

Arbeitsgruppe Morsleben (AG Morsleben)

Prüfbericht

Bearbeitungsphase (a)

im Rahmen der Prüfung der Unterlagen zum

**Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive
Abfälle Morsleben (ERAM) – Prüfkomplex: Schachtverschlussystem der
Schächte Bartensleben und Marie**

- Unterlagen P 182, P 177, G 183, Planungsstudie (Preuss & Wellmann) -

Auftraggeber: Ministerium für Landwirtschaft und
Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt
Rahmenvertrag Nr. 29/02/1998
Einzelauftrag Nr. 16/02/2005

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

Verantwortliche

Bearbeiter:	Dipl.-Ing. K. Herchen	TU-Clausthal
	Dr.-Ing. U. Düsterloh	TU-Clausthal
	Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux	TU-Clausthal
	Dr. U. Stahl	IHU Stendal

Der Prüfbericht umfasst 172 Seiten

Datum: 12.03.2007

Unterschrift:
(Dr. U. Stahl)

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

Erklärung:

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

Datum: 12. März 2007

Unterschrift:

.....
(Dipl.-Ing. K. Herchen)

.....
(Dr.-Ing. U. Düsterloh)

.....
(Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux)

.....
(Dr. U. Stahl)

Mitglieder der Arbeitsgruppe Morsleben:

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

	Seite
0 Vorwort und Zusammenfassung	5
1 Grundsätzlicher Sachstand und Methodik der Prüfung	9
1.1 Grundsätzlicher Sachstand	9
1.2 Bewertungsmaßstäbe und Prüfmethode	14
1.3 Prüfungsumfang und Begriffsdefinitionen	18
2 Bewertung der konzeptionellen Vorgehensweise	26
2.1 Konzeptionelle Vorgehensweise des Antragstellers	26
2.2 Bewertungskriterien	36
2.3 Bewertung	37
3 Bewertung der Aussagen zur geologischen und hydrogeologischen Situation an den Schächten Marie und Bartensleben	40
3.1 Aussagen des Antragstellers	40
3.2 Bewertungskriterien	40
3.3 Bewertung	41
4 Bewertung der geohydraulischen Modellierung der schachtnahen Volumenströme beim Dichtelement DE 1	46
4.1 Aussagen des Antragstellers	46
4.2 Bewertungskriterien	46
4.3 Bewertung	46
5 Bewertung der Aussagen zur geohydraulischen Dimensionierung der Dichtelemente DE 2 und DE 3	51
5.1 Aussagen des Antragstellers	51
5.2 Bewertungskriterien	52
5.3 Bewertung	52
6 Bewertung der Aussagen zum Setzungsverhalten der Verfüllsäule	56
6.1 Aussagen des Antragstellers	56
6.2 Bewertungskriterien	56
6.3 Bewertung	56
7 Bewertung der Aussagen zum Kontaktbereich Dichtelement DE 1 - Gebirge	59
7.1 Aussagen des Antragstellers	59
7.2 Bewertungskriterien	59
7.3 Bewertung	59
8 Bewertung der Aussagen zur vorgesehenen Beraubung der Schachteinbauten und der Auflockerungszone	62
8.1 Aussagen des Antragstellers	62
8.2 Bewertungskriterien	62
8.3 Bewertung	62
9 Bewertung der Aussagen zu den angesetzten Lastfällen	64
9.1 Aussagen des Antragstellers	64
9.2 Bewertungskriterien	64
9.3 Bewertung	64
10 Bewertung der Aussagen zu den Füllörtern	66
10.1 Aussagen des Antragstellers	66
10.2 Bewertungskriterien	66
10.3 Bewertung	67

11	Bewertung der Aussagen zu der konstruktiven Verfüllsäulengestaltung im Bereich der Störungszone zwischen 177 und 178 m Teufe beim Schacht Bartensleben	68
11.1	Aussagen des Antragstellers	68
11.2	Bewertungskriterien	68
11.3	Bewertung	68
12	Bewertung der Aussagen zu den Schottersäulen	70
12.1	Aussagen des Antragstellers	70
12.2	Bewertungskriterien	70
12.3	Bewertung	71
13	Bewertung der Aussagen zum Dichtelement DE 1	73
13.1	Aussagen des Antragstellers	73
13.2	Bewertungskriterien	73
13.3	Bewertung	74
14	Bewertung der Aussagen zu den Numerischen Nachweisen	76
14.1	Aussagen des Antragstellers	76
14.2	Bewertungskriterien	77
14.3	Bewertung	77
15	Bewertung der Aussagen zur Sicherheitstheorie	80
15.1	Aussagen des Antragstellers	80
15.2	Bewertungskriterien	81
15.3	Bewertung	82
16	Bewertung der Aussagen zum Gebirgsaufbau und der Berücksichtigung der vorhandenen Schachtrandbedingungen und der Schachtgeometrien	91
16.1	Aussagen des Antragstellers	91
16.2	Bewertungskriterien	92
16.3	Bewertung	92
17	Bewertung der Aussagen zu den kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3	94
17.1	Aussagen des Antragstellers	94
17.2	Bewertungskriterien	95
17.3	Bewertung	95
18	Schlussbetrachtungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen	97
19	Anlagen	99
19.1	Rechtsgrundlagen zum Schachtverschluss im Zuge der Stilllegung von Anlagen für radioaktive Abfälle	99
19.2	Darlegung des wissenschaftlich-technischen Kenntnisstandes und des daraus ableitbaren Standes von Wissenschaft und Technik	118
19.3	Inhaltliche Anforderungen an die konzeptionelle Vorgehensweise in Anlehnung an §55 der HOAI	159
20	Liste der verwendeten Literatur	162
21	Liste der verwendeten Unterlagen	166
22	Zusammenstellung der Hinweise, Empfehlungen und Forderungen	167

0. Vorwort und Zusammenfassung

Der vorliegende Zwischenbericht stellt in Form einer erweiterten Gedankenskizze erste Einschätzungen der AG Morsleben zum Prüfkompex „Schachtverschlusssystem der Schächte Bartensleben und Marie“ zusammen. Die formale Gestaltung erfolgt in grober Anlehnung an die Anforderungen, die an die Anfertigung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsvorschriften gestellt werden, genügt diesen aber noch nicht in allen Teilen bzw. in letzter Konsequenz. Eine diesbezüglich abschließende Prüfung erfolgt in Verbindung mit der noch ausstehenden zahlenmäßigen Prüfung und Durchdringung der Sachverhalte.

Ausgehend von der kritischen Durcharbeitung der vorgelegten Prüfunterlagen kommen die Prüfer auf der Grundlage einschlägiger Regelwerke, der Fachliteratur und der eigenen Erfahrung zusammenfassend zu folgender Einschätzung (Zusammenstellung noch bestehender Defizite ohne Gewichtung hinsichtlich der Reihenfolge):

- (1) Die vom AS in /U1/ und /U2/ dokumentierte *konzeptionelle Vorgehensweise* wird im Grundsatz als geeignet erachtet, die Nachweise zur Langzeitstabilität (geochemische Beständigkeit), zur Tragfähigkeit (Standssicherheit) und zur Gebrauchstauglichkeit (Dichtigkeit) der Schachtverschlüsse des ERA Morsleben erbringen zu können. Sie ist im Einklang mit den gültigen Normen, Richtlinien und Verordnungen stehend anzusehen. Als Mangel erachten es die Prüfer allerdings, dass durch die Wahl eines nicht geeigneten alternativen Grundkonzeptes keine zwei als gleichwertig anzusehenden Grundkonzepte als Diskussionsgrundlage zur Verfügung stehen. Aus diesem Defizit folgt, dass die anschließende konzeptionelle Vorgehensweise zur Optimierung des Schachtmodells in nicht ausreichender Form erfolgt.

Zu prüfen ist nach Einschätzung der Prüfer, ob nicht ein langfristig wirksam werdendes Dichtelement „verdichteter Salzgrus“ im Bereich des anstehenden Salzgesteins und damit ein dem geogenen Milieu entsprechendes Langzeitabdichtungselement in die Schachtverschlusssysteme integriert werden kann und muss, da bei ausschließlicher Verwendung artfremder Materialien im Bereich des Steinsalzgebirges eine geogene und damit geochemisch mit Sicherheit langfristig über geologische Zeiträume beständige Barriere eher nicht erreicht wird. Demgegenüber eröffnet die Teilverfüllung der Schächte mit verdichtetem Salzgrus in Verbindung mit der auflaufenden Konvergenz grundsätzlich die Möglichkeit, die bestehende Perforation der geologischen Barriere langfristig weitgehend adäquat zu reparieren.

Eine inhaltliche Begründung für die konkrete Höhe des Bemessungsgrenzwertes des Volumenstroms von 2 m³/a oder ein Bezug zum Langzeitsicherheitskonzept wurde nicht dargelegt. Vorstehende Aussage gilt auch für den vom AS auf 30.000 Jahre festgelegten Nachweiszeitraum.

Die Funktion der zwischen den beiden Widerlager-Dichtelementen angeordneten Tonschicht erschließt sich aus den Ausführungen nicht.

- (2) Durch die Verwendung von abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden für die Herstellung der Filterschichten wird eine geringere **Setzungsstabilität der Verfüllsäule** erreicht als sie bei dem Forschungsprojekt Salzdettfurth durch den Einsatz von Schotter/Splitt bis Feinsand festgestellt worden ist. Daher ist der Nachweis durch ein bloßes Heranziehen und Übertragen der Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben nach hier nach Ansicht der Prüfer nicht erbracht. Darüber hinaus ist es durch die Nichtberücksichtigung des insgesamt 9 m mächtigen Filterschichtbereiches in der geomechanischen Modellierung nicht möglich, Aussagen über das Setzungsverhalten der Filterschichten aus den numerischen Berechnungen heraus abzuleiten.
- (3) In den Prüfunterlagen wird das **Setzungsverhalten des Bentonitgemisches** in nicht ausreichender Weise berücksichtigt. Die Prüfunterlagen lassen eine Beschreibung der Beraubung der Auflockerungszone im Bereich des Dichtelementes DE 1 vermissen. Die Beschreibung bzw. Festlegung von Beraubungsmethodik und Beraubungsqualität ist aber notwendig, da das Setzungsverhalten mit den einhergehenden Auflockerungserscheinungen im Konturbereich wesentlich von der aus der Beraubungstechnik resultierenden Rauigkeit der Wand beeinflusst wird. Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse aus dem Forschungsprojekt Salzdettfurth auf die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben ist kritisch zu untersuchen.
- (4) In den Unterlagen des AS existieren Widersprüche hinsichtlich der Angaben zur **Beraubung der Einbauten und der Auflockerungszone**. Es fehlt darüber hinaus die Darstellung von Lösungsmöglichkeiten, wie die Beraubung betriebstechnisch sowie gerätetechnisch durchgeführt werden kann.
- (5) Bei den **angesetzten Lastfällen** wird lediglich ein Fluiddruck von unten berücksichtigt, der aus dem hydrostatischen Druck in Abhängigkeit der Teufenlage des unteren Dichtelementes und der Dichte der Lösung resultiert. Eine nicht ausschließbare Rückbildung bis hin zur Wiederverheilung der Zutritts-Wegsamkeiten, die unter Umständen zu einem Fluiddruck auf petrostatischem Druckniveau durch den Einschluss von

Salzlösungen und/oder Gas infolge der Gebirgskonvergenz führen könnte, bleibt als weiterer möglicher Lastfall unberücksichtigt. Darüber hinaus werden die Einwirkungen aus Seismizität und im speziellen aus Erdbeben nur unzureichend behandelt.

- (6) Der Antragsteller legt eine **Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter** nicht vor. Es wird lediglich dargelegt, welche Annahmen Eingang in die numerischen Berechnungen gefunden haben.
- (7) Die Gefährdung der langfristigen Funktionstüchtigkeit des **Bentonit-Dichtelementes** durch die nahe gelegene wasserführende geologische Formation des Feinsandes in 177,75 m Teufe beim Schacht Bartensleben mit dem hier unmittelbar auf den Schachtausbau anstehenden hydraulischen Druck von 11,5 bar hat in der konstruktiven Gestaltung der Verfüllsäule keine Berücksichtigung gefunden.
- (8) Die bisher gesammelten Erfahrungen mit dem Schottereinsatz bei Schachtverfüllungen sind nicht geeignet, die **Setzungsstabilität der Schottersäulen** für die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben aufgrund der hier wesentlich höheren Anforderungen nachzuweisen. Die Zulässigkeit der Übertragung der Erfahrungen aus den Versuchen am Schacht Salzdettfurth II auf das vorliegende Projekt muss hinsichtlich des Siloeffektes bedingt durch die unterschiedlichen Schachtdurchmesser bzw. -formen kritisch überprüft werden.
- (9) Die Gefährdung der **Langzeitbeständigkeit des Bentonit-Dichtelementes** durch chemische Veränderungen der Lösungen infolge von Zementphasen, die durch die Verwendung von Zement bei sanierungsbedingten Verpressarbeiten früherer Jahre resultieren könnten, bleibt unberücksichtigt. Eine mögliche (gezielte) Entfernung im Rahmen der Beraubung der Auflockerungszone wird in den Unterlagen nicht erwähnt. Darüber hinaus fehlen Angaben über die Einbring- und Verdichtungstechnik sowie die Darlegung von möglichen Auswirkungen einer Teildurchfeuchtung des Bentonit-Dichtelementes im Hinblick auf die Funktionstüchtigkeit der restlichen Bentonitbereiche.
- (10) In den **numerischen Nachweisen** wird die geomechanische Nachweisführung durch den Verzicht auf ein dreidimensionales Berechnungsmodell dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht gerecht. Weitere Defizite bestehen hinsichtlich des Umfangs der geomechanischen Nachweisführung durch den Verzicht auf eigene Berechnungen für den Schacht Bartensleben sowie bezüglich der Umsetzung der Anfor-

derungen auf eine nachvollziehbare Dokumentation der verwendeten Bemessungsgrößen.

- (11) Der rotationssymmetrische Ansatz der **geohydraulischen Modellierung** der Fluidströmung an den Dichtelementen im Deckgebirge entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Der Verzicht der Berücksichtigung von Auflockerungszonen im Kontaktbereich Dichtelement/Gebirge stellt keinen konservativen Ansatz dar. Eine Modellierung der Volumenströme erfolgt ausschließlich für das Dichtelement im Deckgebirge und nicht für das im Salinar.
- (12) In den Prüfunterlagen wird kein geschlossenes **Sicherheitskonzept** als Grundlage für die Nachweisführungen dargelegt. Zwar werden vom AS die Termini der Nachweisführung nach dem Eurocode verwendet, die Nachweisführung selbst erfolgt aber nicht konsistent und konsequent in diesem Kontext. Hinsichtlich einer vollständigen und nachvollziehbaren Dokumentation bestehen insbesondere bei der Festlegung der Eingangswerte für die Berechnungen und bei der Verwendung der Teilsicherheitsbeiwerte Defizite. Die Ergebnisse der geohydraulischen Berechnungen ergeben, dass das Bemessungsziel beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllt wird.
- (13) Die Verschlusskonstruktion des Schachtes Marie sieht vor, dass diese teilweise im Carnallitit ausgeführt werden soll. Abdichtungsbauwerke in Carnallititschichten des Salinargebirges sind nach derzeitiger Kenntnis noch nicht Stand der Technik. Die **Darstellung der anstehenden Gebirgsverhältnisse** (Gesteinsinformation) und der **Schachtgeometrien** in den Plänen der Anhänge der Prüfunterlagen sind in den übergebenen Unterlagen widersprüchlich und werden in der Nachweisführung nicht ausreichend berücksichtigt. Die Prüfunterlagen lassen Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich der Problematik einer möglichen Aufwältigung und Beräumung des Schachtbereiches unterhalb des Mauerwerksabrisses beim Schacht Marie vermissen.
- (14) Einen Mangel bezüglich einer schlüssigen Nachweisführung stellen die Widersprüche in den Randbedingungen für die **Dimensionierung der Widerlager-Dichtelemente** dar. Die Länge des Dichtelementes DE 2 wird beim Schacht Marie bei der Bewertung der Sicherheit mit 47,00 m angesetzt. Dabei bleiben die beschriebene Reduzierung von 15 m aufgrund von Asphaltverlusten sowie die Nichtansetzung der Kaliflözbereiche unberücksichtigt. Die Darstellung möglicherweise auftretender Dichtigkeitsprobleme nach der Verfüllung im Bereich der Korkenzieherwendel ist unvollständig und nicht nachvollziehbar.

1 Grundsätzlicher Sachstand und Methodik der Prüfung

1.1 Grundsätzlicher Sachstand

Das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU LSA) als Planfeststellungsbehörde für die Stilllegung und Verwahrung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) hat die AG-Morsleben mit der Begleitung und Bewertung von geowissenschaftlichen Erkundungsmaßnahmen des Antragstellers (BfS – Bundesamt für Strahlenschutz) beauftragt. In diesem Rahmen wurde die AG-Morsleben (im Weiteren als „Prüfer“ bezeichnet) u. a. mit der Erstellung eines Prüfberichtes zu den Unterlagen „Schachtverschlusssystem der Schächte Bartensleben und Marie“ beauftragt (= Prüfunterlage).

Die Prüfunterlage ist in Teilen im Auftrag des BfS durch eine ARGE bestehend aus ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau GmbH, TU Bergakademie Freiberg -Institut für Bergbau- sowie der Kali und Salz GmbH erarbeitet worden. Der nachfolgende Prüfbericht dokumentiert die Ergebnisse der Prüfung.

Der methodische Aufbau des Prüfberichtes ist charakterisiert durch ein dreistufiges Gliederungssystem, bei dem

- (1) die Ausführungen des Antragstellers (im Folgenden AS genannt) zusammenfassend skizziert werden,
- (2) ein Bewertungsmaßstab bzw. Bewertungskriterien eingeführt werden, die an dem Stand von Wissenschaft und Technik im jeweiligen Sachzusammenhang orientiert sind und
- (3) durch eine Gegenüberstellung von (1) und (2) eine Bewertung der zu prüfenden Unterlage erfolgt.

Grundsätzliche Bewertungskriterien sind Beachtung von Regelwerken, Vollständigkeit, Plausibilität, Widerspruchsfreiheit, ausreichende Belege.

Die Ergebnisse der Bewertung werden schließlich den Rubriken

- Hinweise,
- Empfehlungen und
- Forderungen

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

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

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

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

Dem Prüfbericht vorangestellt ist eine kurze Zusammenstellung des Inhaltes der einzelnen Prüfunterlagen. Ziel dieser Zusammenstellung ist es, dem Leser in knapper und übersichtlicher Form einen Überblick über die wesentlichen und im Rahmen der Prüfung sachlich relevanten Inhalte zu ermöglichen. Der methodische Aufbau des Prüfberichtes erfolgt in grober Anlehnung an die Anforderungen, die in der Rahmenrichtlinie über die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren (19) genannt werden, genügt diesen aber nicht in allen Teilen bzw. in letzter Konsequenz. Eine diesbezüglich abschließende Prüfung ist nach Einschätzung der Prüfer nur sinnvoll möglich in Verbindung mit der noch ausstehenden zahlenmäßigen Prüfung und Durchdringung der Sachverhalte.

Gemäß (19) ist der Inhalt von Prüfberichten gekennzeichnet durch:

- (a) Wiedergabe der Fragestellung
- (b) Wiedergabe des Sachverhaltes (kurz und prägnant, Verweise auf Antragsunterlagen)
- (c) Bewertungsmaßstäbe mit Angabe der verwendeten Regeln und Richtlinien und deren Würdigung, sowie Angabe und Würdigung eventueller Abweichungen von den Regeln und Richtlinien
- (d) Angabe der durchgeführten Prüfungen und Berechnungen mit Hinweisen zum Zweck, Umfang und Systematik
- (e) Bewertung des sicherheitstechnischen Gesamtkonzeptes
- (f) Zusammenfassung des Gutachtens
- (g) Zusammenstellungen (Inhaltsverzeichnis, Abkürzungsverzeichnis, Liste der verwendeten Unterlagen, Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Verzeichnis der verwendeten Regeln, Richtlinien und Gesetze, Zusammenstellung der im Gutachten genannten Randbedingungen)

Bei der Prüfung fanden folgende Prüfunterlagen Berücksichtigung:

/U1/ Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben (AS Unterlage P 182)

Inhalt:

Auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes sowie gültiger Vorschriften und Gesetze werden für einen Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren und einen durch die Schachtverschlüsse durchtretenden Fluidvolumenstrom von kleiner $2 \text{ m}^3/\text{a}$ als Zielvorgabe die Bauwerksentwürfe für die beiden Schächte des ERA Morsleben konzipiert.

Für die in den Bauwerksentwürfen ausgewiesenen Baustoffe werden zunächst die Nachweise der Langzeitstabilität geführt. Darauf aufbauend werden die Nachweise für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der im Konzept entworfenen Schachtverschlussbauwerke erfolgreich erbracht. Abschließend erfolgt eine Wertung in Bezug auf die mit dem Bauwerksentwurf erreichten Sicherheitsniveaus.

Die nachfolgend beschriebene Unterlage /U2/ ist in dieser Konzeptplanung bis auf die Anlagen fast vollständig enthalten.

/U2/ Nachweisführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben (AS Unterlage P 177)

Inhalt:

In der Unterlage werden zunächst Nachweise der Langzeitstabilität für Bentonit gegenüber wässrigen Lösungen aus dem Deckgebirge, für Bitumen/Asphalte sowie für Schotter, Kiese, Sande geführt. Darauf aufbauend werden die Nachweise für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit der im Konzept entworfenen Schachtverschlussbauwerke erbracht. Abschließend erfolgt eine Wertung in Bezug auf die mit dem Bauwerksentwurf erreichten Sicherheitsniveaus.

Diese Unterlage hat fast vollständig Eingang in die Unterlage /U1/ gefunden.

/U3/ Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie (AS Unterlage G 183)

Inhalt:

Nach Darstellung der Auslegungsanforderungen, der geologischen Verhältnisse sowie einer Zusammenfassung des technischen Konzeptes für die Verfüllung der Schächte Marie und Bartensleben werden die einzelnen Komponenten wie Stützsäule unterhalb des Dichtelementes, Dichtelementsystem, obere Widerlagersäule sowie Abschlussbauwerk beschrieben. Im Kapitel Qualitätssicherung erfolgt eine Differenzierung in eine allgemeine Qualitätssicherung für die Baustoffe und deren Einbau sowie eine besondere Qualitätssicherung für das Dichtelementsystem.

/U4/ Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie.
Preuss, J. & Wellmann, P. L.; BfS; 2000

Inhalt:

Ziel der Planungsstudie ist die Darstellung der Randbedingungen und Abhängigkeiten, die für die weiteren Planungsschritte erforderlich sind.

Im Rahmen der Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte „Bartensleben“ und „Marie“ werden die Grundlagen und Vorgaben zur Planung der Schachtverschlussysteme vorgestellt. Weiterhin erfolgt eine kurze Beschreibung der geologischen und gebirgsmechanischen Situation im Bereich der Schächte.

Im Anschluss werden die bestehenden Anforderungen aus dem / den Stilllegungskonzept(en), der geologischen und bergbaulichen Situation beschrieben. Des Weiteren erfolgt die Darstellung

- *der vorgesehenen Projektorganisation*
- *die Gliederung der Teilaufgaben zur Konzept- (KPL) und Entwurfsplanung (EWP)*
- *der Meilensteine und Termine sowie*
- *des Berichtswesens.*

Weiterhin in die Prüfung mit einbezogen wurden:

/U5/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Bartensleben (AS Unterlage I 107)

/U6/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Marie (AS Unterlage I 108)

/U7/ Untersuchung zur Entwicklung und Bewertung von Stilllegungskonzepten nach dem Abdichtkonzept (AS Unterlage I 114)

Hinweis:

Im Folgenden sind aus den Prüfunterlagen /U1/ bis /U4/ wörtlich zitierte Formulierungen zur Unterscheidung von den Formulierungen der Prüfer *kursiv* gedruckt.

1.2 Bewertungsmaßstäbe und Prüfmethodik

Für die Bewertung der vorgelegten Prüfunterlagen werden die folgenden Richtlinien und Empfehlungen herangezogen:

- (1) Euratom-Richtlinien /L1/
- (2) Atomgesetz (AtG) /L2/
- (3) Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrlVG) /L3/
- (4) Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /L4/
- (5) Deponieverordnung (DepV) /L5/
- (6) Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1 /L6/
- (7) Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten; Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld – Verfügung vom 14.07.1989 – 10.3–1/89– B II f. 5.2–I– /L7/
- (8) Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. „Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken“ /L8/
- (9) Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. „Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Kavernen“ /L9/
- (10) CEN – Eurocode 1, „Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Bauwerke – Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung“ /L10/
- (11) CEN – Eurocode 7, „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“, Teil 1, Allgemeine Regeln /L11/
- (12) DIN 1054:2005-01, „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ /L12/
- (13) SIA – 260, „Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken“ /L13/
- (14) Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI); (1991): in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. März 1991 (BGBl. I S. 533) /L14/
- (15) DIN 1055:2002-06, „Einwirkungen auf Tragwerke – Teil : Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen“ /L15/

- (16) DIN 1055, „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“ /L16/
- (17) Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (BMI 1983) /L17/
- (18) Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Vorschlag der GRS) /L18/

Ein Teil der unter (1) bis (18) zusammengestellten Regelwerke und fachtechnischen Empfehlungen gelten nicht unmittelbar für die Planung und Sicherheitsnachweisführung von Endlagern bzw. Endlagerkomponenten wie z.B. Schachtverschlussbauwerken, werden aber z.B. aus den anderen Fachgebieten wegen Planungsgrundsätzen oder einer vergleichbaren Aktivität der langzeitsicheren Abfallbeseitigung einer gleichen Gebirgsformation als geologischer Barriere und im Grundsatz gleichartiger Schutzziele orientierend in die Prüfung einbezogen.

