990, Eurocode: Basis of structural design, Oktober 2002
- /FISCHER 1991/ Fischer H.: Entwicklung des Versuchsdammbauwerkes von der Konzeption zur berg- und bautechnischen Realisierung. In: Dammbau im Salzgebirge Vorträge zur Informationsveranstaltung am 5. und 6.12.1990 in Peine, DBE, Oktober 1991
- /FISCHLE et al. 1987/ Fischle, W.; Schwieger, K.: Untersuchungen an einem Abschlussbauwerk im Kalisalzbergwerk Hope. Kali und Steinsalz 9 (1987), Heft 11
- /FRANKE 1991/ Franke, E.: Zusammenhänge zwischen Bauteilfunktion, Gestaltungsvorhaben, Gebirgs- und Baustoffeigenschaften und Herstellungsproblemen. In: Dammbau im Salzgebirge Vorträge zur Informationsveranstaltung am 5. und 6.12.1990 in Peine, DBE, Oktober 1991

- /GATTERMANN 1998/ Gattermann, J.: Theorie und Modellversuch für ein Abdichtungsbauwerk aus hochverdichteten Bentonitformsteinen. WBI-Print 2, Glückaufverlag Essen
- /GEISER 2006/ Geiser, H., GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, Behälterauslegung für die Aufnahme von verglasten Abfällen, veröffentlicht in Internationale Zeitschrift für Kernenergie atw, August/September 2006 (S. 532 – 536)
- /GLÄSS et al. 2005/ Investigation of a salt concrete seal in the Asse salt mine. WM'05 Conference, 27.02. – 03.03. 2005, Tucson, AZ
- /GNB 1996a/ Mechanische Störfallbetrachtungen für den Transport-, Lager- und Endlagerbehälter POLLUX 10 DWR- / 30 SWR-BE, GNB B 069/96, April 1996, Revision 0 (S. 5-7)
- /GNB 1996b/ Thermisches Verhalten des Transport-, Lager- und Endlagerbehälters POLLUX 10 DWR- / 30 SWR-BE bei einem Feuer und Verschüttung, GNB B 024/96, Juli 1996, Revision 0 (S. 7)
- /GRS 1996/ Fein, E., et al.: Ableitung einer Permeabilitäts-Porositätsbeziehung für Salzgrus und Dammbaumaterialien. GRS-132. Braunschweig: GRS, 1996
- /GRS 1999a/ Müller-Lyda, I.: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz - Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. GRS-143. Braunschweig: GRS, 1999
- /GRS 1999b/ Müller-Lyda, I., et al.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen im Salzgrus. GRS-148. Braunschweig: GRS, 1999
- /GRS 1999c/ Müller-Lyda, I.: Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz Ableitung einer Permeabilitäts-Druck-Relation für Langzeitsicherheitsanalysen. GRS-151. Braunschweig: GRS, 1999
- /GRS 1999d/ Rothfuchs, T., et al.: The DEBORA-Project: Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste - Phase II - Final Report. GRS-161. Braunschweig: GRS, 1999
- /GRS 2000/ Becker, D.-A.; et al.: Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungstrecken. GRS-164 / SIG-02/99. Braunschweig: GRS, 2000