Den genannten Regelwerken sind vereinzelt direkt oder indirekt Hinweise zu entnehmen, welche Anforderungen an den geotechnischen Nachweis und damit an den Nachweis der Langzeitsicherheit und Dichtigkeit für Schachtverschlüsse eines Endlagers bzw. einer Untertagedeponie zu stellen sein könnten. Eine Zusammenstellung der aus den Regelwerken diesbezüglich zu entnehmenden Aussagen ist in Abschnitt 19 des Prüfberichts beigelegt.

Abgesehen von diesen eher grundsätzlichen Anforderungen und den Überlegungen / Vorgaben zur Planung / Nachweisführung enthalten die Regelwerke jedoch keine Vorgaben dahingehend, wie die geotechnischen Nachweise für Schachtverschlussbauwerke im Detail zu führen sind (z.B. Planungsgrundsätze, Berechnungsverfahren, Bewertungskriterien, Grenzwerte Sicherheitsmargen).

Da derartige Vorgaben derzeit nicht existieren, sind je nach individueller Erfahrung des Planers im generellen Rahmen der vorgenannten Regelwerke unterschiedliche Konzeptionen und methodische Vorgehensweisen für Planung, Konstruktion und Nachweisführung von Schachtverschlussbauwerken zu erwarten.

Vor diesem Hintergrund sind in Abschnitt 19 als weitere Grundlagen für die Prüfung für wesentlich erachtete, den wissenschaftlich-technischen Kenntnisstand bzw. den daraus ableitbaren Stand von Wissenschaft und Technik charakterisierende Forschungsbereiche und Veröffentlichungen zusammengestellt und inhaltlich dokumentiert.

Diese im Gegensatz zu anderen Bereichen des Ingenieurbaus stehende Situation einer weitgehend fehlenden Normung ist für den Untertagebau auch international charakteristisch und damit für den Endlagerbau im Salinar als einem seiner Teilgebiete nicht außergewöhnlich. In diesem Zusammenhang und mit Bezug auf die hier durchzuführende Prüfung der Nachweise für die Verschlussbauwerke wird insbesondere auf die RSK-Richtlinien /L17/ und /L18/ verwiesen, in denen es in /17/ heißt: *„Weil die Ingenieurkonzepte für das Endlagerbergwerk und die Anforderungen an die Endlagerprojekte von der betrachteten nicht normierbaren geologischen Situation geprägt werden, können keine allgemeinverbindlichen quantitativen Sicherheitskriterien festgelegt werden. Die erforderliche Sicherheit eines Endlagerbergwerkes in einer geologischen Formation muss daher durch eine standortspezifische Sicherheitsanalyse nachgewiesen werden, die dem Gesamtsystem geologische Verhältnisse, Endlagerbergwerk und Abfallprodukt/-gebinde Rechnung trägt.“*

Angesichts der inhaltlichen Bezüge und Verflechtungen zwischen den einzelnen Unterlagen /U1/ bis /U4/ wird, entgegen der sonst im Rahmen der Prüfung von AS Unterlagen zur Stilllegung des ERA Morsleben praktizierten Vorgehensweise mit einer individuellen (getrennten) Prüfung und Bewertung der einzelnen Unterlagen mit Erarbeitung von Hinweisen, Empfehlungen und Forderungen der hier vorliegende Prüfkomplex in einer einzigen zusammenfassenden Stellungnahme bewertet.

Die Ausführungen des AS zu der dargelegten Konzeptplanung und zu den Sicherheitsnachweismethoden sowie zu den Sicherheitsnachweiskriterien sind aus fachlich benachbarten Regelwerken bzw. der Fachliteratur unter folgenden Aspekten zu prüfen:

- (1) Entsprechen die vom AS dokumentierten konzeptionellen Planungen zur konstruktiven und bautechnischen Gestaltung der Schachtverschlüsse dem (abgeleiteten) Stand von Wissenschaft und Technik?

- (2) Entsprechen die gewählte Nachweiskonzeption und die Nachweise zur konstruktiven und bautechnischen Gestaltung der Schachtverschlüsse dem (abgeleiteten) Stand von Wissenschaft und Technik?
- (3) Sind die Nachweise der Langzeitstabilität (Langzeitbeständigkeit) der eingesetzten Materialien im relevanten geochemischen Milieu beispielsweise durch geeignete Vergleiche mit historischen und/oder natürlichen Analoga hinreichend erbracht?
- (4) Ist die Nachweiskonzeption grundsätzlich geeignet, die geotechnische Sicherheit des Verschlusskonzeptes hinreichend umfassend und angemessen zuverlässig darzulegen?
- (5) Sind die Einzelnachweise mit ihren Kriterien und Grenzwerten nachvollziehbar und schlüssig dokumentiert und stützen sie sich auf eine in sich geschlossene und plausible Sicherheitstheorie?
- (6) Werden die vorhandenen Erkenntnisse zum Materialverhalten der anstehenden Gesteine in relevanten Gebirgsformationen in geeigneter Weise bei der Festlegung von Kriterien und Grenzwerten sowie von Sicherheitsmargen berücksichtigt?
- (7) Sind die Kriterien und Grenzwerte durch hinreichende Untersuchungen und Messungen zum standortspezifischen Material- und Tragwerksverhalten belegt?
- (8) Wurden die potentiellen Einwirkungen auf die Schachtverschlüsse (Lastfälle) sowie das Tragvermögen der Verschlussmaterialien und der Verschlussbauwerke insgesamt angemessen in die Nachweisführung einbezogen?
- (9) Können vorhandene Erfahrungen und Ergebnisse aus vorangegangenen in-situ-Versuchen übertragen werden?
- (10) Bestehen noch gravierende Defizite in der konzeptionellen Planung und in der Nachweisführung?
- (11) Sind die Extrapolationen auf ingenieurtechnisch nicht fassbare Zeitbereiche hinreichend zuverlässig?

1.3 Prüfungsumfang und Begriffsdefinitionen

Die vorstehenden Ausführungen haben gezeigt, dass die bestehenden Regelwerke keine verbindlichen Aussagen dahingehend treffen, wie die geotechnischen Nachweise für Schachtverschlussbauwerke im Detail zu führen sind. Über das Fehlen detaillierter inhaltlicher Vorgaben bzgl. der Ausgestaltung der sicherheitlichen Nachweisführung hinaus ist im Rahmen der Prüfung der AS Unterlagen zu berücksichtigen, dass auch keine verbindlichen Vorgaben dahingehend existieren, welcher Planungsumfang innerhalb einzelner Projektierungsphasen (Grundlagenermittlung, Vorplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung, Ausführungsplanung) der Schachtverschlussysteme zu bearbeiten ist. Die Frage danach, welche Teilaufgaben mit welcher Nachweistiefe innerhalb einzelner Projektierungsphasen zu bearbeiten sind, liegt grundsätzlich im Ermessen des AS bzw. des projektierenden Ingenieurs. Für die Prüfung der vorgelegten Unterlagen zu den Schachtverschlüssen folgt daraus, dass die Bewertung der inhaltlichen Vollständigkeit zunächst beschränkt ist auf den jeweils dokumentierten Sachverhalt. Aussagen dahingehend, ob die dargestellten Sachverhalte vollständig sind im Sinne der Anforderungen an einzelne Projektierungsstufen wie Grundlagenermittlung, Vorplanung, Konzeptplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung oder Ausführungsplanung können nur nach vorheriger Definition bzw. Festlegung der Inhalte der einzelnen Projektierungsstufen getroffen werden.

Mit Bezug auf die vorstehenden Ausführungen erfolgte die Bewertung der vorgelegten Unterlagen zu den Schachtverschlüssen im Zwischenbericht (43) vom 20.11.2006 auf der Basis einer inhaltlich sachlichen Beurteilung ohne konkrete Vorgabe von Sollwerten für den Umfang der innerhalb einzelner Projektierungsstufen zu bearbeitenden Sachverhalte. Aussagen dahingehend, ob die im Prüfbericht aufgezeigten Defizite im Rahmen einer Konzeptplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung oder Ausführungsplanung zu bearbeiten sind, wurden nicht explizit getroffen. Vielmehr erfolgte die vorläufige Bewertung, soweit ohne eigene rechnerische Untersuchungen mit hinreichender Präzisierung überhaupt möglich, unter Berücksichtigung der an die sicherheitliche Nachweisführung für Schachtverschlussbauwerke zu stellenden Anforderungen mit dem ausdrücklichen Hinweis, dass eine weitergehende Präzisierung der Bewertung / Beurteilung der AS Unterlagen hinsichtlich ihrer sachlichen Richtigkeit und inhaltlichen Vollständigkeit grundsätzlich erst nach Durchführung eigener Ver-

gleichsberechnungen erfolgen kann. Die Ergebnisse der Prüfung wurden mit Datum vom 20.11.2006 in einem Zwischenbericht (43) dokumentiert und dem MLU LSA übergeben.

Im Rahmen eines am 10.01.2007 im MLU LSA geführten Fachgespräches mit Vorstellung der Prüfungsergebnisse wurde mit Bezug auf vorstehend genannte Ausführungen die Notwendigkeit der Festlegung inhaltlicher Anforderungen an einzelne Projektierungsstufen eingehend diskutiert. Grundlage für die Diskussion war die vom MLU LSA angeregte Fragestellung, ob bzw. inwieweit die unter dem Begriff der „Konzeptplanung“ eingereichten Unterlagen als vollständig im Sinne einer aufeinander aufbauenden Abfolge der Projektierungsstufen Grundlagenermittlung, Vorplanung, Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung und Ausführungsplanung bewertet werden können. Im Ergebnis der Diskussion wurde vom MLU LSA in Ergänzung des bestehenden Prüfungsauftrages erbeten, die inhaltlichen Anforderungen, die an einzelne Projektierungsstufen zu stellen sind, soweit möglich zu präzisieren und darauf aufbauend eine ergänzende Aussage / Bewertung dahingehend abzuleiten, welcher Projektierungsstufe die in den vorgelegten Unterlagen des AS dokumentierten Sachverhalte entsprechen und ob die Aussagen im Sinne der Projektierungsstufe inhaltlich vollständig sind. (Anmerkung: Die Unabhängigkeit der gutachterlichen Bewertung von Ergebnisanweisungen des Auftraggebers bleibt hiervon unberührt)

Da wie vorstehend erwähnt hinsichtlich der inhaltlichen Ausgestaltung einzelner Projektierungsstufen keine verbindlichen Vorgaben existieren, wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise des AS vereinbart, als Maßstab für die Abgrenzung der einzelnen Projektierungsstufen die Planungssystematik der HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) heranzuziehen und diese den Anforderungen an die Prüfung der Schachtverschlussysteme anzupassen. In diesem Zusammenhang ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass die Ausführungen der HOAI im vorliegenden Sachzusammenhang weder für den AS noch für die Prüfer bindend sind. Ihre Integration erfolgt vor diesem Hintergrund lediglich formal gestalterisch mit dem Ziel, aufzuzeigen, welche der im Rahmen der Prüfung aufgezeigten Defizite / Forderungen unter dem Zugeständnis einer auch unter Hinzuziehung der HOAI vergleichsweise unscharfen und in weiten Bereichen frei wählbaren Abgrenzung zwischen den Inhalten einzelner Projektierungsstufen im Rahmen der „Vorplanung“ zu bearbeiten sind und welche Forderungen schwerpunktmäßig den nachfolgenden Projektierungsstufen der Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung zuzuordnen sind.

§55 HOAI unterteilt die im Rahmen der Erstellung von Ingenieurbauwerken erforderlichen Leistungen in insgesamt 9 Leistungsphasen (Projektierungsstufen) wie folgt:

- (1) Grundlagenermittlung
(Ermitteln der Voraussetzungen zur Lösung der Aufgabe durch die Planung)
- (2) Vorplanung
(Projekt- und Planungsvorbereitung)
Erarbeiten der wesentlichen Teile einer Lösung der Planungsaufgabe
- (3) Entwurfsplanung
(System- und Integrationsplanung)
Erarbeiten der endgültigen Lösung der Planungsaufgabe
- (4) Genehmigungsplanung
Erarbeiten und Einreichen der Vorlagen für die erforderlichen öffentlich-rechtlichen Verfahren
- (5) Ausführungsplanung
Erarbeiten und Darstellen der ausführungsreifen Planungslösung
- (6) Vorbereitung der Vergabe
Ermitteln der Mengen und Aufstellen von Ausschreibungsunterlagen
- (7) Mitwirkung bei der Vergabe
Einholen und Werten von Angeboten und Mitwirkung bei der Auftragsvergabe
- (8) Bauoberleitung
Aufsicht über die örtliche Bauüberwachung
Abnahme und Übergabe des Objekts
- (9) Objektbetreuung und Dokumentation
Überwachen der Beseitigung von Mängeln und Dokumentation des Gesamtergebnisses

Der vorgelegte Prüfkomples besteht aus Einzelunterlagen, die mit den Begrifflichkeiten Konzeptplanung (U1), Nachweisführungen (U2), Konzept- und Systembeschreibung (U3) sowie Planungsstudie (U4) belegt werden. Dabei *lehnte sich nach /U1/ die Erarbeitung der Planungskonzeption für die Schachtverschlüsse des ERA Morsleben (Konzeptplanung) inhaltlich an die Honorarordnung für Architekten der HOAI an. Nach HOAI §55 Leistungsbild Objektplanung für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen kann eine Konzeptplanung der Leistungsphase 2 - der Vorplanung - gleichgesetzt werden.*

Die Leistungsphase 1 (Grundlagenermittlung) ist nach Aussage des BFS vorgenommen worden und wird mit der Unterlage /U4/ „*Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie*“ dargestellt.

In Analogie zu den Ausführungen des AS übernehmen die Prüfer den Begriff der „Konzeptplanung“ und verwenden diesen für die Bewertung der vorgelegten Unterlagen des Antragstellers. Der unter dem Begriff „Konzeptplanung“ subsumierte Leistungsumfang wird nachfolgend in Anlehnung an die Grundleistungen der Leistungsphase 2 (§55, HOAI) mit schachtverschlusspezifischer Präzisierung durch die Prüfer wie folgt definiert:

(1) Analyse der Grundlagen:

- Darlegung des Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar bzw. im wasserlöslichen/wassersensitiven Gebirge anhand bereits realisierter Projekte und wissenschaftlicher Untersuchungen auf nationaler und internationaler Ebene,
- Aufarbeitung der bergbautechnischen Entwicklung der Schachtanlagen Marie und Bartensleben und Identifizierung daraus gegebenenfalls resultierender Beeinträchtigungen der Integrität (Dichtheit) der zu erstellenden Schachtverschlussbauwerke sowie Darlegung der gegenwärtigen bergbaulichen Situation,
- Objektbezogene Darstellung und Diskussion der geologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Situation,
- Vergleich verschiedener Materialien und Konstruktionsprinzipien für die Verschlusskonstruktionen mit besonderer Berücksichtigung der erforderlichen Langzeitbeständigkeit bzw. Langzeitfunktionstüchtigkeit;

(2) Abstimmung der Zielvorstellungen auf die Randbedingungen:

- Zusammenstellung der heranzuziehenden Normen und Richtlinien für das Schachtverschlussprojekt,
- Festlegung der Zielvorgaben und Definition der Anforderungen an die Schachtverschlüsse unter Berücksichtigung der Randbedingungen;

(3) Untersuchung von Lösungsmöglichkeiten mit ihren Auswirkungen auf die bauliche und konstruktive Gestaltung und deren Zweckmäßigkeit unter Beachtung der Umweltverträglichkeit:

- Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes mit einer Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse,

- Festlegung von Lastfallkombinationen und Gefährdungsbildern,
 - Festlegung der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit in den einzelnen Nachweisführungen und Ermittlung der Größe der vorhandenen Versagenswahrscheinlichkeit sowie Art der praxisbezogenen Hilfsmittel, beispielsweise die Verwendung von Sicherheitsfaktoren, um die Einhaltung der festgelegten bzw. geforderten Bauwerkszuverlässigkeiten zu erreichen,
 - Auswahl geeigneter Baumaterialien für die Verschlussbauwerke mit Eignungsuntersuchung und Nachweisführung insbesondere in Bezug auf ihre Langzeitstabilität sowie ihrer mechanischen und hydraulischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen / Einwirkungen,
 - Erstellung von Konstruktionsprinzipien, die den Anforderungen hinsichtlich der Gefährungsbilder gerecht werden;
- (4) Erarbeitung eines Planungskonzeptes mit Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten nach gleichen Anforderungen mit zeichnerischer Darstellung und Bewertung:
- Erstellung eines Planungskonzeptes auf Grundlage der herausgearbeiteten Konstruktionsprinzipien und projektbezogenen Anforderungen mit zeichnerischer Darstellung,
 - Untersuchung und Bewertung alternativer Lösungsmöglichkeiten für das Planungskonzept und gegebenenfalls Optimierung des Entwurfes,
 - Nachweisführung mit einem idealisierten Modell nach dem erstellten Sicherheitskonzept und anschließender Darstellung und Interpretation der Berechnungsergebnisse sowie gegebenenfalls Überarbeitung und Optimierung in einem iterativen Prozess, bis alle erforderlichen Nachweise erbracht sind; Einschätzung von Gebirgsparametern für die Nachweisführung zu den Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie zu den hydraulischen Eigenschaften der anstehenden Gebirgsformationen sowie Parameterbestimmung für die Baumaterialien des Schachtverschlusses auf der Grundlage von Versuchen und Erfahrungen sowie Abbildung des Schachtverschlussbauwerkes (technische Konstruktion und umgebendes Gebirge) in ein nachweisbezogen konservativ abstrahiertes Modell, mit dessen Hilfe das Tragwerksverhalten hinreichend zuverlässig beschrieben (prognostiziert) werden kann und die erforderlichen Nach-

weise nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geführt werden können
(physikalische / chemische Modellierung und numerische Simulation).

- Sensitivitätsanalyse mit Parametervariation;
- (5) Klären und Erläutern der wesentlichen fachspezifischen Zusammenhänge, Vorgänge und Bedingungen.
- (6) Überarbeiten des Planungskonzeptes nach Bedenken und Anregungen.
- (7) Zusammenstellung aller Vorplanungsergebnisse und Bewertung der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und der Langzeitbeständigkeit auf der Grundlage von Versuchsergebnissen und Erfahrungen

Der geforderte Umfang muss nach Ansicht der Prüfer im Tiefgang so hinreichend sein, dass auch folgende Aspekte der Grundleistungen der Leistungsphase 1 (§55, HOAI) schlüssig, vollständig, nachvollziehbar sowie widerspruchsfrei dokumentiert sind:

- (1) Klären der Aufgabenstellung
- (2) Ermitteln der vorgegebenen Randbedingungen
- (3) Ortsbesichtigung (Sichtung von Befahrungsprotokollen)
- (4) Zusammenstellen der die Aufgabe beeinflussenden Planungsabsichten
- (5) Zusammenstellen und Werten von Unterlagen
- (6) Erläutern von Planungsdaten
- (7) Ermittlung des Leistungsumfanges und der erforderlichen Vorarbeiten
- (8) Formulieren von Entscheidungshilfen für die Auswahl anderer an der Planung fachlich Beteiligter
- (9) Zusammenfassen der Ergebnisse

Die Darstellung der Inhalte dieser genannten Punkte muss dabei nicht zwangsläufig nur in der Unterlage /U4/ zu finden sein, sich aber im Zuge einer gemeinsamen Stellungnahme über die gesamten Prüfunterlagen erschließen.

Ziel der skizzierten Anforderungen an den Umfang der Konzeptplanung ist es, standortspezifisch prädiktiv darzulegen, dass die Anforderungen an die Dichtigkeit der Verschlusskonstruktionen über den Nachweiszeitraum eingehalten und damit die hydraulische Sicherheit der Konstruktion mit ausreichenden Sicherheitsreserven im Grundsatz gewährleistet werden kann. Voraussetzung dazu sind hinreichende Standsicherheit und Langzeitbeständigkeit der

Materialien mit Trag- und Abdichtfunktion. Darüber hinaus ist insbesondere nachzuweisen, dass mit der gewählten Konstruktion die in /L1/ bis /L9/ sowie /L17/ und /L18/ genannten Schutzziele grundsätzlich eingehalten und damit entsprechende Gefährdungen ausgeschlossen werden können.

Somit gehen die Anforderungen an die vorgelegte Konzeptplanung (=Vorplanung gemäß Systematik HOAI) weiter als jene, die normalerweise in den Leistungsphasen 1 und 2 für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen des §55 der HOAI formuliert werden. Dies betrifft insbesondere Bereiche, wo es aufgrund fehlender Vorgaben durch die Erfahrung des Planers zu individuellen Konzeptionen und methodischen Vorgehensweisen für Planung, Konstruktion und Nachweisführung kommt. **So sind bei konstruktiven Lösungsansätzen des Planungskonzeptes, bei dem Zweifel an der Machbarkeit der Ausführung oder der Bemessung bestehen, hinreichend genaue Berechnungen bzw. Lösungen für die konstruktive Umsetzung aufzuzeigen.**

Angesichts ihrer herausragenden Bedeutung für die Langzeitsicherheit des Endlagers sind in der Konsequenz bereits in der Projektierungsstufe der „Vorplanung“ erste rechnerische Untersuchungen zur Machbarkeit für die Schachtverschlussbauwerke durchzuführen. Dies betrifft, wie zuvor bereits erwähnt, neben den Nachweisen für die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit für die entworfenen Schachtverschlussbauwerke auch die Nachweise der Langzeitstabilität der ausgewiesenen Baustoffe für den Bauwerksentwurf.

Nach §55 HOAI sind die abschließenden Standsicherheitsnachweise (Statik) bzw. die Tragwerksplanung im Wesentlichen erst in der Leistungsphase 4 (Genehmigungsplanung) zu erbringen.

Die Möglichkeit, diese Leistungen auch in einer früheren Planungsstufe nach HOAI vom Planer erbringen zu lassen ist nicht unüblich und wird aufgrund dessen in ähnlicher Form explizit in der HOAI aufgeführt. Unter „besondere Leistungen“ in der Leistungsphase 1 (Grundlagenermittlung) zählt das *Ermitteln besonderer, in den Normen nicht festgelegter Belastungen* sowie in der Leistungsphase 2 (Vorplanung) die *genaue Berechnung besonderer Bauteile*.

Für die vorgelegten Unterlagen zur Prüfung der Schachtverschlüsse bleibt in Bezug auf vorstehende Ausführungen festzuhalten, dass weder für die Festlegung der Belastungsbedingungen noch für die Bemessung selbst eine Normung existiert.

Diese erste, im Rahmen der Projektierungsstufe „Vorplanung“ erforderliche, rechnerische Untersuchung wurde durch die AG Morsleben angeboten, vom MLU-LSA bisher jedoch nicht beauftragt. Die mit dem vorliegenden Zwischenbericht dokumentierte Bewertung der Konzeptplanung (=Vorplanung im Sinne der HOAI) umfasst daher lediglich diejenigen Prüfungsgesichtspunkte, die ohne Kenntnis des geomechanisch-geohydraulischen Trag- und Dichtigkeitsverhaltens getroffen werden können. Hierzu gehören insbesondere Aussagen zur Vollständigkeit und zum Umfang der vorliegenden Kennwerte zum Materialverhalten, da der erforderliche Umfang erster Untersuchungen zum Materialverhalten signifikant von der Sensitivität der Bewertungsergebnisse auf das Streubreitenband der Materialkennwerte abhängig ist.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die im Rahmen der Projektierungsstufen „Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung und Ausführungsplanung“ erforderliche präzisierende rechnerische Untersuchung von den vorstehend genannten, im Rahmen der Prüfung der Konzeptplanung erforderlichen Berechnungen unabhängig ist.

2 Bewertung der konzeptionellen Vorgehensweise

2.1 Konzeptionelle Vorgehensweise des Antragstellers

Der vorliegende Prüfkomples dokumentiert sowohl eine Konzeptplanung /U1/ wie auch eine Nachweisführung /U2/ für die im Rahmen der Stilllegung auszuführenden Schachtverschlussbauwerke in den Schächten Bartensleben und Marie des ERA Morsleben. In /U1/ wird darauf hingewiesen, dass nach den Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Bundesanzeiger 1983, Nr. 2 vom 05.01.1983) *auch nach der Stilllegung die Radionuklide, die als Folge von nicht auszuschließenden Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen können, nicht zu Individualdosen führen dürfen, welche die Werte des §45 (§47 in der StrlSchV 2001) der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) überschreiten.* Als spezifische Anforderungen bzw. Zielvorgaben an die Schachtverschlussbauwerke nennt die Unterlage /U2/ daher *eine Abdichtung der Schächte gegenüber Zutritten von Lösungen aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude sowie zum anderen auch eine Abdichtung der Schächte gegenüber dem Auspressen von Lösungen aus dem Grubengebäude infolge auflaufender Konvergenz bzw. Gasbildung in die Biosphäre.* Dies gilt nach der „Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie“ /U3/ *nicht nur für den zu verfüllenden Schachtquerschnitt als potentielle Wegsamkeit, sondern auch für die den Schacht umgebende Auflockerungszone insbesondere im Bereich der Dichtelemente.* Im vorliegenden Prüfkomples werden vom AS die Zielvorgaben hinsichtlich des Betrachtungszeitraumes für die Nachweisführung mit 30.000 Jahren und für den zulässigen Fluidvolumenstrom durch die Schachtverschlussbauwerke mit kleiner 2 m³/a definiert. Eine inhaltliche Begründung für den konkreten Wert von 2 m³/a wurde nicht gegeben. Darüber hinaus soll die neben dem Schachtverschlussbauwerk angesetzte Verfüllsäule gegenüber dem anstehenden Gebirge stabilisierend wirken.

Mit dem Ziel, eine aus statischer Sicht stabile Verfüllsäule und einen aus hydraulischer Sicht rechnerisch hinreichend geringen Volumenstrom über den oben genannten Betrachtungszeitraum nachzuweisen, wird vom AS in der Unterlage /U1/ zunächst eine Analyse der Grundlagen von Schachtverschlusskonzeptionen dokumentiert. Diese Analyse umfasst die historische Entwicklung in Deutschland über die letzten 80 Jahre. Als Stand der Technik wird im Ergebnis der Analyse eine Vollverfüllung der Schachtröhren mit geschichtet aufgebauter Verfüllsäule identifiziert. Das Schachtverschlussbauwerk ist in diese Verfüllsäule integriert. Als internationales Endlagerprojekt im Salinar wird die Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) insbe-

sondere bezüglich der Verwendung unterschiedlicher Materialien im Mehrfachkomponentensystem einer geschichtet aufgebauten Vollverfüllsäule in die Betrachtung mit einbezogen.

Durch Vergleiche von unterschiedlichen Konstruktionsprinzipien und Materialien unter besonderer Beachtung der Langzeitfunktionstüchtigkeit bzw. der Langzeitbeständigkeit werden alternative Lösungsmöglichkeiten mit Blick auf die bauliche und konstruktive Gestaltung sowie die Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit aufgezeigt. Im Anschluss daran erfolgt in /U1/ eine Auseinandersetzung mit *Normen und Richtlinien für Sicherheitsbetrachtungen von Ingenieurbauwerken und Rechtsvorschriften für die Verwahrung von Schächten* mit der inhaltlichen Festlegung grundlegender Begriffe.

Als Grundlage für eine Beurteilung der aufgezeigten Konstruktionsprinzipien bzw. der eingesetzten Materialien im Hinblick auf die Anwendbarkeit für Endlager im Salzgebirge und insbesondere im ERA Morsleben werden *zunächst die bergtechnischen, geologischen, hydrologischen und geotechnischen Randbedingungen für die Schächte Marie und Bartensleben zusammenfassend dargestellt und diskutiert.*

In /U1/ wird ausgehend von den Schutzziele und Anforderungen an die Schachtverschlüsse eine Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse mit den standortspezifisch innerhalb des Betrachtungs-(Nachweiszeit-)raumes möglichen Leit- und Begleitgefahren erstellt. Die hieraus entwickelten Gefährdungsbilder/Szenarien sind zusammen mit der vom AS in /U1/ aufgezeigten Vorgehensweise bei der Erstellung des Sicherheitskonzeptes sowie den angeführten Normen und Richtlinien als Grundlage für die Erarbeitung der Konstruktionsprinzipien und -regeln für die Schachtverschlusssysteme verwendet worden.

Basierend auf den vorstehend genannten Grundlagen und den daraus abgeleiteten Konstruktionsprinzipien werden in der Prüfunterlage /U1/ unter Berücksichtigung der Spezifika des ERA Morsleben zwei verschiedene Grundkonzepte vorgestellt und diskutiert.

Grundkonzept A besteht aus einer oberen und einer unteren Widerlagersäule mit dazwischen liegendem Dichtelement DE 1, kombiniertem Widerlager-Dichtelement DE 2 und Bentonit-Dichtelement DE 3, Bild 2.1. Nach Aussagen in /U1/ verhindert das obere Dichtelement DE 1 den Zutritt von Wässern aus dem Deckgebirge in das Endlager, während die untere Bentonit-Dichtung DE 3 gegen den Austritt aufsteigender Lösungen aus dem Endlager vorgesehen ist und die mittlere Dichtung DE 2 zu den Dichtelementen DE 1 und DE 3 als redundantes und diversitäres Dichtsystem eingesetzt wird.

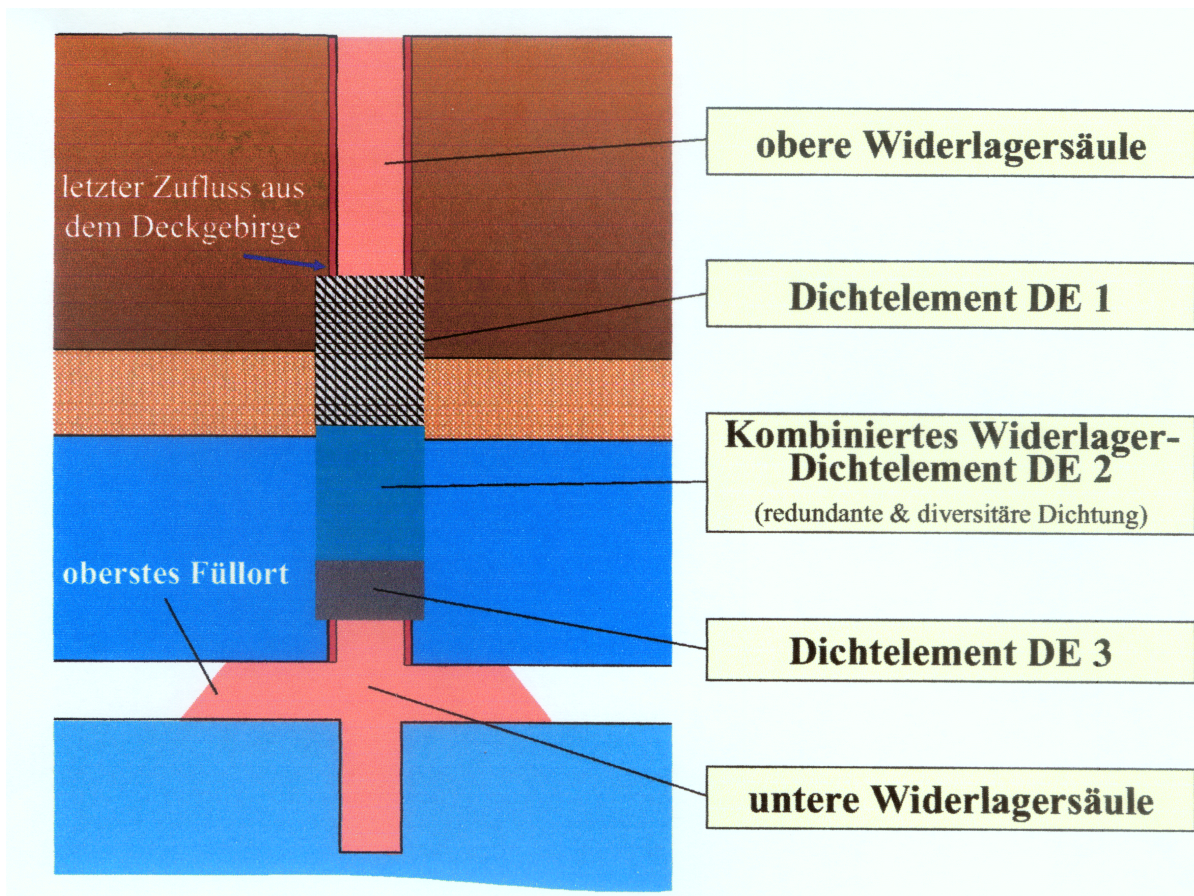


Bild 2.1: Grundkonzept A (Quelle: Prüfunterlage /UI/)

Die obere Widerlagersäule übernimmt den Lastabtrag der von unten wirkenden Kräfte aus dem Fluiddruck dann, wenn das kombinierte Widerlager- / Dichtelement DE 2 diesen Lastabtrag nicht sicherstellen kann und gewährleistet gleichzeitig eine Stützwirkung gegenüber dem umgebenden Nichtsalinar-Gebirge. Die untere Widerlagersäule trägt zur Gewährleistung der Setzungsstabilität bei und übernimmt gleichzeitig Tragfunktion bei versagendem Widerlager-Dichtelement DE 2. Dazu ist die Auslaufsicherheit in die Füllörter (Auslaufen der Schotter-säule) sicherzustellen. Aus planerisch-statischer Sicht übernimmt damit das mittlere kombinierte Widerlager-Dichtelement zusätzlich *den Lastabtrag aus den von unten angreifenden Fluiddrücken und den von oben anstehenden hydrostatischen Drücken aus der überlagernden Wassersäule*, während den Widerlagersäulen aus statistischer Sicht die redundante Funktion zugewiesen wird. Im Grundkonzept B wird zusätzlich ein weiteres kombiniertes Widerlager-Dichtelement mit der Bezeichnung DE 3 zwischen einer als asphaltdichter Kern ausgebildeten Trennschicht und der unteren Widerlagersäule in das Verschlussbauwerk integriert, das den *freien Schachtquerschnitt sowie die Kontaktzone zwischen dem Dichtelement und dem*

Gebirge gegenüber aus dem Grubengebäude aufsteigenden Lösungen abdichtet, Bild 2.2. Der asphaltdichte Kern wird dabei möglichst an das unverritzte Gebirge angeschlossen.

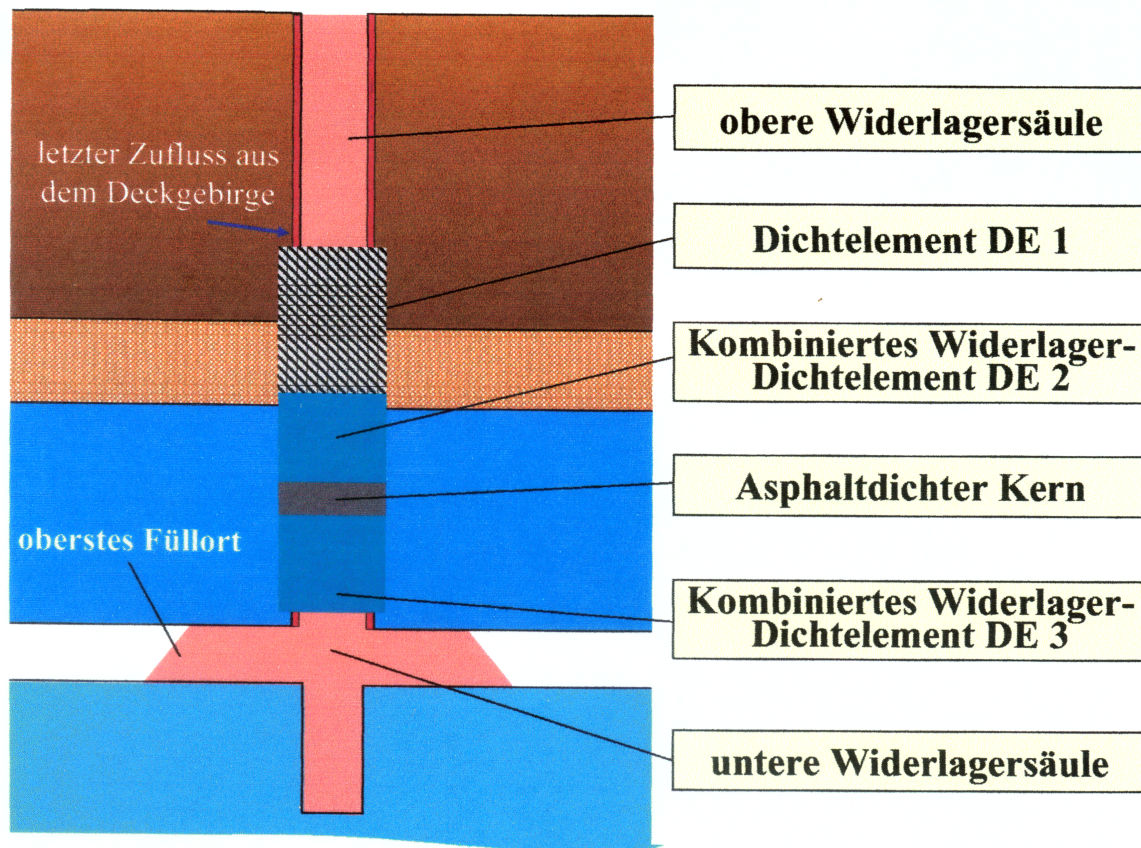


Bild 2.2: Grundkonzept B (Quelle: Prüfunterlage /U1/)

Neben dieser konzeptionellen Ausformung werden den einzelnen Komponenten des Verschlussbauwerkes verschiedene Materialien zugeordnet.

Auf Basis der beiden Grundkonzepte werden die Nachweise zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussbauwerke der Schächte Marie und Bartensleben sowie zur Langzeitstabilität der Schachtverschlussmaterialien geführt. Methodisch wird die Nachweisführung mit separaten Nachweisen für die Tragfähigkeit und für die Gebrauchstauglichkeit auf rechnerischer Grundlage geführt. Der Nachweis der Langzeitstabilität der einzusetzenden Materialien für die Verschlusskonstruktionen erfolgt im Gegensatz dazu anhand der Auswertung des in der Fachliteratur dokumentierten Kenntnisstandes unter Berücksichtigung historischer und natürlicher Analoga.

Die Bauwerksentwürfe werden in den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ unter Ansatz prinzipiell geeigneter Verschlussmaterialien und unter Einbezug der jeweiligen bergbaulichen, geologischen, hydrogeologischen und geochemischen Standortspezifika sowie der erarbeiteten

Grundkonzepte A und B abgeleitet. Für den Nachweis der Tragfähigkeit werden geomechanische Berechnungen und für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit geohydraulische und geomechanische Berechnungen durchgeführt. Dabei ist vom AS ein Grenzvolumenstrom von $< 2 \text{ m}^3/\text{a}$ als Gebrauchstauglichkeitskriterium für den Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren festgelegt worden. Die Einhaltung dieses Grenzvolumenstroms wird für jedes einzelne Dichtelement angestrebt.

Mit Bezug auf die wissenschaftlichen Erkenntnisse zur geochemischen Langzeitstabilität von Bentonit kommt der AS zu dem Ergebnis, dass das Grundkonzept A mit dem gegen aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude vorgesehenen Bentonit-Dichtelement DE 3 auszuschießen ist, da für die aus dem Einsatz von Salzbeton im Rahmen der vorgezogenen Verfüllmaßnahme resultierenden Veränderungen der Gebirgslösungen durch die Zementphasen mit ihren Auswirkungen auf das Langzeitverhalten von Bentonit bislang keine gesicherten Kenntnisse vorliegen. In Konsequenz wird für beide Schächte auf das Grundkonzept B zurückgegriffen.

Für die untere Widerlagersäule und die kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 ist gemäß den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ Hartgesteinschotter vorgesehen, um die geforderte Setzungsstabilität zu erreichen und das anstehende Gebirge zu stabilisieren.

Die auf dem Grundkonzept B aufbauenden Schachtverschlusskonstruktionen bestehen nunmehr aus folgenden Einzelkomponenten und Materialien, Bild 2.3:

- Obere Widerlagersäule aus setzungsarmem Mineralgemisch,
- Filterschicht I aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden,
- Dichtelement DE I aus Bentonit (Calcigel),
- Filterschicht II aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden,
- kombiniertes Widerlager- / Dichtelement DE 2 aus Schotter mit einer Porenraumfüllung mit Asphalt/Bitumen,
- Filterschicht III aus Feinsanden und einer Porenraumfüllung mit CaCl_2 -Lauge,
- Tonschicht als redundantes und diversitäres Element für die Filterschichten III und IV,
- Gussasphaltplatten,
- Filterschicht IV aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden,
- kombiniertes Widerlager-Dichtelement DE 3 mit Aufbau, analog zu dem kombinierten Widerlager-Dichtelement DE 2,
- Filterschicht V aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden,

- Untere Widerlagersäule im oberen Bereich aus setzungsarmem Schotter mit einer Poren-Solezementsteinfüllung,
- Untere Widerlagersäule im unteren Bereich bis zur Endteufe aus setzungsarmem Schotter.

Schachtverschlusslement	Schacht Marie				Schacht Bartensleben				Material
	Einbauteufe		Einbau- länge m	Einbau- länge m	Einbauteufe		Einbau- länge m		
	von m unter GOK	bis m unter GOK			von m unter GOK	bis m unter GOK			
obere Widerlagersäule	0,00	173,00	173,00	173,00	0,00	196,50	196,50	Mineralgemisch	
Filterschicht I	173,00	176,00	3,00	3,00	196,50	199,50	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande	
Dichtelement DE 1	176,00	253,53	77,53	77,53	199,50	258,74	59,24	Bentonit (Calcigel)	
Filterschicht II	253,53	256,53	3,00	3,00	258,74	261,74	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande	
Widerlager-Dichtelement DE 2	256,53	303,53	47,00	47,00	261,74	308,74	47,00	Schotter, Asphalt	
Filterschicht III	303,53	307,53	4,00	4,00	308,74	312,74	4,00	Feinsand und Porenraumfüllung mit CaCl ₂ -Lauge	
Asphalt-undurchlässiger Kern	307,53	312,03	4,50	4,50	312,74	317,23	4,50	erdfeuchter Ton	
Gussasphalt	312,03	312,53	0,50	0,50	317,23	317,74	0,50	Gussasphaltplatten	
Filterschicht IV	312,53	318,53	6,00	6,00	317,74	323,74	6,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande	
Widerlager- Dichtelement DE 3	318,53	343,53	25,00	25,00	323,74	366,24	42,50	Schotter, Asphalt	
Filterschicht V	343,53	346,53	3,00	3,00	366,24	369,24	3,00	Feinsand, abgestufte Kiese und Sande	
Schotter mit Porenraumfüllung durch Zementstein	346,53	352,56	6,03	6,03	369,24	386,75	17,51	Schotter, Solezementstein	
untere Widerlagersäule	352,56	522,00	169,44	169,44	386,75	526,00	139,25	Schotter	

Bild 2.3: Schachtverschlusskonstruktion der Schächte Marie und Bartensleben (Quelle: Prüfunterlage /U2/)

Die nach der Festlegung der Verschlusskonstruktion folgenden geomechanischen Berechnungen werden mit einem Berechnungsmodell durchgeführt, das an den Verhältnissen des Schachtes Marie orientiert ist. Nach Aussage des AS können aufgrund der vergleichbaren

p_{Fo} : Fluiddruck von oben
 p_{Fu} : Fluiddruck von unten
 $\sigma_{rPi}, \sigma_{tPi}, \sigma_{vPi}, i=1,2,3$: Primäre Hauptnormalspannungen

Arbeitsgruppe Morsleben

In /U1/ führt der AS aus, dass *eine detaillierte Betrachtung der hinsichtlich des mechanischen Verhaltens wesentlichen Bereiche der Verfüllsäule, d.h. der kombinierten Widerlager- / Dichtelemente und der Füllortbereiche mittels entsprechender Teilmodelle im zweiten Teil der Untersuchungen geschieht.*

Das den Schacht umgebende und geotektonisch komplex aufgebaute Gebirge wird mit 3 Homogenbereichen abstrahiert. Für den Homogenbereich 1 (Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel-Bereich) und für den Homogenbereich Hutgestein wird vereinfachend ein elastisches Materialverhalten entsprechend dem *Hooke'schen* Stoffmodell angesetzt. Die Bewertung der rechnerisch ermittelten Spannungen erfolgt auf Grundlage des Mohr-Coulomb-Bruchkriteriums. Nach /U1/ und /U2/ erfolgt die *Modellierung des rheologischen Verhaltens des Salinars mittels des viskoplastischen Modells auf der Basis des Norton-Ansatzes (nach BGR).* Zur Bewertung der Integrität des Salinargebirges wird das Dilatanzkriterium nach Schulze, O., Popp, T. (2002) und Cristescu, N., Hunsche, U. (1998) verwendet. Weiter beruht nach /U1/ und /U2/ die mechanische Modellierung der Verfüllsäule ebenfalls auf der vereinfachenden Annahme eines elasto-plastischen Materialverhaltens mit Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb. Die mechanischen Eigenschaften der Kontaktzone werden durch eine Haft- bzw. Gleitreibung charakterisiert. Den Quelldruck im Dichtelement DE 1 bei vollständiger Durchfeuchtung berücksichtigt der AS durch Superposition eines isotropen Spannungsfeldes im Bereich des Dichtelementes DE 1. Nach /U1/ erfolgt hierbei konservativ die Betrachtung der im Nachweiszeitraum auftretenden extremen Belastungssituationen. Diese ergeben sich aus der mechanischen Druckbelastung der Dichtelemente und der Schachtkontur von oben resultierend aus der Flüssigkeitssäule von der Oberkante der Dichtelemente bis zur Geländeoberkante, dem Eigengewicht bei Berücksichtigung des Siloeffektes und dem Quelldruck im Dichtelement DE 1 sowie einer Druckbelastung von unten aus dem Gas-/Fluiddruck im Grubengebäude. Eine weitere Belastung der Schachtverschlusselemente resultiert aus dem Gebirgsdruck. Im Hinblick auf die Bewertung der Berechnungsergebnisse erfolgen die Auswertung und Dokumentation charakteristischer Zustandsgrößen, eine visuelle Darstellung in Form von colorierten Isoflächen mit einer direkten Beurteilung der Spannungs- und Verschiebungszustände sowie eine Auswertung der Beanspruchungszustände von Gebirge, Verfüllmaterial und Kontaktfuge mit Hilfe von Bewertungskennwerten.

In /U2/ wird vom AS festgestellt, dass das entworfene Schachtverschlussbauwerk aus geomechanischer Sicht ein sehr hohes Sicherheitsniveau besitzt.

Die geohydraulischen Untersuchungen zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden im Unterschied zu den geomechanischen Nachweisen sowohl für den Schacht Marie als auch für den Schacht Bartensleben durchgeführt.

Im Zuge der geomechanischen Nachweisführung wird zunächst das Deckgebirgsdichtungselement dimensioniert und die Auswahl eines geeigneten Bentonitmaterials sowie dessen hydraulische Kennwerte beschrieben. Danach erfolgt die Auslegung der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 auf Schotter-Asphalt-Basis.

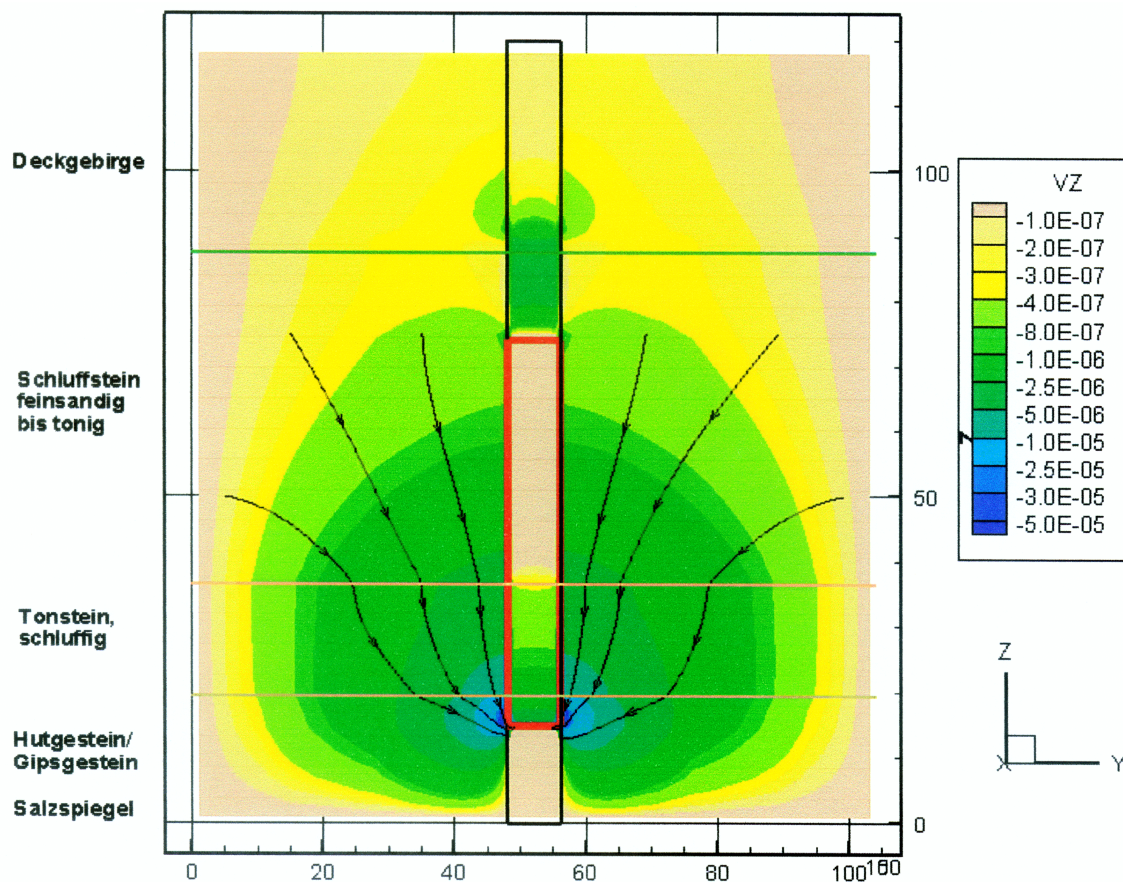


Bild 2.5: Vertikalschnitt, Darcy-Geschwindigkeit in z -Richtung (m/d) und Stromliniennetz, Schacht Bartensleben
(Quelle: Prüfunterlage /U1/)

Vom Antragsteller wird in /U1/ auf Seite 136 dabei postuliert: *Ein Volumenstrom über die Kontaktfuge zwischen Dichtung und Gebirge ist nicht zu besorgen, da sowohl für den Bentonit auf Grund des Quelldrucks als auch für den Bitumen/Asphalt auf Grund der Adhäsionskräfte und der Fluideigenschaften (Druckaufbau) kein Aufklaffen der Kontaktfuge möglich ist.* Weiterhin wird in /U1/ auf Seite 138 formuliert: *Eine weitere Auflockerung nach gebirgsschonender Beraubung wurde nicht unterstellt.*

Demzufolge wurden in /U1/ bei der geohydraulischen rotationssymmetrischen Modellierung nur zwei Zonen betrachtet, das Dichtelement und das umgebenden Gebirge, das zwar geschichtet, aber in jeder Schicht als homogen angenommen wird. Eine Kontaktzone mit veränderten geohydraulischen Eigenschaften (Auflockerungszone) wird nicht betrachtet.