- /GRS 2001/ Droste, J., et al.: Experimental Investigations on the Backfill Behaviour in Disposal Drifts in Rock Salt (VVS-Project). GRS-173. Braunschweig: GRS, 2001
- /GRS 2003a/ Rothfuchs, T., et al.: Final Evaluation of the Project "Thermal Simulation of Drift Emplacement" (TSDE-Project) - Final Report. GRS-194. Braunschweig: GRS, 2003
- /GRS 2003b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, Vorschlag der GRS, GRS-A-3110, Juli 2003 (S. 10, 11, 23, 24, 29, 30)
- /GRS 2004a/ Rothfuchs, T., et al.: Cluster Repository Project - German-Country Annexes. GRS-201. Braunschweig: GRS, 2004
- /GRS 2004b/ Rübel, A., et al.: Konzeptioneller Umgang mit Gasen im Endlager. GRS-205. Braunschweig: GRS, 2004
- /GRS 2004c/ Gmal, B.; et al.: Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für ausgediente Kernbrennstoffe in unterschiedlichen Wirtsformationen. GRS - A - 3240. Köln: GRS, 2004
- /GRS 2008/ Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS, 2008
- /GRUNER et al. 2003/ Gruner, M.; Schwandt, A.; Sitz, P.: Salzton – Natürliches Analogon für Bentonitdichtelemente im Salinar, Kali und Steinsalz, 2/2003
- /HAMPEL 2007/ Hampel, A.: Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2007
- /HAVERKAMP et al. 2002/ Haverkamp, B.; Techmann, L.; Wischle, W.; Heda, M.: Schachtverfüllung Bergmannsseggen-Hugo; Geotechnische Messungen; Untersuchungen zur Schottersäule im Schacht Ottosshall, DBE, Peine, 19.04.2002
- /HEDA et al. 2002/ Heda, M.; Manthee, F.; Fischle, W.: FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth; Untersuchungen im Bohrschacht; Dokumentation der geotechnischen Messtechnik, DBE, Peine, 26.03.2002

- /HERBERT et al. 2005/ Herbert, H.-J. et al.: Alteration of Non-Metallic Barriers and Evolution of Solution Chemistry in Salt Formations in Germany. – In: Engineered Barrier Systems (EBS) in the Context of the Entire Safety Case: Process Issues, Workshop Proceedings, Las Vegas, NV/USA, 14-17 September 2004. Paris: OECD/NEA, 2005, pp. 111-123
- /HÜLSMANN et al. 1991/ Hülsmann, K.; Schmidt-Schleicher, H.; Schorn, H.: Teilverfüllung von Schächten mit kohäsiven Verfüllsäulenabschnitten. In: DMT-Publik Nr. 10, 1991
- /ICT 1991/ Sicherheitstechnischer Vergleich von Einlagerungsvarianten und Berechnung des Druckaufbaus im Bohrloch, Forschungsvorhaben MAW- und HTR-BE-Versuchseinlagerung in Bohrlöchern (Projekt MHV), Institut für Chemische Technologie, 1991
- /KORTHAUS 1996/ Korthaus, E.: Consolidation and Deviatoric Deformation Behaviour of Dry Crushed Salt at Temperatures up to 150°C. 4th Conference on the Mechanical Behaviour of Salt (Montreal 1996)
- /KUDLA et al. 2006/ Kudla, W.; Gruner, M.: Streckenverschlüsse: Konzepte und Materialien. In Untertägige Entsorgung, Siebtes Statusgespräch, Karlsruhe 03./04.05.2006, Wiss. Berichte FZK-PTE Nr. 9, S. 1 - 22
- /LOHMANN 1930/ Die Anwendung des chemischen Verfestigungsverfahrens bei der Abdichtung eines Laugendamms und bei Schachtabdichtungsarbeiten auf dem Kaliwerk Sachsen-Weimar in Unterbreizbach (Rhön). Kali und verwandte Salze, Zeitschrift für die Kali- und Steinsalzindustrie sowie das Salinenwesen, Deutscher Kaliverein, 1930
- /MANTHEE et al. 2002/ Manthee, F.; Teichman, L.; Fischle, W.; Heda, F.: FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth; Untersuchungen im Bohrschacht; Auswertung und Interpretation der Messergebnisse, DBE, Peine, 10.04.2002
- /MAUKE et al. 2003/ Mauke, R.; Wollrath, J.; Müller-Hoepe, N.: Closure Concept for the Morsleben LLW Repository for Radioactive Waste - Design of Drift Seals in a Former Salt mine. OECD/NEA Workshop on Engineered Barrier Systems in the Context of the Entire Safety Case, Sept.25-27, 2002, Oxford, UK (2002), NEA/RWM/IGSC(2003)4
- /MAUKE et al. 2006/ Mauke, R.; Müller-Hoepe, N.; Wollrath, J.: Planning, Assessment and Construction of a Drift Seals in a Salt Repository – Overview of Investigations, Engineered Barrier Systems in the Context of the Entire Safety Case (EBS), OECD/NEA Workshop Proc. Sept.12-15, 2006, Tokyo, Japan