Die Bemessung der Dichtelemente DE 1 wird bei beiden Schächten ohne Kreditnahme weiterer Schachtverschlusskomponenten durchgeführt, d.h. *das jeweilige Dichtelement im Deckgebirge wird in /U1/ als Einzelement ohne nachgeschaltete Dichtelemente* („offener Schacht“) *betrachtet*, Bild 2.5. Die Gesamtheit der Abdichtungselemente berücksichtigt der AS erst in der zusammenfassenden Betrachtung des erreichten Sicherheitsniveaus.

Im Ergebnis der numerischen Berechnungen zur Ermittlung der hydraulischen Effektivität des Dichtelementes führt der AS in /U2/ aus, dass für die gewählten Randbedingungen des offenen Schachtabchnittes unterhalb des Deckgebirgsdichtelementes DE 1 bei Vernachlässigung der nachgeschalteten Dichtelemente und bei den vorgegebenen hydraulischen Leitfähigkeiten im Deckgebirge die Volumenströme bei beiden Schächten den Grenzwert von 2 m³/a überschreiten. Der AS schätzt die Konstruktion des Schachtverschlusses in diesem Teilbereich DE 1 dennoch als hydraulisch ausreichend sicher ein.

Die Abdichtungswirkung der Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 beruht auf dem Asphalt-Schotter-Gemisch, wobei die Asphaltdichte auf die zutretenden Lösungen eingestellt wird.

Für das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 2 wird in /U1/ und /U2/ die Dichte des Asphalts größer gewählt als die Dichte der zufließenden Deckgebirgswässer, um einem Aufschwimmen des Asphalts vorzubeugen.

Dagegen wird im Fall des kombinierten Widerlager-Dichtelementes DE 3 unterhalb der Hauptdichtung der Asphalt mit einer geringeren Dichte ausgeführt als sie die zu erwartenden aufsteigenden Lösungen aus dem Grubengebäude aufweisen werden, so dass der Asphalt im Fall des Lösungszutrittes auf der salinaren Lösung aufschwimmen kann.

Der AS schätzt das vorhandene Sicherheitsniveau hinsichtlich der Dimensionierung der Abdichtungselemente aus Asphalt als sehr hoch ein, da bei bisherigen Asphaltanwendungen keine Schäden bekannt wurden und die durchgeführten Berechnungen zum Eindringverhalten der Bitumen/Asphalte in permeable Gebirgsbereiche praktisch keinerlei Verluste nachgewiesen haben.

Nach Aussage des AS haben die Füllörter bei den vorgesehenen Füllortverfüllungen hinsichtlich der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des gesamten Verschlussbauwerkes eine nur

sehr geringe Bedeutung. Die Modellrechnungen in /U1/ und /U2/ mit dem Dilatanzkriterium ergaben, dass im Schachtbereich nach dem Berauben der Auflockerungszone keine neue Auflockerungszone entstehen wird.

2.2 Bewertungskriterien

Da ein Stand von Wissenschaft und Technik für die konzeptionelle Vorgehensweise zur Erarbeitung der hier relevanten Konstruktionen nicht in einem Regelwerk festgelegt ist, müssen einzelfallspezifische Kriterien definiert werden. Als zentrale Kriterien für die Bewertung der konzeptionellen Vorgehensweise der Konzeptplanung des AS werden die folgenden Fragestellungen angesehen:

- Sind die Prüfunterlagen in Übereinstimmung mit der in /L6/ bis /L18/ dokumentierten methodischen Vorgehensweise bei der Nachweisführung?
- Sind die Ausführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit nachvollziehbar dokumentiert?
- Sind die ingenieurtechnischen Nachweisführungen plausibel und in Übereinstimmung mit den Regelwerken, die hilfsweise herangezogen werden können?
- Liegt eine Konstruktion vor, deren anforderungsbezogene Qualität sich im Laufe der Zeit tendenziell verbessert bei gleichzeitig abnehmendem Gefährdungspotential, so dass die Sicherheit gegen mechanisches oder hydraulisches Versagen eher zu- als abnimmt (-> keine Überwachung, keine Reparatur zum Qualitätserhalt)?
- Sind die angesichts der bestehenden raum-zeitlichen Imponderabilien und des methodischen Ansatzes der Nachweisführung sicherheitlich bedeutsamen Aspekte der Redundanz und der Diversität in der Konzeption und Nachweisführung hinreichend berücksichtigt?

Des Weiteren wird mit der Bewertung der konzeptionellen Vorgehensweise des AS beurteilt, inwieweit diese den grundsätzlichen Anforderungen an Nachweisführungen in Anlehnung an die Grundleistungen der Leistungsphase 2 (§55, HOAI) entsprechen, vgl. Abschnitt 19.3 des Prüfberichtes. Über die vorstehend genannten Anforderungen an die konzeptionelle Vorgehensweise hinaus ist zu fordern, dass die jeweiligen Sachverhalte in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dargestellt sind.

2.3 Bewertung

Bis auf nachstehende noch als konzeptionelle Mängel näher ausgeführte Sachverhalte entspricht die vorgelegte Konzeptplanung in ihren Grundzügen der skizzierten bzw. in den Empfehlungen /L6/, /L8/, /L9/, /L13/ und /L14/ vorgeschlagenen methodischen Vorgehensweise für den Nachweis der geotechnischen Langzeitsicherheit (Standssicherheit und der Dichtigkeit) der Schachtverschlussbauwerke. Diese Aussage gilt allerdings nur für die konzeptionelle Vorgehensweise, ausdrücklich nicht jedoch für die inhaltliche zahlenmäßige Ausgestaltung der vorgelegten Sicherheitsnachweise, deren Prüfung erst in einem nachfolgenden zweiten Schritt erfolgen müsste. Als Beleg für die Einschätzung der konzeptionellen Vorgehensweise wird nachstehend eine für die grundsätzliche Gestaltung der sicherheitlichen Nachweisführung relevante Ausführung aus /L6/ zitiert:

- /L6/:
- „Außer dem Standssicherheitsnachweis für die Betriebsphase ist eine Beurteilung der Langzeitsicherheit erforderlich, um zu belegen, dass die Errichtung, der Betrieb und die Nachbetriebsphase einer Untertagedeponie zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre führen. Dazu sind Barrieren der Untertagedeponie, das Verhalten des Salzgesteins, des Nebengesteins und des Deckgebirges sowie Ereignisabläufe im Gesamtsystem durch geeignete Modelle auf der Basis konkreter Standortdaten oder ausreichend sicherer Annahmen nachzubilden und zu bewerten.“*
- „Es sind ganzheitliche Betrachtungen erforderlich, in die Darlegungen und Untersuchungen mindestens der folgenden Teilaspekte integriert werden müssen:*
- geologische und geotechnische Erschließung und Beurteilung der Gebirgsverhältnisse und der Gebirgseigenschaften*
 - Erfahrung vor Ort und ergänzend auch mit ähnlichen Bergwerken*
 - In-situ-Beobachtungen sowie im Labor gemessene Daten*
 - Rechnerische Untersuchung an Strukturmodellen von repräsentativen Teilen des Bergwerks zur Ermittlung von Zustandsgrößen,*
 - Interpretation von Mess-, Beobachtungs- und Berechnungsergebnissen“.*

Vorstehend zitierte Grundsätze sind nach Einschätzung der Prüfer durch den AS grundsätzlich berücksichtigt worden.

Als einen Mangel in der konzeptionellen Vorgehensweise erachten die Prüfer die Tatsache, dass bei der Untersuchung und Bewertung alternativer Lösungsmöglichkeiten mit dem Grundmodell A keine wirklich geeignete Alternative zum Grundkonzept B generiert wurde.

Das Grundkonzept A hätte nach Erarbeitung der Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse aufgrund der Gefährdung der Wirksamkeit des hydraulischen Langzeitbentonit-Dichteelementes durch mögliche Zementphasen in den aufsteigenden Lösungen bereits im Vorfeld verworfen werden können. Stattdessen wäre eine echte Alternative mit dem Grundkonzept A zum Grundkonzept B zu entwickeln gewesen. Somit konnten durch die inhaltliche Ausgestaltung des Grundkonzeptes A mit dem Bentonit-Dichteelement die möglichen Vorteile, die eine geeignete Alternative für die weitere Lösungsoptimierung darstellt, nicht genutzt werden. Damit bleibt als signifikantes Manko, dass die konzeptionelle Vorgehensweise in einem zu frühen Entwicklungsstadium ohne Optimierungsprozess abgebrochen worden ist.

Empfehlung E1:

Um der konzeptionell vorgesehenen Lösungsoptimierung gerecht zu werden, sind zwei geeignete Grundmodelle zu entwickeln, die Eingang in den Optimierungsprozess finden.

Eine Möglichkeit, das unter E1 aufgeführte Defizit zu bearbeiten ist z.B. die Integration eines langfristig wirksam werdenden Dichteelementes „verdichteter Salzgrus“ in die Schachtverschlussysteme. Zu prüfen ist nach Einschätzung der Prüfer, ob nicht ein langfristig wirksam werdendes Dichteelement „verdichteter Salzgrus“ im Bereich des anstehenden Salzgesteins und damit ein dem geogenen Milieu entsprechendes Langzeitabdichtungselement in die Schachtverschlussysteme integriert werden kann und muss, da bei ausschließlicher Verwendung artfremder Materialien im Bereich des Steinsalzgebirges eine geogene und damit geochemisch mit Sicherheit langfristig über geologische Zeiträume beständige Barriere eher nicht erreicht wird. Demgegenüber eröffnet die Teilverfüllung der Schächte mit verdichtetem Salzgrus in Verbindung mit der auflaufenden Konvergenz grundsätzlich die Möglichkeit, die bestehende Perforation der geologischen Barriere langfristig weitgehend adäquat zu reparieren.

Forderung F1:

Es ist zu prüfen, ob ein langfristig wirksam werdendes Dichteelement „verdichteter Salzgrus“ im Bereich des anstehenden Salzgesteins in die Schachtverschlussysteme integriert werden kann und muss.

Trotz ihrer herausragenden Bedeutung bleiben die Annahmen für den konzipierten Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren sowie ein durch die Schachtverschlüsse durchtretender Fluidvolumenstrom von kleiner $2 \text{ m}^3/\text{a}$ als Zielvorgabe für die Bauwerksentwürfe der Schächte des ERA Morsleben inhaltlich unbegründet.

Forderung F2:

Die Höhe des Bemessungsgrenzwertes von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ für Fluidströme im Bereich der Schachtverschlüsse sowie der angesetzte Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren sollte mit Bezug auf das Langzeitsicherheitskonzept begründet werden.

Die Darlegung der Funktion für die Anordnung der Tonschicht zwischen den beiden Widerlager-Dichtelementen ist unzureichend.

Forderung F3:

Die Funktion der Tonschicht zwischen beiden Widerlager-Dichtelementen ist zu erläutern.

3 Bewertung der Aussagen zur geologischen und hydrogeologischen Situation an den Schächten Marie und Bartensleben

3.1 Aussagen des Antragstellers

Während /U2/ im wesentlichen die Eignung der verschiedenen möglichen Baumaterialien hinsichtlich ihrer Langzeitstabilität sowie die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussbauwerke behandelt, befasst sich /U1/ mit der konzeptionellen Planung der Schachtverschlüsse Bartensleben und Marie und enthält daher konkrete Angaben zur geologischen, hydrogeologischen und bergbaulichen Situation mit dem Ziel, „... die aus dem Vergleich identifizierten Konstruktionsprinzipien bzw. die eingesetzten Materialien in ihrer Anwendbarkeit für Endlager im Salzgebirge und ganz besonders am Standort des ERA Morsleben beurteilen zu können.“

Nach einem kurzen geschichtlichen Abriss und einer knappen Lagebeschreibung werden die Angaben zur Geologie mit Hinweis auf /U5/ und /U6/ und die Planungsstudie /U4/ als Beschreibung der Schachtprofile Bartensleben und Marie zitiert. Die Angaben zur Hydrogeologie entstammen den gleichen Quellen. Auf die Wiedergabe der Detailangaben zur Geologie und zur Hydrogeologie wird hier mit Hinweis auf die genannten Unterlagen verzichtet.

3.2 Bewertungskriterien

Die Angaben werden anhand der Unterlagen geprüft, die der AG Morsleben zur Verfügung stehen, insbesondere anhand der Unterlagen /U5/ und /U6/ sowie im Einzelfall anhand der Primärunterlagen zum Lagerstättenmodell (BEHLAU, J.; MINGERZAHN, G.; BORNE-MANN, O. /39/), zur Hydrogeologie (LANGKUTSCH, U. u. a. /40/) sowie ggf. zu weiteren Sachverhalten.

Die Unterlagen /U5/ und /U6/ wurden von der AG Morsleben bereits ohne Beanstandungen geprüft und können somit als zuverlässige Quelle in die Prüfung der Schachtverschlussysteme einbezogen werden. Für die Unterlagen BEHLAU u. a. /39/ und LANGKUTSCH u. a. /40/ liegen ebenfalls detaillierte Prüfberichte der AG Morsleben vor, so dass eine fundierte Prüfung der Datengrundlagen für die Schachtverschlussysteme möglich ist.

Die Prüfung hat insbesondere im Hinblick auf Richtigkeit und Vollständigkeit der für die Planung der Schachtverschlussysteme benötigten Daten sowie die Plausibilität von Ableitungen und Extrapolationen zu erfolgen.

3.3 Bewertung

Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass der Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren, für den das Gebrauchstauglichkeitskriterium von 2 m³/a gelten soll, nicht begründet wird, siehe auch Prüfbericht Abschnitt 2.3. Ein Zusammenhang mit wichtigen Vorläuferunterlagen wird nicht hergestellt. Die Langzeitsicherheitsberechnungen mit den Programmsystemen EMOS (STORCK u. a. 2004) und PROSA (KLEMENZ u. a. 2002) erfassen einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren. Brenk Systemplanung (2006a) empfiehlt ebenfalls einen Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren für die Betrachtung des Radionuklidaustrages und geologischer Entwicklungen. Nun ist es problematisch, die Funktionstüchtigkeit technischer Systeme für die Zeiträume geologischer und geotechnischer Prozesse zu bemessen. Dennoch muss die Lebensdauer der Verschlussbauwerke in einem plausiblen Zusammenhang mit geologischen und geotechnischen Abläufen stehen.

An dieser Stelle soll die Szenarienanalyse (Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen, KÄBEL u. a. 1999) angeführt werden. In dieser Prüfunterlage werden folgende zeitliche Zustände definiert:

Zustand A: *Ausgangszustand (nach der Betriebsphase, ohne Verfüllung).*

Gegenwart + einige Jahrzehnte

Zustand B: *Wasserwegsamkeit sowohl im Hutgestein als auch im Salinar und im salinaren Anhydrit, Zuflüsse lösungsfähiger Flüssigkeiten in das Endlager, Wirkung der Konvergenz*

einige 1000 Jahre nach Zustand A

Zustand C: *ausgeprägte Permafrostbedingungen, Wasserwegsamkeit in den Barrieregesteinen ist eingetreten, die hydraulische Verbindung zu den nicht limitierten Deckgebirgswässern ist grundsätzlich hergestellt.*

nach ca. 25.000 Jahren

Zustand D: *Intensives Glazial mit Exaration*

nach ca. 100.000 Jahren (bis etwa 150.000 Jahren)

Diese zeitliche Differenzierung wurde von der AG Morsleben als sinnvoll angesehen (siehe Prüfbericht zur Szenarienanalyse, AG Morsleben 2001).

Die Konsequenz dieser Einteilung besteht (für das unverfüllte Endlager) allerdings darin, dass in Phase B der Zutritt von ungesättigten Lösungen in das Endlager grundsätzlich und wenig behindert möglich ist, die Phasen C und D demgegenüber jedoch keine neuen Gefährdungen für das Endlager bringen. Somit könnte ein Betrachtungszeitraum von 30.000 Jahren aus geologischer Sicht vertretbar sein, eine eindeutige Begründung seitens des AS im Zusammenhang mit der Planung von Schachtverschlussbauwerken ist jedoch unverzichtbar, siehe Forderung F2 in Abschnitt 2.3.

Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse werden für beide Schächte anhand /U5/ und /U6/ dargestellt. Die Prüfer gehen davon aus, dass in den Unterlagen /U5/ und /U6/ der aktualisierte Kenntnisstand sowohl zu Bezeichnungen der Aufschlüsse als auch zu Koordinaten, geodätischen Höhen und Schachtprofilen dokumentiert wird. Hieraus resultiert, dass auch die Angaben in älteren Prüfunterlagen (z. B. Lagerstättenmodell P 44) zu überarbeiten sind, zumal es sich nach Ansicht der Prüfer um eine notwendige Klärung von Unsicherheiten der bisherigen Datenlage handelt. Hieraus ergibt sich auch die Notwendigkeit, geologische Konstruktionen in Schachtnähe anhand der Bohrerergebnisse zu vereinheitlichen und somit bisherige Antragsunterlagen zu aktualisieren.

Empfehlung E2:

Die in den Schachtverschlusskonzepten verwendeten Angaben zur Bezeichnung, Lage, Höhe und Schichtenfolge der Schächte Bartensleben und Marie sowie daraus abgeleitete geologische Konstruktionen sollten auf der Grundlage von /U5/ und /U6/ für bisher vorliegende Prüfunterlagen mit dem Ziel der Datenkohärenz aktualisiert werden.

An dieser Stelle ist auf einen internen Widerspruch in der Unterlage /U6/ hinzuweisen, der im Zusammenhang mit der Prüfung der Schachtverschlusskonzepte deutlich wurde. Während im Text auf Seite 38 ausgeführt wird: „Das Kaliflöz Staßfurt (z2 SF) stellt sich meist als Carnallitgestein (seltener als Hartsalz) dar.“, findet sich in Anlage 6 zu /U6/ (Schachtprofil Marie, bearbeitet von BURCHARDT 1998) kein Hinweis auf die carnallitische Ausbildung des Kaliflözes („Hartsalz, sylvinitisch, ...“). Die den Prüfern vorliegenden Schichtenverzeichnisse der schachtnahen Bohrungen beschreiben das dort angetroffene Salzgestein als z. T. kieseritisches Steinsalz, wobei nach diesen Angaben nur die Bohrung Dp Mors 97 A1 das Hangendsalz der Staßfurt-Folge erreicht hat und damit das Kaliflöz durchteuft haben müsste.

Da die lithologische Ausbildung des Kaliflözes von entscheidender Bedeutung für die Konstruktion der Verschlussbauwerke ist (siehe Forderung F30), sollte dieser Widerspruch aufgeklärt werden.

Forderung F4:

Es ist dringend zu klären, ob bzw. wo das Kaliflöz Staßfurt in carnallitischer Ausbildung oder als sylvinitisches Hartsalz vorliegt (siehe auch F30).

Von besonderer Bedeutung für die Planung der Verschlussbauwerke sind die lithologischen Verhältnisse im jeweils schachtnahen Bereich. Für den Schacht Bartensleben wurden in /U5/ einschließlich des Salinars 12 Homogenbereiche ausgehalten, die mit den entsprechenden Parametern belegt wurden. Der Schichtaufbau im Umfeld des Schachtes Marie ist einfacher, so dass hier entsprechend /U6/ insgesamt 4 Homogenbereiche die Situation charakterisieren. Die Zuverlässigkeit der aus Altuntersuchungen und über Extrapolation vorhandenen Daten wurde in den Jahren 1997/98 durch die gezielte Erkundung der schachtnahen Bereiche mittels insgesamt 6 Bohrungen deutlich verbessert. Eine detaillierte Kernaufnahme, verbunden mit einer akribischen Kluftstatistik, Testarbeiten im offenen Bohrloch, Bohrlochmessungen und Gesteinsuntersuchungen ergaben schließlich einen Untersuchungsstand, der in Verbindung mit den vorhandenen Daten zuverlässige Aussagen für den jeweiligen Schachtstandort ermöglichte. So kann für die Planung der Verschlussbauwerke die Position der Dichtelemente anhand der ortsdiskreten Gesteinsausbildung, der Porosität und der Durchlässigkeit der jeweiligen Schachtabsnitte festgelegt werden.

Im Zusammenhang mit der Planung von Schachtverschlussystemen ist erneut die Frage zu diskutieren, ob die in /U5/ und /U6/ ausgehaltenen Homogenbereiche die schachtnahe Zone in Bezug auf die Gesteinsausbildung ausreichend genau repräsentieren. Die Bezeichnung „Homogenbereich“ muss hier so verstanden werden, dass die im Schacht und in den Bohrungen des schachtnahen Bereiches angetroffenen geologischen Verhältnisse nicht nur den unmittelbaren Schacht- bzw. Bohraufschluss charakterisieren, sondern darüber hinaus für einen größeren Raum gültig sind. Nun ist weder der „schachtnahe Bereich“ noch der „größere Raum“ durch eine Zahlenangabe definiert, die einen Radius um den Aufschlusspunkt, eine Mächtigkeit, eine Bandbreite für geologische, hydrogeologische, geomechanische Parameter fixiert, noch unterliegt der Begriff des „Homogenbereiches an sich“ einer vorgegebenen Ver-

wendung. Aus der Logik für die Planung der Verschlussysteme und somit für die Platzierung der technischen Bauwerke folgt jedoch, dass die Homogenbereiche eine solche Ausdehnung haben müssen, dass die Funktionstüchtigkeit der Verschlussbauwerke nicht durch Veränderungen der geologischen, hydrogeologischen, geomechanischen Verhältnisse im Umfeld der Bauwerke beeinträchtigt wird. Zum Beispiel könnten durch lithologische oder/und tektonische Gegebenheiten im Umfeld der Schachtröhre Fließwege existieren oder infolge geringer Änderungen der Druckverhältnisse bzw. der Permeabilität nach dem Einbau der Dichtelemente aktiviert werden oder neu entstehen und damit die Funktion der Bauwerke in Frage stellen.

Die Homogenbereichsdiskussion nahm bereits erheblichen Raum bei der Prüfung des Lagerstättenmodells ein (BEHLAU, J. u. a. /39/). Die Autoren dieser Prüfunterlage befassten sich mit der Zuverlässigkeit geologischer Abstraktionen und hielten 50 m um Strecken und Kammern sowie 25 m um Bohrungen für sicher im Sinne homogener Bereiche. Die Prüfer führten dazu u. a. aus: „...Die Zuverlässigkeit des Modellinhalts ist aus objektiven, in der Methodik der geologischen Modellierung liegenden Gründen innerhalb des modellierten Raumes nicht homogen. Grundsätzlich kann nur im Bereich der dokumentierten Aufschlüsse eine weitgehend mit der Realität identische Wiedergabe der geologischen Situation erwartet werden. Mit wachsender Entfernung von diesen nehmen der auf Erfahrung beruhende interpretative und der geologisch-konstruktive Anteil an der Darstellung zu, was einer abnehmenden Zuverlässigkeit des Modellinhalts entspricht...“(AG Morsleben /41/: Prüfbericht zum geologischen Lagerstättenmodell des ERA Morsleben). Dieser Feststellung wird auch im Zusammenhang mit der Prüfung der vorliegenden Unterlagen gefolgt.

Die in /U5/ und /U6/ dargestellten und ohne Beanstandungen geprüften Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Raum in einem Radius von 25 – 50 m um die Schachtröhre als homogen im Sinne der Aufgabenstellung (Erkundung schachtnaher Bereiche) anzusehen ist. Diese Feststellung bezieht sich auf die allgemeine Bewertung der in /U5/ und /U6/ ausgehaltenen lithologisch-stratigraphisch begründeten Homogenbereiche. Bei der Planung von Schachtverschlüssen müssen jedoch noch zusätzliche Kriterien herangezogen werden, die in Verbindung mit der technischen Funktionstüchtigkeit der Bauwerke zu sehen sind. Nach Ansicht der Prüfer können die ohne Bezug auf technische Planungen in /U5/ und /U6/ ausgehaltenen Homogenbereiche nicht ohne Modifizierung für die Schachtverschlussplanung übernommen werden. Die Planung der Verschlussbauwerke erfordert u. E. die Aushaltung geotechnisch orientierter Homogenbereiche, für die z. B. Klüftigkeit und Wasserwegsamkeit bzw. Zuflussintensität bestimmend sein müssen. Somit repräsentieren die geologischen und hydrogeologischen

Angaben in /U1/ und /U2/ zwar den aktuellen Kenntnisstand und liefern eine zuverlässige Grundlage für die weitere technische Planung der Verschlussysteme, die konkrete aufgabenbezogene Umsetzung der Daten in die technische Verschlussplanung mit technisch orientierten Homogenbereichen wird jedoch vermisst.

Für die Verschlussplanung werden in /U1/ und /U2/ z. B. Kluftparameter für die geologisch orientierten Homogenbereiche statistisch ausgewertet, nach Ansicht der Prüfer müssten jedoch anhand der Klüftigkeit technisch orientierte Homogenbereiche ermittelt werden, die dann Einfluss auf die Platzierung, Bemessung und Materialauswahl der Bauwerke haben. Gleiches gilt für die Einbeziehung der Durchlässigkeiten und Zuflüsse in die technische Planung. Hier wird eine kritische Überarbeitung aller Durchlässigkeits- und Zuflussmessungen empfohlen, um eine bessere Grundlage für die Schachtverschlussplanung zu gewinnen. Auf die geotechnische Konsequenz von Zuflüssen in Höhe des Bentonit-Dichtungselementes in Schacht Bartensleben wird in F10 hingewiesen.

Hinweis H1:

In /U1/ wird auf Seite 55 dargelegt, dass der stärkste und zugleich letzte Deckgebirgszufluss bei 178 m auftritt. Diese Aussage ist falsch (siehe auch Abb. 3.2.1-3 in /U5/).

Forderung F5:

Die lithologisch-stratigraphisch orientierte Homogenbereichseinteilung in /U5/ und /U6/ muss den geotechnisch dominierten Anforderungen der Schachtverschlussplanung angepasst werden und bedarf daher der Überarbeitung insbesondere unter Berücksichtigung der Kluft- und Zuflussverteilung.