- /MÜLLER-HOEPPE et al. 2004/ Müller-Hoeppe, N.; Mauke, R.; Wollrath, J.: Repository Seal Requirements and Design. Proc. NEA Workshop "Engineered Barrier Systems (EBS) Design Requirements and Constraints, Turku, Finland; 26-29 August 2003, ISBN 92-64-02068-3
- /MÜLLER-HOEPPE et al. 2006a/ Müller-Hoeppe, N.; Krone, J.; Biurrun, E.; Haverkamp, B.: Safety by Design – the Role of Repository Design within the Safety Case, Technical Meeting on Planning and Design of Geological Repositories, Vienna, 25 – 27 September 2006, IAEA
- /MÜLLER-HOEPPE et al. 2006b/ Müller-Hoeppe, N.; Kreienmeyer, M.; Polster, M.: Geotechnische Barrieren - Komponenten der Endlagersicherheit. 4. Workshop Kompetenzverbund Kerntechnik am 04. Oktober 2006, Stuttgart
- /MÜLLER-HOEPPE et al. 2007/ Müller-Hoeppe, N.; Jobmann, M.; Polster, M.; Schmidt, H.: The Role of Structural Reliability of Geotechnical Barriers of an HLW/SF Repository in Salt Rock within the Safety Case. OECD/NEA Symposium on "Safety Cases for the Deep Disposal of Radioactive Waste - Where do we stand?" Paris, 23.-25.01.2007
- /N.N. 1902/ Wasserdichte Verdämmung im Steinsalzgebirge. Glückauf 38, Nr. 14, S. 307 – 309)
- /NOSECK et al. 2005/ Noseck, U. et al.: Treatment of drift seal performance in the long-term safety assessment for a repository in a salt formation. OECD/NEA Workshop on integration of engineered barrier systems in the safety case: the role of modeling, La Coruna - Spain, 24-26 August, NEA/RWM/IGSC(2005)4
- /OECD 2002/ The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety of Deep Geological Repositories, OECD/NEA Workshop Proc., Paris, France, 16-18. April 2002
- /OELLERS et al. 1985/ Oellers, T. Sitz, P.: Entwurf und Berechnung gas- und flüssigkeitsdichter Schachtverschlüsse. Schacht- und Tunnelbaukolloquium, 1985
- /POPP et al. 2007/ Popp, T.; Minkley, W.: Bewertung der Gasproblematik in einem Endlager im Salz auf Basis von In-situ-Tests, Vortrag beim Workshop „Gase im Endlager“, GRS, Berlin, April 2007
- /PTE 2007/ Bericht über die im zweiten Halbjahr 2006 vom BMBF und BMWi geförderten FuE-Arbeiten zur "Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen". PTE Nr. 32. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2006

- /PtWT+E 2003/ Fachgespräch "Verschlussbauwerke für untertägige Hohlräume - Kenntnisstand und offene Fragen", Vortragsunterlagen und Materialien, Freiburg, März 2003
- /RAUCHE et. al. 2004/ Closure of the Morsleben Repository – Conceptual Design and Safety Proof of Shaft Sealing Systems, 26. – 28. April 2004, Berlin, Poster, DisTec 2004 Conference
- /SAE 1984/ NUKEM GmbH, DWK mbH, Systemstudie Andere Entsorgungstechniken, technische Beschreibung der Endlagerbehälter für abgebrannte Brennelemente, Technischer Anhang 1, Dezember 1984 (S. 2-2)
- /SANDIA 1993/ SANDIA National Laboratories: Seal design alternatives study. SAND92-7340, Albuquerque, New Mexico, 1993
- /SANDIA 2002/ SANDIA National Laboratories :Waste Isolation Pilot Plant, Shaft Sealing System Compliance Submittal Design Report, Attachment 12, Repository Isolation Systems Department, Albuquerque, November 25, 2002
- /SCHMIDT et al. 1996/ Schmidt, M. W. et. al.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken - Vorprojekt. GSF-Bericht 32/95, FKZ: 02C02340
- /SCHULZE 1986/ Schulze, O.: Der Einfluss radioaktiver Strahlung auf das mechanische Verhalten von Steinsalz. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Band 137 (1986). S. 47-69
- /SCHULZE 2007/ Schulze, O.: Gasbildung, Druckaufbau und Permeation, Vortrag beim Workshop „Gase im Endlager“, GRS, Berlin, April 2007
- /SITZ 2001/ Sitz, P.:
Langzeitstabile Verschlussbauwerke in Strecken und Schächten, Bergbaukolloquium Freiberg, Bergbau 11/2001
- /SITZ et al. 1998/ Sitz, P.; Gruner, M.: Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar. Statusgespräch 14./15.10.1997, Wiss. Berichte FZK-PTE Nr. 5, S. 291 - 301
- /SITZ et al. 1999/ Sitz, P. ; Koch, G.: Langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke im Salinar. Untertägige Entsorgung – 4. Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen, Wiss. Berichte FZK-PTE Nr. 6, S. 169 - 207