Auf die teils unklaren oder widersprüchlichen Angaben bei der Darstellung der Schachtrandbedingungen und der Schachtgeometrien wird in Abschnitt 16 detailliert hingewiesen. Hier wird lediglich darauf aufmerksam gemacht, dass die stratigraphischen Bezeichnungen in Anlage 7 (Bauwerksentwurf Schacht Marie) nicht korrekt sind. Hier ist in Übereinstimmung mit /U6/ eine Richtigstellung erforderlich.

Hinweis H2:

Die stratigraphischen Bezeichnungen in der Konzeptplanung /U1/, Anl. 7 sind zu korrigieren.

4 Bewertung der geohydraulischen Modellierung der schachtnahen Volumenströme beim Dichtelement DE 1

4.1 Aussagen des Antragstellers

Die geohydraulischen Untersuchungen zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis werden im Unterschied zu den geomechanischen Nachweisen sowohl für den Schacht Marie als auch für den Schacht Bartensleben durchgeführt. Im Zuge der geomechanischen Nachweisführung wird zunächst das Deckgebirgsdichtungselement dimensioniert und die Auswahl eines geeigneten Bentonitmaterials sowie dessen hydraulische Kennwerte beschrieben.

Danach erfolgt die Auslegung der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 auf Schotter-Asphalt-Basis. Die Bemessung der Dichtelemente DE 1 wird bei beiden Schächten ohne Kreditnahme weiterer Schachtverschlusskomponenten durchgeführt, d.h. *das jeweilige Dichtelement im Deckgebirge wird in /U1/ als Einzelelement ohne nachgeschaltete Dichtelemente („offener Schacht“) betrachtet*, Bild 2.5.

Vom Antragsteller wird in /U1/ auf Seite 136 dabei postuliert: *Ein Volumenstrom über die Kontaktfuge zwischen Dichtung und Gebirge ist nicht zu besorgen, da sowohl für den Bentonit auf Grund des Quelldrucks als auch für den Bitumen/Asphalt auf Grund der Adhäsionskräfte und der Fluideigenschaften (Druckaufbau) kein Aufklaffen der Kontaktfuge möglich ist.* Weiterhin wird in /U1/ auf Seite 138 formuliert: *Eine weitere Auflockerung nach gebirgsschonender Beraubung wurde nicht unterstellt.*

4.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Aussagen zur geohydraulischen Modellierung der Volumenströme durch und um die oberen Dichtelemente DE 1 der Schachtverschlussysteme der Schächte Bartensleben und Marie werden als Bewertungskriterien verwendet:

- (1) Sind die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert?
- (2) Entspricht die Planung dem Stand der Technik und Wissenschaft?

4.3 Bewertung

Die geohydraulische Modellierung der Volumenströme im Bereich der Schachtverschlüsse erfolgte in /U1/ in einem vereinfachten rotationssymmetrischen Modell. In diesem Modell wurden nur zwei Zonen betrachtet, das Dichtelement und das umgebende Gebirge, das zwar

beim Schacht Bartensleben vertikal geschichtet, aber in jeder Schicht als homogen angenommen wird. Eine Kontaktzone mit veränderten geohydraulischen Eigenschaften (Auflockerungszone) wird nicht betrachtet. Die Bemessung der Dichtelemente DE 1 wird bei beiden Schächten ohne Kreditnahme weiterer Schachtverschlusskomponenten durchgeführt. Der Bereich darunter wird in der Modellierung als „offener Schacht“ betrachtet. Die einzelnen Filter- und Übergangsschichten wurden nicht berücksichtigt. Eine inhaltliche Begründung für die konkrete Höhe des Bemessungsgrenzwertes von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ oder ein Bezug zum Langzeitsicherheitskonzept wurde nicht gegeben, siehe Forderung F2.

Aus der Sicht der Prüfer bildet das in /U1/ verwendete geohydraulische Berechnungsmodell nicht den konservativen Fall ab. Dazu sollte zusätzlich eine mögliche Auflockerungszone im Kontaktbereich Dichtelement / Gebirge berücksichtigt werden.

Die Wirksamkeit (Güte) eines Dichtelementes kann als Parallelschaltung folgender Einzelvolumenströme angesehen werden /U1, S.32 /:

- *Teilvolumenstrom durch das Dichtmaterial*
- *Teilvolumenstrom durch die Kontaktzone Dichtmaterial / Gebirge und*
- *Teilvolumenstrom durch den ausbruchsnahen Gebirgsbereich.*

Von diesen drei Punkten wird in /U1/ der erste und der dritte betrachtet. Der Ausschluss von Transportprozessen durch die Kontaktzone wird aus der Sicht der Prüfer nicht ausreichend begründet. In den Antragsunterlagen fehlen Nachweise, dass die bestehende Auflockerungszone vollständig und gebirgsschonend beraubt werden kann. Es ist insbesondere auch deshalb problematisch, da nach /U1/ S. 138 keine belastbaren Daten über deren Ausdehnung vorliegen. *Über Auflockerungszonen... liegen derzeit keine fundierten Erkenntnisse vor. Aus diesem Grund wurde von einer durch die beim Schachtausbruch angewendete Bohr- und Sprengtechnik induzierte Auflockerungszone (ALZ) von 0,75 m ausgegangen.*

Im Rahmen der geprüften Unterlagen wurde kein Nachweis erbracht, wie eine Auflockerungszone unbekannter Ausdehnung vollständig beraubt werden soll. Ebenso fehlt ein nachvollziehbarer Nachweis darüber, wie beim Einbau der Dichtelemente eine erneute Ausbildung von Auflockerungen verhindert werden kann. Dementsprechend kommt der Nachweisführung der technischen Machbarkeit einer gebirgsschonenden Beraubung eine erhebliche Bedeutung zu, siehe auch Abschnitt 8 und Forderung F12. Dies gilt insbesondere, weil es sich bei den relevanten Horizonten nicht um plastische Materialien handelt. Im Schacht Marie sind das

Dogger/Tonstein/Schluffstein sowie Hutgestein/Gipsgestein, beim Schacht Bartensleben Schluffstein, Tonstein sowie Hutgestein/Gipsgestein. In diesen Formationen können sich entstandene Strömungspfade im ausbruchsnahen Bereich des Schachtes deshalb nicht durch Konvergenz wieder schließen. Eingebraachte Dichtungsmaterialien wie Bentonit können nur eine unmittelbare Kontaktfuge schließen, wobei auch das mechanische und chemische Langzeitverhalten von Bentonit unter den speziellen Bedingungen noch nicht hinreichend sicher ist, siehe Abschnitte 11 und 13. Deshalb sind mögliche Strömungsprozesse in einer Auflockerungszone vom Antragsteller angemessen zu berücksichtigen.

	Horizont	Teufe von [m]	Teufe bis [m]	k_f -Wert [m/s]	Porosität [-]
Schacht Bartensleben					
B1	Schluffstein	199,5	237,0	3,60E-10	0,07
B2	Tonstein	237,0	254,0	1,00E-11	0,05
B3	Hutgestein/Gipsgestein	254,0	258,7	4,50E-11	0,02
Schacht Marie					
M1	Hutgestein/Gipsgestein	176,0	253,0	4,50E-11	0,03

Tab. 4.1 Geohydraulische Grunddaten des Gebirges im Bereich der oberen Dichtelemente

Unter Nutzung der Ausgangsdaten der geohydraulischen Modellierungen in /U1/ wurde von den Prüfern eine vereinfachte und als Abschätzung anzusehende Sensibilitätsbetrachtung der Volumenströme durch nicht a priori auszuschließende Auflockerungszonen im Kontaktbereich Dichtelement / Gebirge vorgenommen. Die verwendeten geohydraulischen Grunddaten der Horizonte des Gebirges, die parallel zu den abstrahierten Dichtelementen liegen, sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Die Druckbelastung am oberen Modellrand beträgt entsprechend der Teufenlage beim Schacht Marie 148,8 m Wassersäule mit einer Dichte von $1,078 \text{ kg/dm}^3$ (plus atmosphärischer Luftdruck) als konservativer Höchstwert nach /U4/. Der offene Schachtbereich wurde mit dem Luftdruck von 0,1 MPa beaufschlagt. Daraus resultiert ein Druckgradient von 1,57 MPa über den 77,5 m mächtigen Gebirgsabschnitt. Für den Schacht Bartensleben beträgt der auf analoge Weise bestimmte Druckgradient 1,78 MPa über 59,2 m. Beim Schacht Bartensleben wurde die „Reihenschaltung“ der drei Horizonte Schluffstein, Tonstein sowie Hutgestein/Gipsgestein über eine Abbildung der jeweiligen Teildrücke der Potentialströmung berücksichtigt. Die Besonderheiten der Lastfälle werden im Abschnitt 9 diskutiert.

Für die verbliebene frühere bzw. neu erzeugte Auflockerungszone wurde für die Sensibilitätsbetrachtung zunächst eine laterale Ausdehnung von 50% der Ursprungsgröße von 0,75 m angenommen. Für die konkreten Auflockerungszonen der Schachtanlagen des ERA Morsleben gibt es keine durch repräsentative Messungen bestätigten Werte.

Horizont		Mächtigkeit Effektiv [m]	k _f -Wert ungestört [m/s]	Auflockerung Faktor [-]	Druckdifferenz über Schicht [MPa]	Volumenstrom [m³/a]
Schacht Bartensleben						
B1	Schluffstein	37,5	3,60E-10	25,0	0,10	0,69
B2	Tonstein	17,0	1,00E-11	25,0	1,58	
B3	Hutgestein/Gipsgestein	4,7	4,50E-11	25,0	0,10	
Schacht Marie						
M1	Hutgestein/Gipsgestein	77,5	4,50E-11	25,0	1,57	0,67

Tab. 4.2 Berechnete Volumenströme für eine Auflockerung um den Faktor 25

Rechnungen der Prüfer zeigten, dass bei Durchlässigkeitserhöhungen um den Faktor 10 bis 100 zusätzliche Volumenströme durch die Auflockerungszone erzeugt werden können, die in der Größenordnung der Bemessungsgröße von 2 m³/a liegen. In Tabelle 4.2 werden die abgeleiteten zusätzlichen Volumenströme für einen Fall dargestellt, in dem die effektive Durchlässigkeit in einer 0,375 m mächtigen Auflockerungszone um den Faktor 25 höher ist, als im ungestörten Deckgebirge. Unter diesen Voraussetzungen würden zusätzliche Fluidströme um das Dichtelement DE 1 entstehen, die im Schacht Bartensleben etwa 0,69 m³/a und im Schacht Marie um 0,67 m³/a betragen würden. Weitergehende Berechnungen können in Verbindung mit der geomechanischen Modellierung in der Phase (b) „Rechnerische Prüfung von Tragfähigkeit, Dichtigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussysteme“ erfolgen. Bei diesen Volumenströmen durch die Auflockerungszone handelt es sich um Transportprozesse, die bei der bisherigen Modellierung durch den Antragsteller nicht berücksichtigt wurden. Dort wurde nur die vertikale Durchströmung des schematisch vereinfachten Dichtelementes und die rotationssymmetrische Strömung durch das homogene und ungestörte Gebirge betrachtet. Die abgeschätzten Volumenströme durch die Auflockerungszone sind demnach zusätzlich zu den in /U1/ diskutierten Strömen zu betrachten. Das verwendete rotationssymmetrische geohydraulische Modell entspricht nicht den Anforderungen des Nachweises der Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlussysteme.

In diesem Zusammenhang verweisen wir auch auf Forderungen F22 „Die Berechnungen der numerischen Nachweise sind nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen, wonach ein dreidimensionales Berechnungsmodell heranzuziehen ist“.

Forderung F6:

Bei der geohydraulischen Modellierung der Volumenströme im Bereich des Dichteelementes DE 1 sind mögliche Transportwege durch eine nicht vollständig beräumte bzw. durch den Einbau der Dichtelemente erneut gebildete Auflockerungszone des schachtnahen Gebirges zusätzlich zu den bisherigen Modellansätzen zu berücksichtigen.

5 Bewertung der Aussagen zur geohydraulischen Dimensionierung der Dichtelemente DE 2 und DE 3

5.1 Aussagen des Antragstellers

Gemäß den Aussagen des Antragstellers in /U1/, Seiten 160ff, *erfolgt die Bemessung der Asphaltdichtungen nach dem Prinzip des einzuhaltenden Gesamtvolumenstroms aus den Teilvolumenströmen durch den abzudichtenden Querschnitt, durch die Kontaktfuge zwischen Gebirge und Dichtelement sowie durch die aufgelockerte ausbruchsnahе Gebirgszone. Durch die absolute Dichtheit des Asphaltelements und die vollständige Abdichtung der Kontaktfuge verbleibt als einzige für die Dimensionierung relevante Größe der durch den aufgelockerten Gebirgsbereich strömende Volumenstrom.*

In der Konzeptplanung wurde festgestellt: *Für die hydraulische Leitfähigkeit des Salinargebirges am Standort ERAM wurde in /U4/ ein einheitlicher Wert von $k_{f,g} = 2,0 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$ (nach überschlägiger Umrechnung $2,0 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$) angegeben. Es ist anzunehmen, dass dieser Wert für den Grundspannungszustand, also für das ungestörte Steinsalz gilt. Ein entsprechender Verweis fehlt jedoch in den zur Verfügung stehenden Arbeitsunterlagen /U4/.*

Da die Ausdehnung der vortriebstechnologisch bedingten als auch der gebirgsmechanisch induzierten Auflockerungszone (ALZ) sowie die deren hydraulische Leitfähigkeiten erst in späteren Planungsphasen bestimmt werden, ist es notwendig, für diese Größen begründete Annahmen zu treffen.

- *Die zu beraubende ALZ wird mit einer Tiefe von 0,75 m angenommen.*
- *Die Permeabilität am Ausbruchsrund (nach Entfernung der ALZ) wird mit $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ angesetzt.*
- *Die Ausdehnung der gebirgsmechanisch bedingten ALZ beträgt 0,75 m.*
- *Die Permeabilität im Grundspannungszustand beträgt $1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.*

Die Durchströmung der zylindrischen Auflockerungszone wurde quasi-eindimensional berechnet. Ausgehend von dem Grenzkriterium vom 2 m^3 pro Jahr wurde eine minimale Länge des Dichtelementes von 0,42 m abgeleitet. Es wird vorgeschlagen, die Asphaltschichten auch unter Berücksichtigung von Verlusten (Abfließen in das Gebirge und mikrobielle Degradation) auf eine Mindestlänge von 15 m zu konzipieren. Diese Berechnungen beziehen

sich auf das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 gegenüber aus dem Grubengebäude aufsteigenden gesättigten Lösungen (IP 21). Die Umströmung des kombinierten Widerlager-Dichtelements DE 2, bei Annahme eines vollständigen Ausfalls von DE 1, wird mit der selben Methodik wie beim DE 3, aber mit angepassten Fluiddrücken und –dichten ausgeführt.

5.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Aussagen zur geohydraulischen Funktion der Dichtelemente DE 2 und DE 3 der Schachtverschlusssysteme der Schächte Bartensleben und Marie werden als Bewertungskriterien verwendet:

1. Sind die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert?
2. Entspricht die Planung dem Stand der Technik und Wissenschaft?

5.3 Bewertung

Die Methodik und der Rechenweg zur Ermittlung der Volumenströme durch die Auflockungszonen um die kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 wurden in der Konzeptplanung /U1/ im Abschnitt 6.4.4.4 nachvollziehbar dargestellt. Dabei sind jedoch die Daten, auf denen die konkreten Rechnungen basieren, weitgehend ungesichert. Dies wird auch von den Autoren selbst so eingeschätzt, siehe Abschnitt 5.1.

In der Planungsstudie /U4/ wird für den Homogenbereich des Schachtes Marie vom Salzspiegel bis zur Endteufe eine einheitliche spezifische Durchlässigkeit k_f von $2,0 \cdot 10^{-14}$ m/s angegeben. Für den Schacht Bartensleben wird der selbe Wert „angenommen“. Der Gutachter hält die Angabe einer spezifischen Durchlässigkeit für einen Teufenbereich von 270 bis 522 m für methodisch nicht korrekt bzw. nicht geeignet zur eindeutigen Beschreibung der hydrogeologischen Situation. Der k_f -Wert ist keine Kenngröße für einen geologischen Horizont an sich, sondern bezieht sich grundsätzlich auf die eine konkrete Kombination von Gebirge und Fluid. Die Fluideigenschaften (Dichte und dynamische Viskosität) besitzen jedoch eine ausgeprägte Teufen- und Temperaturabhängigkeit bzw. können darüber hinaus durch örtliche Lösungszutritte stark variieren. Die Gebirgseigenschaften werden deshalb besser durch den Materialparameter der Permeabilität beschrieben.

Empfehlung E3:

Die hydraulischen Eigenschaften der Homogenbereiche des schachtnahen Gebirges sollten einheitlich über Permeabilitätswerte beschrieben werden und nicht über spezifische Durchlässigkeiten, die implizit teufenabhängig variierenden Fluideigenschaften enthalten.

Für die Dimensionierungsrechnungen der Dichtelemente werden in Abschnitt 6.4.4.4 der Konzeptplanung /U1/ nicht die einheitlichen Werte der hydraulischen Leitfähigkeit für den Homogenbereich des Salinars verwendet, wie sie in der Planungsstudie /U4/ mit $2,0 \cdot 10^{-14}$ m/s oder auch in den Anlagen 5 und 6 der Konzeptplanung /U1/ angegeben sind. Die Autoren verwenden statt dessen die In-situ Messwerte der Permeabilität von WITTKE (1999). Die Messungen erfolgten im Schacht Marie in 370 m Teufe und ergaben eine Permeabilität k von $1,0 \cdot 10^{-19}$ m² für den Grundspannungszustand von Steinsalz. Für die Permeabilität an der Schachtkontur wurde in der Dimensionierungsrechnung eine Permeabilität von $5,0 \cdot 10^{-18}$ m² verwendet.

Für die vortriebstechnologisch und gebirgsmechanisch bedingten Auflockerungszonen der Schächte des ERA Morsleben wurde aus Analogieschlüssen von anderen Standorten angenommen:

- Die zu beraubende Auflockerungszone hat eine Tiefe von 0,75 m.
- Die Ausdehnung der gebirgsmechanisch bedingten ALZ beträgt 0,75 m.

Während die vortriebstechnologisch ALZ durch schonende Beraubearbeit entfernbar ist, wird sich die gebirgsmechanisch bedingte ALZ auf Grund der zwischen Hohlraum und Grundspannungszustand vorliegenden Spannungsdifferenz wieder einstellen. Bei der Dimensionierung der Dichtelemente wird konservativ eine Umströmung des Dichtelements durch die beschriebene aufgelockerte, ausbruchsnähe Steinsalzzone unterstellt.

Die Dimensionierungsrechnungen der Dichtelemente von Abschnitt 6.4.4.4 der Konzeptplanung /U1/ basieren damit auf einer einzigen In-situ Messung von WITTKE (1999) am Steinsalz des Schachtes Marie sowie auf nicht weiter erläuterten Analogieschlüssen von anderen Standorten. Es wird ausschließlich Steinsalz betrachtet. Die Frage des Vorliegens von anderen Fazies im geplanten Teufenbereich der Dichtelemente wird nicht einmal verbal argumentativ

behandelt. Das Kaliflöz und die Korkenzieherwendel werden nicht bei der Dimensionierungsrechnung berücksichtigt. Im Bezug auf die ungenügende Berücksichtigung der Korkenzieherwendel verweisen wir auch auf die Forderung F33.

Forderung F7:

Die Annahmen für die Permeabilitäten und die räumliche Ausdehnung der Auflockerungszonen im geplanten Bereich der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 sind für die weiteren Planungsphasen durch repräsentative Messungen zu ermitteln. Dabei sind die konkrete Ausbildung des Salinars und die Schachtgeometrien in den geplanten Teufenbereichen der Dichtelemente zu berücksichtigen.

Zur Berechnung der effektiven Permeabilität der verbleibenden Auflockerungszone wird der Ansatz eines linear logarithmischen Zusammenhangs zwischen den Randwerten an der Kontur und im ungestörten Gebirge verwendet. Aus den Permeabilitäten und den örtlichen Fluideigenschaften wird eine effektive hydraulische Leitfähigkeit berechnet. Dieser Ansatz wird beim gegenwärtigen Kenntnistand als grundsätzlich geeignet angesehen. Entsprechend Forderung F7 sind für die folgenden Planungsphasen jedoch belastbare Ausgangsdaten zu ermitteln. Die Rechenwerte von Tabelle 25 wurden überprüft und ergaben innerhalb zulässiger Rundungsabweichungen ein identisches Resultat für die effektive hydraulische Leitfähigkeit von $2,71 \cdot 10^{-12}$ m/s in der Auflockerungszone von DE 3.

Das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 wurde gegenüber von der Schachtsohle aufsteigenden gesättigten Lösungen dimensioniert: Fluiddruck 6,0 MPa als „Auspressdruck“ an Unterkante von DE 3 und Fluidichte 1.292 kg/m^3 (IP 21). In diesem Zusammenhang verweisen wir auch auf die Diskussion der betrachteten Lastfälle im Abschnitt 9.3 dieses Prüfberichtes und die Forderung F14. Ausgehend von dem Grenzkriterium vom 2 m^3 pro Jahr wurde eine minimal notwendige Länge des Dichtelementes von 0,42 m abgeleitet. Die Dimensionierung des kombinierten Widerlager-Dichtelements DE 2 erfolge methodisch analog zu DE 3 und basiert auf der Annahme eines vollständigen Ausfalls von DE 1: Fluiddruck: 262 m und Fluidichte 1.198 kg/m^3 .

Vom Antragsteller wurde vorgeschlagen, die Asphaltsschichten auch unter Berücksichtigung von Verlusten (Abfließen in das Gebirge und mikrobielle Degradation) auf eine Mindestlänge von 15 m zu konzipieren. Bei der Betrachtung des Durchflusses durch das Gesamtsystem wird in der Nachweisführung ausgesagt, dass *sich Fluidvolumenströme in das Grubengebäude in der Größenordnung von 0,03 m³/a für den Schacht Marie und 0,02 m³/a für den Schacht Bartensleben ergeben. Für Volumenströme aus dem Grubengebäude ergeben sich Werte über die beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente in der Größenordnung von etwa 0,02 m³/a für beide Schächte.*

In der Streckendimensionierung der Widerlager-Dichtelemente und den daraus resultierenden Sicherheitsfaktoren bestehen Widersprüche, auf die im Abschnitt 17 des Prüfberichtes genauer eingegangen wird.

6 Bewertung der Aussagen zum Setzungsverhalten der Verfüllsäule

6.1 Aussagen des Antragstellers

Nach Aussage des AS in der Unterlage /U2/ werden Kiese und Sande in verschiedenen Kornabstufungen als Baustoff für Filter- und Ausgleichsschichten eingesetzt. Die gering mächtigen Filterschichten werden in der physikalischen Modellierung für die gebirgsmechanischen Untersuchungen nicht als eigene Homogenbereiche abgebildet, sondern den angrenzenden Elementen zugeordnet und damit vernachlässigt. Diese in der Modellierung den anderen Homogenbereichen zugeordneten Filterschichten weisen in der Summe eine Mächtigkeit von 9 m auf.

6.2 Bewertungskriterien

Das Setzungsverhalten der Verfüllsäule unterhalb des oberen Dichteelementes hat wesentlichen Einfluss auf den Erhalt der Gebrauchstauglichkeit des Verschlussbauwerkes, da nur eine setzungsstabile Verfüllsäule eine gute Grundlage für die statisch / hydraulisch erforderliche Fixierung der Dichtelemente erbringen kann. Für das Nachweiskriterium der Setzungsstabilität sind

1. alle Verfüllsäulenelemente zu betrachten, die durch mögliche Setzungen die Lagestabilität der Dichtelemente gefährden könnten,
2. die Nachweise an geeigneten Teilmodellen wie auch für das Gesamtmodell zu erbringen, um quantitative Aussagen über das Setzungsverhalten jedes einzelnen Dichtelementes erbringen zu können,
3. die Nachweise nach dem Stand der Technik, der durch bereits durchgeführte Feldversuche festgelegt worden ist, sind zu erbringen wie auch durch numerische Berechnungen,
4. bei der Nachweisführung auf Grundlage von zuvor durchgeführten Versuchen (Technikum oder in-situ) neben der eigentlichen Nachweisführung die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Schächte des ERA Morsleben darzulegen.

6.3 Bewertung

(1) Bedingt durch die Zuordnung der insgesamt 9 m mächtigen Filterschichtbereiche zu den angrenzenden Homogenbereichen wird das Kriterium, dass alle Verfüllsäulenelemente zu betrachten sind, die durch mögliche Setzungen die Lagestabilität der Dichtelemente gefährden

könnten, nicht erfüllt. Durch die Nichtberücksichtigung dieser Filterschichtbereiche bei der geomechanischen Modellierung ist es nicht möglich, abschließende Aussagen über das Setzungsverhalten der Filterschichten auf Grundlage von numerischen Berechnungen zu treffen.

Forderung F8:

Ein quantitativer Nachweis für die Setzungsstabilität der insgesamt 9 m mächtigen Filterschichten ist gegenständlich zu erbringen bzw. die Unschädlichkeit der eintretenden Setzungen für die Dichtelemente nachzuweisen sowie die Möglichkeiten zur Verringerung der Setzungen, beispielsweise auf technologischer Basis beim Einbauverfahren, sind aufzuzeigen.

(2) Dem Kriterium der Nachweisführung an geeigneten Teilsystemen sowie am Gesamtsystem wird in konzeptioneller Hinsicht entsprochen.

(3) Durch die Bezugnahme zum Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth II und der Durchführung von numerischen Berechnungen wird dieses Kriterium methodisch eingehalten.

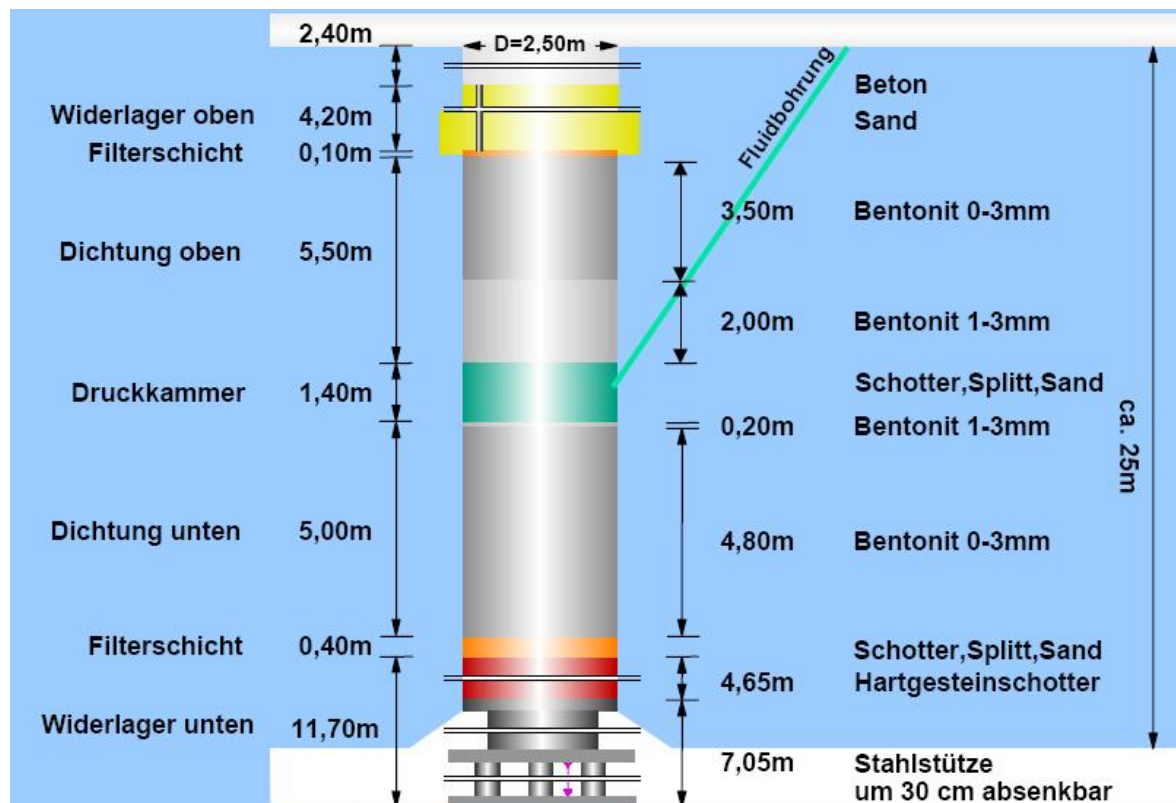


Bild 3.1: Versuchsaufbau Bohrschacht – Materialaufbau (Quelle (14): Forschungsvorhaben Salzdetfurth II)

In der vorliegenden Konzeptplanung des AS sind anstelle von Schotter/Splitt bis Feinsand für die Filterschichten abgestufte Kiese, Sande und Feinsande vorgesehen. Diese Materialien weisen eine deutlich höhere Setzungsempfindlichkeit auf als die im Schacht Salzdettfurth II verwendeten gebrochenen Materialien. Der in-situ-Versuch im Schacht Salzdettfurth II kann daher für den Nachweis der Setzungsstabilität dieser Teilbereiche nicht herangezogen werden. Bereits durchgeführte Schachtverfüllungen haben die Setzungsproblematik einer geschichteten Verfüllsäule aus einem Mineralkorngemisch von Schotter und Kies/Sand, insbesondere bei Wasserzutritt, belegt. So kam es am Schacht Desdemona innerhalb von 7 Jahren zu Setzungen von über 7 m.

Forderung F9:

Die Setzungsstabilität der vorgesehenen Filterschichtmaterialien aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden ist nachzuweisen bzw. die Unschädlichkeit der eintretenden Setzungen für die Dichtelemente. (Grundsätzlich auch im Rahmen der Entwurfsplanung bearbeitbar)

7 Bewertung der Aussagen zum Kontaktbereich Dichtelement DE 1 - Gebirge

7.1 Aussagen des Antragstellers

In der Unterlage /U4/ wird gefordert, dass *in der Konzeptplanung die Einbauart des Dichtelementes und die vorzusehende Fugenabdichtung zwischen Dichtelement und Gebirge darzulegen ist.*

7.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Aussagen zum Kontaktbereich Dichtelement DE 1 – Gebirge werden als Bewertungskriterien eingeführt:

1. Sind die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert?
2. Entspricht die Planung dem Stand der Technik und Wissenschaft?

Dabei werden insbesondere Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten kritisch hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf den Standort ERA Morsleben bewertet.

7.3 Bewertung

Der Kontaktbereich zwischen dem Dichtelement und dem anstehenden Gebirge stellt eine potentielle Schwachstelle hinsichtlich der Realisierung und damit auch der Gewährleistung der Einhaltung der Anforderung an die Dichtheit des Schachtverschlussbauwerkes dar. Setzungen von Widerlagersäulen bewirken Gleitbewegungen von Abdichtungsbauwerken relativ zum anstehenden Gebirge in axialer Richtung des Schachtbauwerkes. Untersuchungen am Schacht Salzdetfurth II haben ergeben, dass bei glatter Wandung des benachbarten Gebirges unabhängig von der Absenkgeschwindigkeit (= Setzungsrate der Widerlager- bzw. Verfüllsäule) eine einheitliche Setzung des Dichtelementes ohne randliche oder innerliche Rissbildungen bzw. Gefügeflockungen eintritt. Bei rauer Schachtwandung dagegen, d.h. bei Vorhandensein von Unebenheiten, kommt es während der Setzung zu Rissbildungen und Auflockerungserscheinungen im Kontaktbereich und es bilden sich Hohlräume an den Unebenheiten. Zusätzlich erfolgte eine Trennung des Korngemisches durch nach unten rieselndes Granulat. Um diesen Auflockerungen im Randbereich bei einer rauen Wandung zu begegnen, muss nach den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt Schacht Salzdetfurth II eine Anschüttung von Granulat im Randbereich des Dichtelementes erfolgen.

Die Behandlung der Setzungsproblematik erfordert eine Darlegung der vorgesehenen Qualität Schachtwandverhältnisse, die sich je nach Vorbehandlung (Beraubung) unterschiedlich einstellen. Wichtig ist hier, ob die vorgesehene Beraubung der Auflockerungszone gleichmäßig über den Bereich des Dichtelementes DE 1 durchgeführt wird und ein konstanter Schachtradius über die Verfülllänge vor dem Einbau des Dichtelementes vorliegt. Die Beraubungstechnik und das Beraubungswerkzeug haben Einfluss auf die zu erzielende Rauigkeit der Gebirgsoberfläche.

Als Mangel hinsichtlich einer vollständigen und schlüssigen Darstellung erachten es die Prüfer daher, dass der Prüfkompex eine Beschreibung der Beraubung der Auflockerungszone sowie insbesondere der Beraubungstechnik/-werkzeuge in diesem Bereich vermissen lässt. Es wird lediglich in der Prüfunterlage /U1/ geschrieben, dass eine Beraubung im Dichtelementbereich erfolgt und in der Unterlage /U3/ *das Maß der Aufweitung aus statischen Gründen über die gesamte Höhe des Dichtelements konstant gehalten werden soll und die Dicke der herauszunehmenden Auflockerungszone vor Beginn der Verfüllarbeiten festgelegt wird. Die Aufweitung der Schächte kann z.B. mit einer Schachtfräse durchgeführt werden.*

Forderung F10:

Es ist zu untersuchen, welche Wandrauigkeit in Abhängigkeit von der vorgesehenen Beraubungstechnik erreicht wird. Der Nachweis der Setzungsstabilität ist mit diesen Wandeigenschaften zu führen.

Hinsichtlich der Übertragbarkeitseignung von bereits durchgeführten Forschungsprojekten ist hier das Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdettfurth heranzuziehen. Die Prüfer schätzen die Darlegung der Übertragbarkeitseignung als nicht nachvollziehbar ein, da auf die unterschiedlichen Schachtdurchmesser in den Schächten Marie und Bartensleben gegenüber den Technikum und in-situ Versuchen, Bild 3.1, nicht eingegangen wird.

Forderung F11:

Die Erfahrungen aus den Versuchen am Schacht Salzdettfurth II bezüglich Sackungen bzw. Setzungen müssen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den Schachtverschluss des ERAM und die damit einhergehenden Auflockerungserscheinungen kritisch überprüft werden, da diese Versuche in einem Stahlrohr mit 800 mm Durchmesser und einem Bohrschacht mit einem Durchmesser von 2,5 m durchgeführt wurden.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass unter Berücksichtigung der genannten Bewertungskriterien die Setzungsproblematik des Bentonitgemisches in den Unterlagen des Prüfkomplexes nicht in ausreichender Weise berücksichtigt worden ist.

8 Bewertung der Aussagen zur vorgesehenen Beraubung der Schachteinbauten und der Auflockerungszone

8.1 Aussagen des Antragstellers

In der Unterlage /U1/ werden vom Antragsteller eine Beraubung der Auflockerungszone im Dichtelementbereich sowie ein Berauben des Schachteinbaus über die gesamte Schachtteufe gefordert. Hierdurch erfolgt eine Aufweitung des Schachtdurchmessers auf 8 m. In der Unterlage /U3/ erfolgt *die Entfernung des Schachteinbaus, wenn kein Formschluss zwischen Mauerwerk und Gebirge besteht. Die Dicke der zu beraubenden Auflockerungszone (im Dichtelementbereich) wird auf der Grundlage vorhandener und weiterer Untersuchungen wie z.B. in-situ-Permeabilitätstests im Zuge der Bauausführung festgelegt.*

8.2 Bewertungskriterien

Die vorgesehene Beraubung der Schachteinbauten und der Auflockerungszone ist schlüssig, nachvollziehbar und vollständig für die Schächte Marie und Bartensleben darzulegen und Probleme, die Einbauten hinsichtlich der zu erzielenden Dichtigkeit des Schachtverschlusses bewirken könnten, sind zu untersuchen.

8.3 Bewertung

Schon in der Konzeptplanung ist vom AS festzulegen, in welcher Form eine mögliche Beraubung der Schachteinbauten und der Auflockerungszone erfolgen soll, da die Größe des Schachtdurchmessers Einfluss auf das Setzungsverhalten und die Dichtheit hat und für die Nachweise so angesetzt werden muss, wie es die Konzeptplanung vorsieht.

Hinsichtlich der Verfahrensweise mit den Schachteinbauten besteht in der vom Antragsteller vorgelegten Unterlage ein Widerspruch. In /U1/ ist ein Berauben des Schachteinbaus über die gesamte Schachtteufe vorgesehen, wohingegen in /U3/ diese Beraubung nur für den Dichtelementbereich und für die Bereiche vorgesehen ist, bei denen kein Formschluss zwischen Mauerwerk und Gebirge besteht. Vor dem Hintergrund der Barrierenintegrität über den langen Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren hätte nach Ansicht der Prüfer bereits in der Planungsstudie /U4/ ein vollständiges Berauben der Einbauten als zu berücksichtigende Maßnahme für die Konzeptplanung gefordert werden müssen. In den Unterlagen /U1/ und /U2/ werden keine Aussagen getroffen, wie mit den Schachtausbaubereichen außerhalb der späteren Dichtelemente verfahren werden soll. In der zeichnerischen Darstellung des Bauwerksentwurfes des Schachtes Marie ist, entgegen den Aussagen in /U1/, kein Berauben des

Schachtmauerwerks zwischen der 352,53-m-Sohle und dem Mauerwerksabriss bei ca. 400 m dargestellt. Beim Schacht Bartensleben ist nach dem Plan des Bauwerksentwurfs kein Berauben des Schachteinbaus ab der 386,75-m-Sohle vorgesehen.

Forderung F12:

Bereits in der Konzeptplanung sind Festlegungen dahingehend vorzunehmen, ob und in welchen Bereichen des Schachtes ein Berauben der Einbauten und der Auflockerungszone vorgesehen ist. Als wesentlicher Bestandteil der Konzeptplanung sind darüber hinaus Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen, wie die Beraubung betriebstechnisch sowie gerätetechnisch durchgeführt werden kann. Die praktische Durchführbarkeit der Beraubungstechnik(en) ist gegebenenfalls nachzuweisen.

Im Zusammenhang einer vollständigen Darlegung der Verfahrensweise mit den Schachteinbauten ist auch zu untersuchen, ob die bergbaubedingten Einbauten, die beispielsweise in Form von Ankern zur Stabilisierung während der Betriebsphase sowie zum sicheren Entfernen der Schachteinbauten im Zuge des Stilllegungskonzeptes eingebracht wurden bzw. noch eingebracht werden, zusätzliche Wegsamkeiten begünstigen könnten. Diese Problematik bleibt in den Unterlagen des AS unberücksichtigt.

Forderung F13:

Die Problematik von möglichen Ankern, die eine Störung hinsichtlich der Dichtigkeit des anstehenden Barrierengesteins darstellt, ist in der Nachweisführung angemessen zu berücksichtigen.

9 Bewertung der Aussagen zu den angesetzten Lastfällen

9.1 Aussagen des Antragstellers

Nach der Unterlage /U4/ des Prüfkomplices sind gemäß der Rubrik „Vorgaben in der Nachweisführung“ bezüglich des Standsicherheitsnachweises, der im Rahmen der Nachweisgruppe „Standsicherheit/Tragfähigkeit“ behandelt wird, die Lastgruppen Eigengewicht, Gebirgsdruck (Primärspannung), von oben oder unten wirkender Flüssigkeitsdruck, außergewöhnliche Einwirkungen wie z.B. Erdbeben zu berücksichtigen. In der Konzeptplanung /U1/ wird die Bemessungslast für Erdbeben als „akzeptierbares Risiko“ quantifiziert; sie bleibt bei der Generierung der Gefährdungsbilder unberücksichtigt.

Weiterhin wird ausgeführt, dass *der Fluiddruck von unten für das kombinierte West-Südfeld des ERA Morsleben mit maximal $r_{Fl} = 6 \text{ MPa}$ angenommen wurde*. Dieser Wert wird zum einen mit dem *maximal möglichen Druck an der Unterkante des tiefsten Dichteelementes im Schacht, der sich aus der Hydrostatik ergibt*, hergeleitet. *Bei vollständig korrodierten Abdichtungen im Grubengebäude gilt durch den dann zu erwartenden Zufluss das Prinzip der kommunizierenden Röhren im Grubengebäude*. Maßgeblich für diese Annahme ist der Schacht Bartensleben mit $h = 400 \text{ m}$ und einer Lösungsdichte von $\rho = 1,3 \text{ g/cm}^3$ (Q-Lösung). Daraus folgt $r_{Fl} = 1,3 \cdot 9,81 \cdot 400 = 5,1 \text{ MPa}$.

In einem für die Herleitung dieses Zahlenwertes betrachtenden Fall wird in /U1/ bei einem unterstellten „trockenen“ West-Südfeld auch die Möglichkeit des Aufbaues eines Gasdruckes herangezogen. *Dieser Gasdruck wird [...] mit ca. 4 MPa angegeben*. Damit waren für die Entwicklung der Gefährdungsbilder die 5,1 MPa des Fall 1 maßgeblich und führten mit einem Sicherheitszuschlag von 0,9 MPa zu den angenommenen Fluiddruck von $r_{Fl} = 6 \text{ MPa}$.

9.2 Bewertungskriterien

Die angesetzten Lastfälle müssen sachlich richtig, inhaltlich vollständig und nachvollziehbar sein.

9.3 Bewertung

Die Versagensmechanismen bei einem möglichen Fluidzutritt in das Grubengebäude und die weitere Entwicklung durch Konvergenz lassen sich nur schwer prognostizieren. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine mögliche Leckage im Salinar, die eine Wegsamkeit für den Fluidzutritt bildet, sich aufgrund der Konvergenz wieder verschließt. Aufgrund der nicht vorhandenen Möglichkeit des Entweichens der Flüssigkeit durch die wieder verschlossenen Flüs-

sigkeitspfade kann es in Folge der Gebirgskonvergenz zu einem petrostatischen Druck kommen. Dieser Lastfall bewirkt somit einen höheren Druck als der, der auf der Annahme von kommunizierenden Röhren beruht.

In der vorliegenden Unterlage /U2/ wird lediglich ein Fluiddruck von unten angesetzt, der hinsichtlich seiner zahlenmäßigen Größe aus dem hydrostatischen Druck unter Berücksichtigung der Lage des unteren Dichtelementes und der Dichte der Lösung resultiert. Diese Annahme ist nur unter der Bedingung zulässig, dass ein offenes hydraulisches System mit kommunizierenden Röhren existiert. Hinsichtlich des Fluiddruckes ist aber auch das zuvor beschriebene Szenario des Eindringens von Lösung mit anschließender Verheilung der Wegsamkeit, durch die die Lösung in das Grubengebäude gelangt ist, zu untersuchen. Daher muss eine Betrachtung als geschlossenes System mit Einschluss von Lösungen als Gefährdung bzw. Einwirkung Berücksichtigung finden und ein petrostatischer Druck als alleinige Belastung von unten auf das untere Dichtelement angesetzt werden. Eine zusätzliche Flüssigkeitssäule im Schacht oberhalb des Dichtelementes würde sich günstig auswirken und ist somit nicht anzusetzen.

Forderung F14:

Es ist zu prüfen, ob der Ansatz eines petrostatischen Drucks grundsätzlich als ungünstigster Lastfall für den Fluiddruck anzusetzen ist.

(Grundsätzlich auch im Rahmen der Entwurfsplanung bearbeitbar)

Um dem Bewertungskriterium der inhaltlichen Vollständigkeit der Lastfälle zu entsprechen, ist die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Erdbebens zu untersuchen und bei den Lastfällen, die aus den Gefährdungsbildern generiert werden, angemessen zu berücksichtigen. Lediglich das Ergebnis einer solchen Untersuchung erlaubt es, die Bemessungslast für Erdbeben als „akzeptierbares Risiko“ einzustufen und nicht näher zu quantifizieren. Diesbezüglich erachten es die Prüfer als Mangel, dass in der Prüfunterlage die Gefahren aus Seismizität und im speziellen durch Erdbebeneinwirkung vom Antragsteller nicht näher erläutert werden.

Forderung F15:

Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Erdbeben für den Standort Morsleben ist in Abhängigkeit der Magnituden ist zu prognostizieren und eine mögliche Gefährdung für das Verschlussbauwerk zu untersuchen.

10 Bewertung der Aussagen zu den Füllörtern

10.1 Aussagen des Antragstellers

In der Unterlage /U2/ wird ausgeführt, dass *die in der Praxis vorhandenen Vorschüttungen z.B. durch verdichtete Schotter oder durch unverdichtete Salzminerale bei den Berechnungen unberücksichtigt bleiben. Der Böschungswinkel b liegt in der Größenordnung $b = 36^\circ$ für den eingesetzten Schotter [Breidung, K.-P. (2002): Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II, Abschlussbericht, K+S Aktiengesellschaft Kassel, Bad Salzdetfurth, 2002]*

10.2 Bewertungskriterien

Bereits in der Konzeptplanung sollte nach Ansicht der Prüfer festgelegt werden, wie die Problematik eines möglichen Auslaufens der Verfüllsäule in die Füllörter konstruktiv gelöst werden soll. Die Darstellung muss dabei nachvollziehbar, schlüssig und vollständig sein.

Eine vollständige Darstellung beinhaltet auch die Angaben zu den Vorarbeiten wie

- das Abschrägen der Firstbereiche,
- die Materialauswahl der Vorschüttungen (= Widerlagerkonstruktion),
- die Dimensionierung und Geometrie der Widerlager,
- die Wahl der Konstruktionselemente,
- die eigentliche Füllortböschung sowie
- eine zusätzliche Vorschüttung.

Nach den Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt Schacht Salzdetfurth II sind in konstruktiver Hinsicht folgende Maßnahmen im Füllortbereich zu treffen:

- Böschungswinkel der Schotterböschung im Füllortbereich $< 36^\circ$,
- Verdichtete Vorschüttung aus Hartgesteinschotter über mindestens die Länge der gemittelten Füllorthöhe,
- Salzvorschüttung vor die Schottervorschüttung in den Füllortbereichen über die Länge der gemittelten Füllorthöhe; Material soll dem anstehenden Gebirge im Bereich des Füllortes entsprechen,
- Neigungswinkel der Vorschüttung $< 30^\circ$.

Da die Widerlager in den Füllortbereichen aus setzungsstabilem Material zu erstellen sind, werden hier die gleichen Anforderungen hinsichtlich des Materials und der Materialgüte gestellt wie bei der unteren Widerlagersäule.

Für die numerische Nachweisführung sind die getroffenen Annahmen zu berücksichtigen und im Rahmen der gewählten Sicherheitstheorie mit entsprechenden Sicherheitsfaktoren zu belegen.

10.3 Bewertung

Der Antragsteller legt keine Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter vor. Es wird lediglich dargelegt, welche Annahmen Eingang in die numerischen Berechnungen gefunden haben. Die bautechnische Realisierung einer Vorschüttung bleibt ebenso unklar wie deren Böschungswinkel. Der Verzicht auf den Ansatz einer Vorschüttung stellt für die numerischen Berechnungen zwar eine konservativ gewählte Annahme dar, erbringt dadurch aber keine quantitative Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeit für die Auslaufsicherheit der Verfüllsäule bei einem Widerlager mit Vorschüttung.

Forderung F16:

Es ist eine Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter auszuarbeiten. Die Sicherheit der dabei gewählten Konstruktion ist quantitativ zu belegen.

11 Bewertung der Aussagen zu der konstruktiven Verfüllsäulengestaltung im Bereich der Störungszone zwischen 177 und 178 m Teufe beim Schacht Bartensleben

11.1 Aussagen des Antragstellers

Der Entwurf für das Schachtverschlussbauwerk im Schacht Bartensleben sieht den Einbau der oberen Widerlagersäule aus Mineralgemisch bis in eine Teufe von 196,50 m vor. Anschließend folgt eine Filterschicht in der Teufenlage 196,50 bis 199,50 m aus Feinsand sowie abgestuften Kiesen und Sanden. Das Dichtelement aus Bentonit (Calcigel) schließt sich bis zu einer Teufe von 258,74 m an. Nach Aussage in /U4/ steht *bei 177,75 m Teufe beim Schacht Bartensleben ein hydraulischer Druck von 11,5 bar an. Die Zutrittsstelle ist auch mit einem namhaften Feststoffgehalt befrachtet, das vorrangig ausgewaschenem Material des Schilfsandsteines entspricht.*

11.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Aussagen zur konstruktiven Verfüllsäulengestaltung im Bereich von Störstellen, die ein erhöhtes Gefährdungspotential hinsichtlich der Dichtheitseigenschaften des Schachtverschlusses darstellen können, wird überprüft, inwieweit die Darstellungen in konstruktiver Hinsicht in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert sind und dem Stand der Technik und Wissenschaft entsprechen. Insbesondere werden Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsprojekten, die Rückschlüsse für das Gefährdungspotential von Störstellen zulassen, kritisch in die Bewertung mit einbezogen.

11.3 Bewertung

Der in der Unterlage /U4/ erwähnte Wasserzutritt an der Störstelle bei 177,75 m Teufe bzw. - 44 m NN mit einem hydraulischen Druck von 11,5 bar auf die äußere Schachtschale ist nur ca. 22 m vom Bentonit-Dichtelement (beginnend bei 199,50 m Teufe) entfernt.

Untersuchungen im Schacht Salzdettfurth II haben ergeben, dass es bei plötzlich auftretendem hohem Fluiddruck (> 10 bar) zu einer Störung des verdichteten Bentonitgefüges kommen kann und in der Folge zu einer Ausbildung von Flüssigkeitspfaden im Bentonit. Darüber hinaus können unter Umständen Wegsamkeiten in der Kontaktzone zwischen Dichtelement und Gebirge entstehen, da der angestrebte Quelldruck durch die Zerstörung des homogenen Aufbaus des Bentonitgefüges nicht mehr erreicht wird.

Aus den Versuchsergebnissen im Schacht Salzdetfurth II wurde die Erkenntnis gewonnen, dass eine Flutung von binären Gemischen mit dem ausgewählten Bentonitgranulat Kornband von 1-3 mm nur mit Fluiddrücken von max. 6 bar erfolgen sollte. Vor dem Hintergrund der vorgesehenen Beraubung des Schachtmauerwerks kann nach Einschätzung der Prüfer nicht ausgeschlossen werden, dass sich bei diesem hohen anstehenden Fluiddruck von 11,5 bar an der Störstelle Wegsamkeiten bis zu dem Dichtelement ausbilden und ein Fluiddruck größer 10 bar am Bentonit-Dichtelement wirkt. In diesem Fall wären die schädigenden Auswirkungen auf das Bentonitgemisch, die im Forschungsprojekt Salzdetfurth beobachtet wurden, nicht auszuschließen.

Forderung F17:

Es sind konstruktive Lösungen zu erarbeiten, die einen Durchschlag des Fluiddruckes zum Bentonit-Dichtelement verhindern können. Alternativ ist die Unschädlichkeit einer derartigen Einwirkung durch eine geeignete Materialwahl nachzuweisen.

(Eventuell auch im Rahmen der Entwurfsplanung bearbeitbar)

12 Bewertung der Aussagen zu den Schottersäulen

12.1 Aussagen des Antragstellers

Hartgesteinsschotter sind hinsichtlich ihrer Setzungsstabilität nach den Unterlagen /U1/ und /U2/ als Baustoff für die untere Widerlagersäule sowie des Lastabtragverhaltens infolge der Ausbildung des Siloeffektes als Baustoff für die kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 und als Bestandteil des Mineralgemischs (Schotter, Kiese, Sande, Bentonit) zur Stabilisierung des Deckgebirges vorgesehen.