- /SITZ et al. 2003a/ Sitz, P. ; Gruner, M.; Rumphorst, K.: Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar, Kali und Steinsalz, 3/2003
- /SITZ et al. 2003b/ Sitz, P. et al.: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckenverschlussbauwerke für UTD im Salinar, Bau und Test eines Versuchsverschlussbauwerkes unter realen Bedingungen. Abschlussbericht zum BMBF-geförderten Vorhaben 02C05472 und 02C0902
- /SITZ et al. 2003c/ Sitz, P. ; Rauche, H.: Langjährige Erfahrungen im Salzbergbau und Fortschritte bei der Stilllegung von Salzbergwerken – Nutzbar für die Endlagerung? bergbau 10/2003
- /SITZ et al. 2006/ Sitz, P. ; Kudla, W. ; Gruner, M.: Projekt CARLA – Grundkonzept eines Streckenverschlussbauwerkes im Carnallitit. Fachgespräch „Verschlußmaßnahmen für untertägige Entsorgungseinrichtungen, CARLA – Streckenverschluss im Carnallitit und weitere F&E-Aktivitäten, Teutschenthal, 13. & 14. Oktober, 2005
- /StrlSchV 2001/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20. Juli 2001 (BGBl. S. 1714, Jahrgang 2001 Teil I Nr. 38, ausgegeben zu Bonn am 26. Juli 2001)
- /TA Abfall/ Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBI. Nr. 8 S. 139) zuletzt geändert am 21. März 1991 durch Berichtigung der Gesamtfassung der Zweiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) (GMBI. Nr. 16 vom 23.05.1991 S. 469)
- /TEICHMANN et al. 2002a/ Teichmann, L.; Neydek, J.; Heda, M.: FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth; Geotechnische Messungen; Untersuchungen zur Schottersäule im Schacht I, DBE, Peine, 24.04.2002
- /TEICHMANN et al. 2002b/ Teichmann, L.; Neydek, J.; Manthee, F.: FuE-Vorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth; Geotechnische Messungen; Untersuchungen zur Schottersäule im Schacht II, DBE, Peine, 13.05.2002
- /THYSEN Schachtbau 2002/ Damm- und Abdichtungstechniken im Steinsalz- und Kalibergbau. in: Thyssen Schachtbau Gruppe, Report 2002, p. 30 - 35

- /THYSSEN
Schachtbau 2007/ Referenzliste Langzeitsichere Verschlussbauwerke und Abdich-
tungsmaßnahmen im Steinsalz- und Kalibergbau.
[http://www.shaftsinking-
mining.de/pdfs_reflist/sichereVerschlussbauwerke_n.pdf](http://www.shaftsinking-mining.de/pdfs_reflist/sichereVerschlussbauwerke_n.pdf)
- /WAGNER 2005/ Wagner, K.: Beitrag zur Bewertung der Sicherheit untertägiger Ver-
schlussbauwerke im Salinargebirge, Dissertation, TU Bergakademie
Freiberg, 2005
- /WITTKE 1996/ Wittke, W.: Abdichtung von Strecken im Endlager Morsleben mit
hochverdichtetem Bentonit. Geotechnik 19, Heft 4, S. 304 - 311