In der Unterlage /U2/ wird in der Nachweisführung für die *Eignung der Baustoffe hinsichtlich der Setzungsstabilität und Langzeitstabilität* auf die einschlägigen Normen wie z.B. die Technischen Lieferbedingungen Gleisschotter der Deutschen Bahn AG und für den Einsatz, den Umgang und die Handhabung mit setzungsarmen Schottern zur Hohlraumverfüllung auf bereits gesammelte Erfahrungen bei Schachtverschlüssen verwiesen.

Als weiteres Beispiel für den Nachweis einer setzungsstabilen Schottersäule stützt sich der Antragsteller auf Versuche im Rahmen des Forschungsprojektes Schachtverschluss Salzdetfurth. Unter anderem wurden in dem Vorhaben durch Laboruntersuchungen sowie halbbtechnische Versuche die Materialien und die Messtechnik ausgewählt und am Schacht I Untersuchungen zur Einbringtechnik und der Eignung der Messapparatur durchgeführt sowie der Nachweis einer setzungsstabilen Schottersäule im Schacht II erbracht.

12.2 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der Aussagen zu den Schottersäulen wird überprüft, inwieweit die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert sind und dem Stand der Technik und Wissenschaft entsprechen.

Insbesondere werden die in Abschnitt 19 dargelegten Anforderungen aus den Allgemeinen Verwaltungsvorschriften herangezogen. Nach der Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten -Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld- /L7/ werden die Anforderungen an Schotter bei geschichteten Füllsäulen wie folgt formuliert:

„Schotter, der zur Abtragung von Lasten in geschichteten Füllsäulen eingesetzt werden soll, muss aus Hartgestein bestehen und den Technischen Lieferbedingungen für Gleisschotter der Deutschen Bundesbahn (TL 91861) entsprechen.“

Weiterhin zu prüfen ist, ob bzw. inwieweit die an standortfremden Lokationen erarbeiteten Erfahrungen zur Setzungs- und Langzeitsstabilität (Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth) ohne weitere Modifikationen / Einschätzungen auf die standortspezifischen Verhältnisse des ERA Morsleben übertragbar sind.

Für die Bewertung des Setzungsverhaltens einer Schottersäule unter Last und Salzlösungszutritt ist es somit zwingend erforderlich, die Erkenntnisse aus den in-situ-Versuchen im Rahmen des Forschungsprojektes Schachtverschluss Salzdetfurth auf ihre Übertragbarkeit auf die Schachtverschlüsse des ERAM zu prüfen.

12.3 Bewertung

Vor dem Hintergrund der negativen Auswirkungen von Setzungen bzw. Sackungen in der Verfüllsäule auf die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes ist das Verhalten einer Schottersäule unter mechanischen Beanspruchungen, insbesondere aber auch für den Versagensfall mit Salzlösungszutritt, nachzuweisen.

Die Prüfer sehen die bisher gesammelten Erfahrungen zum Schottereinsatz bei Schachtverfüllungen als nicht ausreichend an, um die Setzungsstabilität der Schottersäule für den Schachtverschluss des ERA Morsleben aufgrund der hier wesentlich höheren Anforderungen nachzuweisen.

Begründet wird vorstehende Einschätzung wie folgt:

- (1) Die mechanischen Materialeigenschaften eines Gleisschotters entsprechend den Technischen Lieferbedingungen der Deutschen Bahn, /L7/, sind nicht unmittelbar auf Schottersäulen mit Salzlösungszutritt übertragbar.
- (2) In der Unterlage /U1/ wird der Schachtdurchmesser für die Schächte Marie und Bartensleben nach Berauben und Nachschnitt mit konstant $d = 8 \text{ m}$ über die gesamte Teufe angegeben. Im Schacht Salzdetfurth II ist der Durchmesser deutlich geringer und der Schacht verjüngt sich zudem im unteren Bereich. Der lichte Durchmesser an der Schachtsohle beträgt in Salzdetfurth nur $d = 4,25 \text{ m}$. Ab ca. 7 m über der Sohle bis zum Füllort der 774 m – Sohle ist er auf $d = 5,10 \text{ m}$ erweitert. Danach steht der Schacht im Durchmesser zwischen $d = 5,60 \text{ m}$ und $d = 7,70 \text{ m}$ bis zur geplanten Schotteroberkante bei ca. 513 m Teufe unausgebaut überwiegend im älteren Steinsalz.
- (3) Auch der Schacht Salzdetfurth I hat mit einem lichten Durchmesser von $d = 5,25 \text{ m}$ einen deutlich geringeren Durchmesser als die Schächte in Morsleben nach Beraubung. Die möglicherweise ohne Siloeffekt auftretenden Setzungen zeigten die

Oedometerversuche unter den in-situ-Verhältnissen nahen Bedingungen in Salzdettfurth. Hierbei betrug die maximale Volumenkompaktion (bezogen auf eine Einbaudichte von $1,5 \text{ t/m}^3$) bei einer Vertikallast von 15 MPa (entspricht dem Überlagerungsdruck bei 600 m) 25% und die Sättigungssetzung 3%. Dieser Befund ist auch in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Triaxialversuche, bei denen bei Effektivbelastungen von $p_r = 1,5 \text{ MPa}$ eine Sättigungssetzung von $\varepsilon_v = 0,4\%$ gemessen wurde.

Forderung F18:

Die Zulässigkeit der Übertragung der Erfahrungen aus Versuchen zum Setzungsverhalten einer Schottersäule in den Schächten Salzdettfurth I und II auf das vorliegende Projekt muss kritisch überprüft werden. Da die Standsicherheit des Verfüllbauwerkes im Wesentlichen vom Siloeffekt beeinflusst wird, ist nachzuweisen, dass sich dieser aufgrund der unterschiedlichen Schachtdurchmesser und Schachtkonfigurationen im ERA Morsleben nicht ungünstiger einstellt.

13 Bewertung der Aussagen zum Dichtelement DE 1

13.1 Aussagen des Antragstellers

In der vorliegenden Konzeptplanung werden *Tone und Bentonite als Baustoff für die Dichtelemente gegen zuzitrende Lösungen aus dem Deckgebirge und/oder gegen aufsteigende Lösungen aus dem Grubengebäude vorgesehen*. In der Unterlage /U2/ führt der Antragsteller aus, dass *bislang keine gesicherten Erkenntnisse für die aus dem Salzbetoneinsatz beim Stilllegungskonzept resultierenden chemischen Veränderung der Lösungen durch Zementphasen und deren Auswirkungen auf das Langzeitverhalten von Bentonit vorliegen*.

Nach der Unterlage /U4/ *sind in der Konzeptplanung die Einbauart des Dichtelementes und die vorzusehende Fugenabdichtung zwischen Dichtelement und Gebirge darzulegen. Im Rahmen der Planung sind gegebenenfalls nach dem Stand der Technik Alternativen bei der Einbring- und Verdichtungstechnik aufzuzeigen und Aufwandschätzungen abzugeben*.

Bei der Nachweisführung hinsichtlich der Eignung und der praktischen Anwendbarkeit bentonitbasierter Dichtelemente verweist der Antragsteller in /U2/ besonders auf den erfolgreich abgeschlossenen in-situ-Versuch in Salzdetfurth.

13.2 Bewertungskriterien

Im Rahmen der Beurteilung der Aussagen zum Dichtelement DE 1 wird überprüft, inwieweit die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sowie widerspruchsfrei dokumentiert sind und bei den Nachweisführungen hinreichend berücksichtigt wurden.

Eine solche Darstellung beinhaltet

- für den sicheren Nachweis der Langzeitbeständigkeit und Funktionsbeständigkeit der Dichtelemente die Betrachtung und angemessene Berücksichtigung aller Einflussfaktoren, die sich negativ auf das Abdichtverhalten auswirken könnten,
- die Untersuchung des Vorhandenseins von Kalium-Ionen und gegebenenfalls die Berücksichtigung in der Nachweisführung, da Kalium schon in geringen Mengen die Dauerbeständigkeit des Montmorillonits beeinträchtigt,
- eine Prognose über das Dichtelementsetzungsverhalten bei einer gestörten Entwicklung sowie eine Abschätzung, ob es bei auftretenden Setzungen der Widerlager auch zu Funktionsbeeinträchtigungen der Dichtelemente kommen kann und
- im Zuge der Nachweisführungen, die sich auf bereits erfolgreich abgeschlossene Versuche stützen eine begründete Darlegung der Übertragbarkeitseignung.

13.3 Bewertung

Der Antragsteller hat die in der Unterlage /U4/ geforderte Darlegung der Einbauart und die vorzusehende Fugenabdichtung zwischen Dichtelement und Gebirge nicht ausreichend behandelt.

Forderung F19:

Da insbesondere die Einbauart zusammen mit der Einbring- und Verdichtungstechnik Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit des Dichtelementes hat, ist diese schon in der Konzeptplanung darzulegen.

Wie der Antragsteller ausführt, liegen bislang keine gesicherten Erkenntnisse für die resultierende chemische Veränderung der Lösungen durch Zementphasen und deren Auswirkungen auf das Langzeitverhalten von Bentonit vor. In der Konsequenz ist ein Eintrag von Zementphasen in Lösungen, die möglicherweise mit dem Bentonit der Dichtelemente in Kontakt kommen könnten, konstruktiv auszuschließen. Der Unterlage /U4/ ist zu entnehmen, dass bei einer Schachtsanierung des Schachtes Bartensleben in den 60er Jahren insgesamt 573 Löcher mit 32,3 t Zement bis in eine Teufe von 215 m verpresst wurden. Nach der Konzeptplanung ist das Dichtelement DE 1 in der Teufenlage 199,5 m bis 258,74 m vorgesehen.

Forderung F20:

Vom Antragsteller ist darzulegen und zu beurteilen, ob mit der Entfernung der Auflockerungszone die Zementinjektionen entfernt werden oder ob sie sich im Falle des Verbleibens im anstehenden Gestein negativ auf die Langzeiteigenschaften des Bentonits auswirken könnten. Auch sind Aussagen und Bewertungen über das Vorhandensein von Kalium-Ionen zu treffen. (Eventuell auch im Rahmen der Entwurfsplanung bearbeitbar)

Der Antragsteller verweist in der Nachweisführung auf erfolgreich abgeschlossene Versuche beim Forschungsvorhaben Schacht Salzdettfurth II, die die Eignung von Calcigel-Dichtelementen belegt haben. Allerdings ist die Zulässigkeit der Übertragbarkeit der dortigen Ergebnisse in den Prüfunterlagen nicht ausreichend nachgewiesen. Während die Konzeptplanung für die Schächte Marie und Bartensleben einen Schachtdurchmesser vor dem Verfüllen von $d = 8$ m und Verfülllängen zwischen 59,24 m und 77,53 m vorsieht, wurden die in-situ-Versuche im Zuge des Forschungsprojektes Salzdettfurth mit nur 2,5 m Durchmesser und ei-

ner Länge von 30 m durchgeführt, Bild 3.1. Bei vorherigen Großversuchen blieben die Quelldrücke unter den erwarteten Maximalwerten, da es zu einer inhomogenen Durchfeuchtung kam und zu einer so genannten Selbstabschirmung, so dass hinter dem Fluidzutritt liegende Bentonitbereiche nur diffus von Wasser erreicht werden konnten. Durch eine gezielte Bewässerung, wie sie bei den Versuchen in Salzdettfurth mit einer Fluidbohrung durchgeführt wurde, kann eine homogene Durchfeuchtung erreicht und der Effekt der Selbstabschirmung minimiert werden. Daher ist es für den Nachweis der Quelldruckausbildung und der Funktionsfähigkeit des Dichtelementes aus Bentonit erforderlich, die Flüssigkeitszutrittsszenarien zu untersuchen.

Allerdings wird in den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ nicht ausreichend dargelegt, wie ein möglicher Wasserzutritt am Dichtelement erfolgen kann. Auch sind Angaben hinsichtlich einer vorgesehenen gezielten Bewässerung nach Bau nicht zu finden. Aufgrund dieser Mängel sind die Prüfer der Ansicht, dass die Versuchsergebnisse aus dem Forschungsvorhaben Salzdettfurth nicht unmittelbar übertragen werden können. Die Simulation einer gestörten Entwicklung, bei der es zu starken Setzungen kommen kann, ist im Forschungsprojekt Salzdettfurth entgegen den vorherigen Planungen durch den Verzicht auf einen Einsatz der absenkbaren Stahlstütze nicht simuliert worden. Ein Zugrundelegen der Versuche aus dem Forschungsvorhaben Salzdettfurth hinsichtlich des Dichtelementverhaltens ist aus diesem Grund bei einer gestörten Entwicklung nicht möglich.

Forderung F21:

Die Übertragbarkeit der Versuche aus dem Forschungsprojekt Salzdettfurth auf das ERA Morsleben ist hinsichtlich der unterschiedlichen Schachtdurchmesser und der gezielten Bewässerung in Salzdettfurth nachzuweisen. Es ist zu untersuchen und zu bewerten, welchen Einfluss eine Teildurchfeuchtung des Dichtelementes auf die Wirksamkeit der restlichen Bentonitbereiche hat. Die Auswirkungen von Setzungen auf die Dichtigkeitsfunktion sind zu untersuchen und ihre Unbedenklichkeiten zu belegen.

14 Bewertung der Aussagen zu den Numerischen Nachweisen

14.1 Aussagen des Antragstellers

In den numerischen Simulationen wird nur elastisches Materialverhalten für den Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel-Bereich und das Hutgestein angesetzt. In der Nachweisführung /U2/ erfolgt eine rotationssymmetrische Modellierung von Schacht und umgebendem Gebirge mit der Schachtachse als Symmetrieachse, da diese Abstraktion nach Ansicht des Antragstellers die Geometrie des Schachtes, die Materialeigenschaften der Verfüllsäule sowie die Gebirgseigenschaften erlauben. Da man die horizontale Anisotropie der Primärspannungen für die Bereiche des Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel und des Hutgesteins nicht mittels des rotationssymmetrischen Modells beschreiben kann, werden vereinfachend isotrope primäre Horizontalspannungen angesetzt, die den rechnerisch an der Kontur ermittelten Spannungsextremwerten $S_{t\min 1,2}$, $S_{t\max 1,2}$ entsprechen. Die geomechanischen Berechnungen erfolgen am Modell des Schachtes Marie. Dieser Bauwerksentwurf stellt hinsichtlich der geringeren Einbaulängen des Schachtverschlusselementes Widerlager-Dichtelement DE 3 und des geringeren vertikalen Abstandes zum oberen Füllort den konservativen Betrachtungsfall dar. Aufgrund der vergleichbaren geomechanischen Verhältnisse an den Schächten Marie und Bartensleben können die Ergebnisse der geomechanischen Berechnungen für den Schacht Marie auf den Schacht Bartensleben übertragen werden. Die geohydraulischen Nachweise sind für beide Schächte gültig.

Bei Lastfall GLF 6 resultiert eine Vertikalbelastung an der Oberkante der Füllörter von $p_{os} = 0,3 \text{ MPa}$ (Siloeffekt). Im Lastfall TM 0 wird die im Einbauzustand an der Oberkante von DE 2 vorhandene Vertikalspannung, die aus dem Eigengewicht der oberen Verfüllsäule und dem Siloeffekt resultiert, mit $p_{Fo} = 0,4 \text{ MPa}$ berücksichtigt.

In der Prüfunterlage /U2/ sagt der AS aus, dass das elasto-plastische Stoffgesetz neben den genannten Parametern des Bruchkriteriums die elastischen Kennwerte Elastizitätsmodul E und Querdehnungszahl (n) charakterisiert.

14.2 Bewertungskriterien

Im Rahmen der Bewertung der Aussagen zu den Numerischen Nachweisen wird überprüft, inwieweit die Darstellungen der verwendeten Nachweiskriterien, Berechnungen und Auswertungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert sind und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Durch diese Bewertungskriterien

- ist bei der FEM(Finite-Element-Methode)-REM(Rand-Element-Methode)-Kopplung darauf zu achten, dass durch eine vereinfachte rotationssymmetrische Modellierung der 3D-Realität nicht unzulässig große Ungenauigkeiten auftreten,
- sind die für die numerischen Berechnungen verwendeten Annahmen und Materialparameter hinsichtlich ihrer Wertigkeit nachvollziehbar und plausibel zu erläutern,
- sind bei den Berechnungen in der Szenariensimulation die Schachtgeschichte und die daraus resultierenden Schädigungen des anstehenden Gebirges angemessen zu berücksichtigen,
- ist eine dreidimensionale Modellierung des Gas- und Laugenflusses vorzunehmen und ein duales Porenraumvolumen mit unterschiedlichen Porositäten und Permeabilitäten für Gas und Lauge mit kommunizierenden Kluft- und Matrixzonen zu berücksichtigen,
- sind Berechnungen der Fließwege und der Fließgeschwindigkeiten bzw. der Infiltrationsfront in Abhängigkeit von der Zeit für Gas und Lauge sowie in diesem Zusammenhang eine Veränderung der hydraulischen Materialeigenschaften durch Permeabilitätsänderung und Schädigung durchzuführen sowie evtl. auch Auf- und Umströmungsprozesse (Konzentration, Temperatur).

14.3 Bewertung

Die Reduktion des geometrischen Modells auf ein rotationssymmetrisches Modell sowie damit verbunden die Reduktion auf den Ansatz von isotropen primären Horizontalspannungen für die Bereiche des Dogger/Schluff/Tonstein/Mergel und des Hutgesteins entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die in der Annahme der Rotationssymmetrie unterstellte Homogenität eines jeden Materialbereiches in Umfangsrichtung bei dem rotationssymmetrischen Modell ist insbesondere im Bereich der Füllörter wie der schräg einfallenden Anhydritlagen beim Schacht Bartensleben nicht gegeben.

Forderung F22:

Die Berechnungen der numerischen Nachweise sind nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen, wonach ein dreidimensionales Berechnungsmodell heranzuziehen ist.

Darüber hinaus ist es nach Ansicht der Prüfer notwendig, standortbezogene geomechanische Berechnungen für den Schacht Bartensleben durchzuführen. Eine Übertragung der Ergebnisse vom berechneten Schacht Marie auf den Schacht Bartensleben ist vor dem Hintergrund der standortbezogenen Unterschiede zwischen den beiden Schächten und den daraus resultierenden spezifischen Gefährdungen für die Nachweisführung sowie der unterschiedlichen Dimensionierung der einzelnen Verfüllelemente zwischen den Schächten Marie und Bartensleben nicht zulässig.

Forderung F23:

Es sind zusätzlich standortbezogene geomechanische Berechnungen für den Schacht Bartensleben durchzuführen.

Die Lösung der Problematik von Berechnungen mittels FEM und REM nach der Kontinuums-Methode bei der Anwendung auf die Schotterverfüllung mit Porenhohlräumen hat der AS nicht ausreichend dargelegt.

Die Größe des Siloeffektes ist für die Standsicherheit der Verfüllsäule von großer Bedeutung. Der unterschiedliche Ansatz des Siloeffektes bleibt seitens des AS unbegründet. Die Darstellung der Ergebnisse in Tabellenform ist nicht nachvollziehbar. Die fehlenden Indices bei den unterschiedlichen Fluidruckbelastungen, die in den einzelnen Lastfällen der Teilmodelle TM0 bis TM3 alle mit r_{Fo} versehen sind, werden auch bei der Darlegung der Berechnungsfälle den Anforderungen einer nachvollziehbaren Dokumentation der verwendeten Bemessungsgrößen nicht gerecht.

Forderung F24:

Die Nachweiskriterien, Berechnungen und Auswertungen sind schlüssig, vollständig und nachvollziehbar darzulegen.

Empfehlung E4:

Das elasto-plastische Stoffgesetz, das hier zugrunde gelegt wird, sollte nachvollziehbar und schlüssig dargelegt werden.

Hinweis H3:

Die Aussage, dass ein Stoffmodell die elastischen Kennwerte Elastizitätsmodul E und Querdehnungszahl n charakterisiert, ist falsch.

15 Bewertung der Aussagen zur Sicherheitstheorie

15.1 Aussagen des Antragstellers

In den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ erfolgt bei den gebirgsmechanischen Nachweisführungen zur Tragfähigkeit- und Gebrauchstauglichkeit eine *Abminderung für die Festigkeitsparameter Reibung und Steifigkeit der Verfüllsäule mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,5$* . Das Sicherheitsniveau wird mit Hilfe einer *Sensitivitätsanalyse* und Teilsicherheitsfaktoren zwischen $\gamma = 1,5$ und $\gamma = 3,0$ ermittelt. *Die Berechnungsergebnisse liegen in Form von Spannungen und Verschiebungen für die Elemente bzw. Knoten des FDM-Modells vor. Es folgt die Dokumentation und Auswertung charakteristischer Werte sowie eine visuelle Darstellung in Form von colorierten Isoflächen.* Zusätzlich erfolgt eine Auswertung mit Hilfe von Bewertungskennwerten hinsichtlich der Beanspruchungszustände von Gebirge, Verfüllmaterial und Kontaktfuge.

Bei der Erarbeitung von Gefährdungsbildern in der Prüfunterlage /U1/ werden Szenarien, die auf Grund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten keine Berücksichtigung finden, als akzeptierbares Restrisiko übernommen. In diesem Zusammenhang wird vom AS die Begleitgefahr einer Bemessungslast für Erdbeben als akzeptierbares Restrisiko eingestuft und die Begleitgefahren klimatische Veränderungen, tektonische Einflüsse sowie human intrusion als zu „übernehmendes Risiko“.

Als Schutzziele und Anforderungen an das Verschlussbauwerk wurde hinsichtlich des zulässigen Volumenstroms über den Nachweiszeitraum von 30.000 Jahren gefordert, dass der Volumenstrom von Salzlösungen durch die Schachtverfüllung den Betrag von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht überschreiten darf.

Bei der Vorgehensweise zur Erfassung möglicher Gefährdungen und Einwirkungen hat der AS eine Unterteilung nach dem zeitlichen Charakter entsprechend DIN V ENV 1991-1 vorgenommen in

- ständige Gefährdungen/Einwirkungen,
- veränderliche Gefährdungen/Einwirkungen sowie
- außergewöhnliche Gefährdungen/Einwirkungen.

Bei der geohydraulischen Untersuchung zum Gebrauchstauglichkeitsnachweis wird zur Auslegung der Dichtelemente als Bemessungsziel für jedes Einzeldichtelement ein maximaler Volumenstrom von zwei Kubikmetern pro Jahr angestrebt. Dieser Grenzvolumenstrom stellt

gleichzeitig auch das einzige gültige Sicherheitskriterium für den geohydraulischen Gebrauchstauglichkeitsnachweis dar. In Auswertung der Modellrechnungen für den Schacht Marie ergab sich ein Volumenstrom, der mit $4,0 \text{ m}^3/\text{a}$ über dem Grenzkriterium des zulässigen Volumenstroms von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ liegt. Als Ergebnis für den Schacht Bartensleben ergab sich für das beschriebene Modell ein Gesamtvolumenstrom in den offenen Schachtbereich von $3,0 \text{ m}^3/\text{a}$.

In der Prüfunterlage /U1/ wurde der Fluiddruck von unten für das kombinierte West-Südfeld des ERA Morsleben mit maximal 6 MPa angenommen. Maßgebend für diese Annahme ist der Schacht Bartensleben mit $h = 400 \text{ m}$ und einer Lösungsdichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$ (Q-Lösung). Daraus folgt $p = (1300 \cdot 9,81 \cdot 400) = 5,1 \text{ MPa}$. Damit waren für die Entwicklung der Gefährdungsbilder die 5,1 MPa maßgeblich und führten mit einem Sicherheitszuschlag von 0,9 MPa zu den angenommenen 6 MPa.

Ein quantitativer Nachweis der Standsicherheit in Form einer Bemessung bzw. ein rechnerischer Vergleich zwischen Einwirkungs- und Widerstandsgröße (Risikoabschätzung) wird in der Prüfunterlage /U4/ gefordert. Im Anschluss an die jeweiligen Nachweisführungen ist eine Folgeabschätzung hinsichtlich der Schadensgröße, die Festlegung verhindernder Maßnahmen (Risikobegrenzung) und die Festlegung begrenzender Maßnahmen (Schadensbegrenzung) vorzunehmen.

15.2 Bewertungskriterien

Entsprechend den Aussagen in Abschnitt 1.2 dieses Prüfberichtes liegen keine allgemeinverbindlichen Vorgaben dahingehend vor, wie für Verschlussbauwerke im Detail der Nachweis der Langzeitsicherheit mit dem Nachweis der Tragfähigkeit und dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu führen ist. Diese Aussage gilt sowohl für das grundsätzliche Konzept der Nachweisführung wie auch für die einzelnen Nachweiskriterien und die qualitative Ausformung der Nachweiskriterien mit Grenzwerten und Sicherheitsmargen. Vor diesem Hintergrund werden an die Darstellung der Nachweiskriterien folgende Anforderungen gestellt:

- 1) schlüssige, nachvollziehbare und vollständige Dokumentation,
- 2) hinreichender Beleg der zahlenmäßigen Größe der gewählten Grenzwerte,
- 3) Möglichkeit einer Beurteilung der projektbezogenen Gefährdungen durch die Nachweise,

- 4) Berücksichtigung aller im Sachzusammenhang möglichen Gefährdungen durch eine in der Summe abdeckende Anzahl der Nachweise.

Ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass im vorliegenden Prüfbericht keine Bewertung der den mitgeteilten Kennwerten zugrunde liegenden Versuchstechniken und Versuchsauswertungen erfolgt.

Gegenstand des vorliegenden Prüfberichtes ist es zu beurteilen,

- ob die für verschiedene stratigraphische Einheiten festgelegten mechanischen Eigenschaften durch eine hinreichend erscheinende Anzahl von Einzelversuchen belegt sind,
- ob die statistische Streubreite des jeweiligen Stichprobenumfanges gesicherte Aussagen erlauben,
- inwieweit die auf der Basis von Laborversuchen und von in-situ-Messungen gewonnenen Ergebnisse sich durch Vergleich mit den numerischen Berechnungen bestätigen bzw.
- welcher Faktor beim Übertragen der Versuchsergebnisse auf die Verhältnisse vor Ort eventuell zu berücksichtigen ist und
- ob die Darstellungen des AS zum Materialverhalten von Gebirge und Verfüllmaterial in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dokumentiert sind und ob die Größenordnung der verwendeten Kennwerte grundsätzlich plausibel und hinreichend belegt erscheint.

15.3 Bewertung

Vor dem Hintergrund, dass der Antragsteller in den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ einige grundsätzliche Elemente der Sicherheitsbetrachtungen und –festlegungen der in Abschnitt 1.2 aufgeführten DIN-Normen und Eurocodes in sein Sicherheitskonzept integriert hat und der erwähnten Tatsache, dass keine allgemeinverbindlichen quantitativen Sicherheitskriterien für Endlagerbauwerke vorliegen, ist es nach Einschätzung der Prüfer prinzipiell zulässig und zielführend, auch die grundlegenden methodischen Ansätze zum Nachweis der Sicherheit von Tragwerken und ingenieurtechnischen Bauwerken allgemein für die konzeptionellen Sicherheitsbetrachtungen im Endlagerbau als Konzeptorientierung einzubeziehen.

Diese in der Prüfunterlage angeführten Normen legen die Rechengänge für die Berechnungen der Bemessungsgrößen fest und definieren in aller Regel die Grenzzustandsgleichung. Die DIN 1054 unterscheidet zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit, der in drei weitere Grenzzustände unterteilt ist und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Die Unterscheidung basiert im Wesentlichen auf der Vorgehensweise, wie die Bemessungswerte in der Grenzzustandsgleichung zu bestimmen sind. Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind Zustände, bei deren Überschreitung die festgelegten Bedingungen für die Gebrauchstauglichkeit eines Tragwerkes oder eines Bauteils nicht mehr erfüllt sind.

Das Versagen bzw. die verschiedenen Versagensarten definieren sich aus diesen Grenzzuständen. Das übergeordnet definierte Ziel für die Schachtverschlüsse besteht darin, dass der Volumenstrom der eindringenden Flüssigkeiten oder der Volumenstrom der aus dem Grubengebäude auspressenden Flüssigkeiten den Wert von $2 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht überschreitet. Dieses Ziel kann mit dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit belegt werden. Das Überschreiten des Grenzzustandes der Tragfähigkeit geht in der Regel mit dem Versagen der Gebrauchstauglichkeit einher. So ist bei einem Versagen der Standsicherheit zunächst der Grenzzustand der Tragsicherheit überschritten, was aber auch ein Eindringen oder Auspressen von Flüssigkeit in oder aus dem Grubengebäude zur Folge hat.

Bei dem Teilsicherheitskonzept bzw. beim probabilistischen Ansatz, der Anwendung in den Eurocodes findet und teilweise schon in nationales Recht und somit in die neueren DIN-Normen eingearbeitet wurde, werden die Sicherheitsbeiwerte dort angesetzt, wo die Unsicherheiten zu erwarten sind. Der Nachweis ist dann erbracht, wenn die in die Grenzzustandsgleichung eingesetzten Bemessungswiderstände immer größer oder gleich den Bemessungseinwirkungen sind. Die Bemessungsgrößen werden aus den tatsächlich gewonnenen, aber vorsichtig abgeschätzten charakteristischen Werten abgeleitet und zwar bei Widerständen durch eine Verminderung und bei den Einwirkungen durch eine Erhöhung mit einem definierten Sicherheitsfaktor, dem Teilsicherheitsbeiwert.

Als charakteristischer Wert wird der Zahlenwert einer Einwirkung oder eines Widerstandes bezeichnet, von dem angenommen wird, dass er mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer des Bauwerkes und der entsprechenden Bemessungssituation nicht überschritten oder unterschritten wird.

Durch die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten können auch die Unsicherheiten der einzelnen Größen gewichtet werden. Die in der DIN 1054 angegebenen Teilsicherheitsbei-

werte sind für die Beanspruchungen und die Widerstände gesondert festgelegt und zwar in Abhängigkeit von dem betrachteten Grenzzustand und dem jeweiligen Lastfall.

Die Widerstände werden durch die Festigkeitseigenschaften des lastabtragenden Materials realisiert, die im Bereich der Geomechanik z. B. durch die Scherparameter Reibung und Kohäsion charakterisiert werden.

Da sich in der Geotechnik die Einwirkungen und Widerstände nicht immer klar voneinander trennen lassen, sondern die Lasten je nach Lastfall sowohl als Widerstand wie auch als Einwirkung wirken können, ist für die Lastfallbestimmung ein sorgfältiges und nachvollziehbares Vorgehen bei der Belegung mit Sicherheitsbeiwerten erforderlich. Auf der Einwirkungsseite wird in den Eurocodes darüber hinaus zwischen ständigen und veränderlichen Einwirkungen unterschieden, die bei den meisten Nachweisen mit unterschiedlichen Teilsicherheitsbeiwerten belegt werden.

Eine wesentliche Aufgabe der Nachweisführung beim vorliegenden Projekt besteht darin, die tatsächlich vorhandenen komplexen Verhältnisse des Zusammenwirkens mehrerer unterschiedlicher Prozesse so abzubilden, dass die charakteristischen Größen sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite zutreffend festgelegt werden.

Der Bestimmung der charakteristischen Werte kommt somit eine große Bedeutung zu. Gerade im Endlagerbetrieb ist eine gesicherte Basis für eine seriöse statistische Auswertung zur Festlegung der Gesteinskennwerte nicht gegeben, da das Gebirge in großer Tiefe nur nadelstichartig durch Bohrungen und Sondierungen erkundet werden kann. So muss sorgfältig beurteilt werden, wie groß der Sicherheitsabstand zwischen dem festzulegenden charakteristischen Wert und dem rechnerischen Mittelwert aus den durch Untersuchungen gewonnenen Größen gewählt wird.

Bei der probabilistischen Sicherheitstheorie wird der Wert des Widerstandes dann als charakteristisch angesehen und findet Eingang in die Berechnung, wenn nur eine 5%ige Wahrscheinlichkeit dafür besteht, dass noch ungünstigere Werte während der Lebensdauer eines Bauwerkes auftreten können.

Nach EC 0 muss der charakteristische Wert nicht auf statistischer Grundlage ermittelt werden. Da, wie bereits erwähnt, bei geotechnischen Aufgabenstellungen häufig nur eine sehr begrenzte Anzahl von Einzelwerten vorliegt, können auch sehr vorsichtig eingeschätzte Mittelwerte oder Erfahrungswerte Anwendung finden.

Da die Festlegung der charakteristischen Werte einen großen Einfluss auf die Versagenswahrscheinlichkeit hat, ist es nur schwer möglich, die Versagenswahrscheinlichkeit als eine definierte Sicherheitszahl anzugeben, da die darauf aufbauenden Normen unter definierten Konventionen lediglich zeigen, welcher rechnerische Sicherheitsabstand sich zum Grenzzustand einstellt.

Dennoch wird im konstruktiven Ingenieurbau, wo die Festlegung der charakteristischen Werte aufgrund einer größeren Datenbasis erfolgen kann, eine Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f = 10^{-6}$ angestrebt. Diese Versagenswahrscheinlichkeit stellt das Sicherheitsmaß dar, aus dem sich die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte definiert.

Um diese Versagenswahrscheinlichkeit auch bei Einwirkungsüberlagerungen zu erreichen, werden in den meisten Eurocodes so genannte Kombinationsbeiwerte $\gamma_i < 1,0$ angesetzt, die bei gleichzeitiger Berücksichtigung von ständigen und mehreren veränderlichen Lasten diese koppeln und somit der Wahrscheinlichkeit, dass nicht alle Einwirkungen in voller Höhe gleichzeitig wirken, Rechnung tragen. So werden die Produkte aus charakteristischen Werten mit den Teilsicherheitsbeiwerten bei gleichzeitiger Wirkung zwar addiert, aber durch die jeweiligen Kombinationsbeiwerte entsprechend abgemindert.

DIN 1054 verwendet dagegen keine Kombinationsbeiwerte, sondern nimmt in Abhängigkeit von der Häufigkeit und Dauer einer Einwirkungskombination eine Einstufung in einen von drei Lastfällen vor, für die dann unterschiedlich große Teilsicherheitsbeiwerte verwendet werden.

So beschreibt der erste Lastfall die ständige Bemessungssituation, für die die größten Teilsicherheitsbeiwerte angesetzt werden. Der Lastfall 2 für die vorübergehende Bemessungssituation hat entsprechend niedrigere Teilsicherheitsbeiwerte, die dann im Lastfall 3, der außergewöhnlichen Bemessungssituation, noch weiter verringert werden.

Bei den Lastfällen sind untereinander verträgliche Lastanordnungen, Verformungen und Imperfektionen mit vorgegebenen veränderlichen und ständigen Einwirkungen für den Nachweis gleichzeitig zu berücksichtigen.

Nach Abs. 2.1 EC 7 kann der geotechnische Entwurf wie folgt ausgeführt werden:

- auf der Grundlage von Berechnungen,
- nach Vorschriften (und allgemein gültigen Erfahrungen bzw. Erfahrungswerten),
- mit Modellversuchen oder Belastungsversuchen als Ergänzung bzw. Bestätigung der Annahmen für die Nachweise,
- mit Hilfe der Beobachtungsmethode.

Nach Abs. 2.4.1 EC 7 sind u. a. folgende Einwirkungen bei einem geotechnischen Entwurf zu beachten:

- Dynamische Einwirkungen sowie Bewegungen und Beschleunigungen aus Erdbeben, Erschütterungen oder Explosionen

Nach Abs. 2.4.3 EC 7 sollen Boden- und Felskennwerte für Entwurfsberechnungen aus Ergebnissen von Versuchen hergeleitet werden und zwar entweder direkt oder durch Korrelation, theoretisch oder empirisch oder aus anderen relevanten Daten.

Bei den älteren Normenreihen, ohne Einbezug der Eurocodes, wurde überwiegend das globale Sicherheitskonzept angewendet, bei dem die maximal mobilisierbaren charakteristischen Widerstände R_K den vorhandenen charakteristischen Beanspruchungen E_K gegenübergestellt wurden.

Die charakteristischen Werte werden dabei ohne Beaufschlagung mit einem Sicherheitsfaktor verwendet. Die Sicherheit wurde damit erreicht, dass Mindestwerte >1 für das Verhältnis aus Widerständen und Einwirkungen gefordert wurden.

Dabei blieb allerdings die sehr unterschiedliche Varianz der beteiligten Größen unberücksichtigt.

Zusammenfassend bleibt vor dem Hintergrund einer in den Bewertungskriterien genannten schlüssigen, nachvollziehbaren und vollständigen Dokumentation festzuhalten, dass der AS die Herkunft der charakteristischen Werte darzulegen hat und für jeden Wert eine sorgfältige Beurteilung vorzunehmen hat, wie groß der Sicherheitsabstand zwischen diesen festzulegenden charakteristischen Werten und dem rechnerischen Mittelwert aus den gewonnenen Größen gewählt wurde.

In den Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ werden die angesetzten charakteristischen Werte zumeist aus den vorangegangenen Versuchen übernommen, ohne den Sicherheitsabstand zwischen diesen charakteristischen Werten und den eventuell vorhandenen rechnerischen Mittelwerten aus den gewonnenen Größen darzulegen. Wenn der jeweilige Stichprobenumfang keine gesicherten Aussagen bezüglich der Auftretenswahrscheinlichkeit zulässt, indem beispielsweise bei einer Stichprobenverteilungsfunktion ein bestimmter Fraktilenwert angesetzt wird, müssen entweder weitere Stichproben gefordert oder es muss eine geeignete Methodik gefunden werden, um auch in einem solchen Fall vorsichtig abgeschätzte charakteristische Werte ableiten zu können. Darüber hinaus lässt sich nicht erkennen, ob die angesetzten Werte aus Versuchen auf statistischer Grundlage oder aufgrund von allgemein gültigen Erfahrungen definiert wurden. Die Verwendung der in den Eurocodes gebräuchlichen Bezeichnung Nennwert, die

ein Wert trägt, der nicht auf statistischer Grundlage ausgewiesen ist, sondern z.B. aufgrund von Erfahrungen oder physikalischen Bedingungen, wäre hier hilfreich.

Forderung F25:

Die Herleitung der charakteristischen Werte muss schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein. Ungeachtet der nicht bekannten Streubreite ist die Festlegung der charakteristischen Werte auf Grundlage von teilweise nur einem durchgeführten in-situ-Versuch der Aufgabenstellung nicht angemessen. Die Größenordnung der gewählten charakteristischen Werte ist durch weitere Versuche zu belegen.

Als weiteren Mangel erachten die Prüfer die Tatsache, dass in den Prüfunterlagen keine Darstellung der Nachweise und Grenzwerte im Zusammenhang mit einer geschlossenen Sicherheitstheorie erfolgt. Die Verwendung unterschiedlicher Termini aus den angeführten Normen wie z. B. Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, Teilsicherheitsbeiwert, ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen und weitere lassen eine Nachweisführung auf einer derartigen Grundlage vermuten. Bei diesen Nachweisen werden die Bemessungswerte bzw. Bemessungssituationen mit Teilsicherheitsfaktoren belegt, die der Sicherheitsanforderung hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit und somit der Eintrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Einwirkungssituationen Rechnung tragen. Die Festlegung der Größe der Sicherheitsfaktoren muss dann vor diesem Hintergrund gesehen und nachvollziehbar begründet werden.

Diesen Sachverhalt lässt die Prüfunterlage des AS hinsichtlich der Größe der Teilsicherheitsbeiwerte nicht erkennen. Es bleibt den Prüfern unklar, auf welcher Grundlage die Größe der Teilsicherheitsbeiwerte gewählt wurde. Darüber hinaus ist in diesem Zusammenhang zu bemängeln, dass die Darstellung dieser Größen in der Sensitivitätsanalyse unzureichend ist und sich das methodische Vorgehen sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse nicht erkennen lassen.

Forderung F26:

Die Festlegungen der Teilsicherheitsbeiwerte müssen schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein und auf der Grundlage eines geschlossenen Sicherheitskonzeptes definiert werden.

Auch wenn der AS zu der Ansicht gelangt, dass bei Untertagebauwerken durch die Vielfältigkeit der Einflüsse auf die Standsicherheit der im allgemeinen Ingenieurbau übliche Sicherheitsbegriff sowie der dazugehörige Standsicherheitsnachweis auf Untertagebauwerke nicht ohne weiteres anwendbar ist, so ist es dennoch Aufgabe des AS, einen schlüssigen, nachvollziehbaren und vollständigen Sicherheitsnachweis mit Nachweiskriterien vorzulegen, indem die Versagenswahrscheinlichkeit quantitativ beurteilt wird.

Das Nachweiskonzept muss erkennen lassen, ob eine Anlehnung an die Nachweisführung hinsichtlich des globalen Sicherheitskonzeptes oder des probabilistischen Ansatzes gewählt wurde. Die Einwirkungen sind in beiden Fällen herauszuarbeiten und in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen zu differenzieren.

Hinsichtlich der Unterteilung der Einwirkungen in ständige, veränderliche sowie außergewöhnliche Einwirkungen folgt der AS der DIN V ENV 1991-1. Die nachfolgende Aufführung von möglichen Gefährdungen/Einwirkungen lässt allerdings eine Einteilung in diese drei Gruppen vermissen, so dass sich den Prüfern der Grund für die Darstellung der Unterteilungsbezeichnungen nicht erschließt. In den Eurocodes wird die Einteilung der Einwirkungen in diese unterschiedlichen Kategorien vorgenommen, damit in Abhängigkeit der maßgebenden Einwirkungskombination die Beanspruchung in dem betrachteten Querschnitt definiert werden kann. Dabei wird jeder charakteristische Wert der Einwirkungen in Abhängigkeit der Einwirkungsart (ständige, veränderliche oder außergewöhnliche) und der betrachteten Bemessungssituation mit zugeordnetem Teilsicherheitsbeiwerten bzw. Kombinationsbeiwerten belegt. Diese Teilsicherheitsbeiwerte bestimmen sich hinsichtlich ihrer zahlenmäßigen Größe aufgrund der Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses im Nachweiszeitraum. Somit bleibt festzuhalten, dass vom AS zwar die Termini der Nachweisführungen nach den Eurocodes Verwendung finden, die Nachweisführungen aber nicht geschlossen und konsequent in deren Methodik geführt werden. Die Termini aus den Sicherheitsnachweisen, wie sie in den Eurocodes verwendet werden, sollten nach Ansicht der Prüfer nur Anwendung finden, wenn sie in einem vergleichbaren Zusammenhang wie in den Eurocodes verwendet werden, um hier keine sicherheitstechnische Nachweisführung im Einklang der Eurocodes und deren etablierten Bemessungsgleichungen vorzutäuschen, obwohl diese nicht konsequent in dieser Methodik geführt wird.

Forderung F27:

Es ist ein geschlossenes Sicherheitskonzept zu erarbeiten. Die Bedeutung von Termini, die aus bestehenden Eurocodes übernommen werden, ist im Sachkontext des erarbeiteten Konzeptes zu definieren.

Als gravierenden Mangel wird von den Prüfern erachtet, dass in der Gefährdungsbetrachtung die Einwirkungen *human intrusion* sowie die bezeichneten außergewöhnlichen Einwirkungen wie *dynamische Anregungen* (z.B. *Erdbeben*), *tektonische Einflüsse* und *klimatische Veränderungen* zwar aufgeführt wurden, hierfür aber keine Nachweisführungen zu verzeichnen sind. Die Einordnung als „akzeptierbares Restrisiko“ bzw. „zu übernehmendes Risiko“ wird einer Nachweisführung für den Nachweiszeitraum von 30.00 Jahren nicht gerecht.

Forderung F28:

Alle möglichen Einwirkungen sind im Sicherheitskonzept angemessen zu berücksichtigen. Risikoeinschätzungen müssen auf der Grundlage einer Nachweisführung begründet sein und schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dargelegt werden.

Es sind für alle potenziellen Einwirkungsarten Gefährdungsbilder zu entwickeln und Nachweise zu führen. Bei der Verwendung von numerischen Modellrechnungen sind die Eingangsgrößen im gleichen Maße plausibel und nachvollziehbar darzulegen und kritisch zu beurteilen sowie die Ergebnisse hinsichtlich der Versagenswahrscheinlichkeit zu beurteilen. Die Nachweise sind dann erbracht, wenn die der Nachweisführung zugrunde liegenden Kriterien eingehalten werden.

In der Prüfunterlage /U4/ wird ein quantitativer Nachweis der Standsicherheit in Form einer Bemessung bzw. eines rechnerischen Vergleichs zwischen Einwirkungs- und Widerstandsgrößen (Risikoabschätzung) gefordert. Nach den Eurocodes sind Nachweise dann und erst dann erbracht, wenn die in die Grenzzustandsgleichung eingesetzten Bemessungswiderstände immer größer oder gleich den Bemessungseinwirkungen bleiben. Die Ergebnisse in den geohydraulischen Berechnungen ergeben, dass das Bemessungsziel beim Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht erfüllt wird. Die Volumenströme der in das Grubengebäude eindringenden Flüssigkeiten sind sowohl beim Schacht Marie als auch beim Schacht Bartensleben

ben größer als $2 \text{ m}^3/\text{a}$. Die nachfolgende Risikoabschätzung erfolgt dann in der Weise, dass der Nachweis aufgrund der konservativen Annahmen und des konservativ gewählten Nachweismodells dennoch erbracht wurde. Diese Art der Nachweisführung lässt keine quantitative Aussage über das erreichte Sicherheitsniveau zu. Das zuvor definierte Sicherheitsniveau ist durch die Wahl der charakteristischen Größen und der Teilsicherheitsbeiwerte unter Berücksichtigung aller Randbedingungen zu erreichen. Der Nachweis ist dann erfüllt, wenn die Grenzzustandsgleichung erfüllt ist. Als Beleg für diese Forderung wird nachstehend eine für die sicherheitliche Nachweisführung relevante Ausführung aus einem Regelwerk zitiert:

/L10/: „Die in den Berechnungsmodellen durchgeführten (in der Regel numerischen) Untersuchungen müssen diejenigen Werte oder Zustandsgrößen liefern, die aufgrund des gewählten Sicherheitskonzeptes die Kriterien sind, mit denen Sicherheitsaussagen gemacht werden, z.B. Verformungen, Spannungen, Verformungsraten.“

Forderung F29:

Die im Sicherheitskonzept festgelegten Grenzzustandsgleichungen sind einzuhalten und eine quantitative Aussage über das erreichte Sicherheitsniveau ist zu treffen.

16 Bewertung der Aussagen zum Gebirgsaufbau und der Berücksichtigung der vorhandenen Schachtrandbedingungen und der Schachtgeometrien

16.1 Aussagen des Antragstellers

In der Unterlage /U2/ führt der Antragsteller aus, dass bei 281 m Teufe eine Nassstelle zu verzeichnen ist. *Auf Grund äußerst geringer Zutrittsmengen bei 281 m Teufe, kann diese Nassstelle vernachlässigt werden. Die oberhalb liegende 310-m-Sohle mit Anschluss an die Korkenzieherwendel besitzt keine direkte Verbindung zum übrigen Grubengebäude.* Die hydraulische Leitfähigkeit k_{eff} wird ab einer Teufe von 271 m mit $k_{\text{eff}} = 2,0 \cdot 10^{-14}$ m/s angesetzt.

Für den Schacht Marie ist der Unterlage /U4/ zu entnehmen, dass *die Angaben zur Ausbausituation (d.h. zur Schachtmauerung) des Bereichs von 522 m bis 389 m spärlich sind und zum Teil widersprüchlich. Fest steht, dass heute ab ca. 400 m eine Schachtmauerung nicht mehr vorhanden ist. Falls diese vorhanden war, so ist diese in den tieferen Teil des Schachtes verstürzt.* Auch wird der Laugenstand bei ca. 499 m u. GOK erwähnt. *Hieraus ergeben sich nach Unterlage /U4/ sowohl für die KPL, als auch für die zu führenden Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit / Tragfähigkeit (Langzeitstabilität und Machbarkeit) besondere Anforderungen. Neben der Möglichkeit einer Aufwältigung des Schachtes sind ggf. mögliche Alternativen aufzuzeigen und in die Planungen mit einzubeziehen. Nach der Aktennotiz von der Schachtbefahrung ERAM Morsleben am 30. Mai 01, die als Anlage 4 in der Unterlage /U1/ enthalten ist, wird die Laugenmenge auf ungefähr 20.000 bis 30.000 m³ abgeschätzt.*

Hinsichtlich der Korkenzieherwendel wird in Unterlage /U2/ gefordert, *die Zwischensohle und die angeschlossene Korkenzieherwendel vorzeitig (vor Beginn der eigentlichen Schachtverfüllung) mit geeigneten Materialien zu versetzen. Bei der Materialauswahl ist zu berücksichtigen, dass die ursprünglichen Eigenschaften des unverritzten Salinargebirges insbesondere in Hinblick auf die hydraulischen Kennwerte (hydraulische Leitfähigkeit) wiederhergestellt werden. Bei den weiteren Betrachtungen wird von der vollständigen Wiederherstellung der Steinsalzeigenschaften im Ausbruchsbereich der Korkenzieherwendel ausgegangen.*

Die in der Unterlage /U4/ dargestellte Zwischensohle bei ca. 385 m im Schacht Marie ist in den Zeichnungen zum Bauwerksentwurf der Unterlagen /U1/ und /U2/ bei 396 m u. GOK eingezeichnet. In den Bauwerksentwurf Schacht Marie ist darüber hinaus eine 352,53-m-Sohle eingezeichnet, die in der Anlage in /U4/ fehlt. Nach Unterlage /U1/ ist diese *die letzte bzw. höchstgelegene Zutrittsstelle aus dem Grubengebäude*. In dem Bauwerksentwurf Schacht Marie der Prüfunterlagen /U1/ und /U2/ liegt der asphaltundurchlässige Kern aus erdfeuchtem Ton zwischen 307,53 und 312,03 m u. GOK. In diesem Bereich befindet sich auch die 310-m-Sohle, die nach /U1/ *keine direkte Verbindung zum übrigen Grubengebäude besitzt*. Der Steinsalzbereich zwischen 276 und 292 m u. GOK ist im Bauwerksentwurf Schacht Marie der Unterlagen /U1/ und /U2/ nicht dargestellt.

16.2 Bewertungskriterien

Im Rahmen der Beurteilung der Aussagen des AS zum Gebirgsaufbau im Bereich der Schächte und den vorhandenen Schachtverhältnissen wird geprüft, inwieweit die Darstellungen in sich schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sowie widerspruchsfrei dokumentiert sind und bei den Nachweisführungen hinreichend berücksichtigt werden.

16.3 Bewertung

Die Verschlusskonstruktion des Schachtes Marie sieht vor, dass diese teilweise im Carnallitit ausgeführt werden soll. Schachtverschlüsse im Carnallitit sind nach derzeitiger Kenntnis der Prüfer noch nicht Stand der Technik.

Forderung F30:

Die spezifische Problematik des anstehenden Carnallitits muss herausgearbeitet werden und es sind die daraus resultierenden Konsequenzen für die Nachweisführung abzuleiten.

Der Einfluss der Korkenzieherwendel zwischen 289 und 310 m Teufe im Schacht Marie mit der vorgesehenen Verfüllung muss nach Ansicht der Prüfer detaillierter untersucht werden, insbesondere in Hinblick auf die Entfernung der Auflockerungszone und die geomechanischen Belastungen der Füllortverfüllung für die an der Korkenzieherwendel angeschlossene 310-m-Sohle sowie die sich einstellende hydrologische Situation auch unter Berücksichtigung der 8. Austrittsstelle bzw. Nassstelle unmittelbar oberhalb der Korkenzieherwendel bei 281 m Teufe.

Durch die unterschiedlichen Darstellungen hinsichtlich der Zwischensohle bei 385 m bzw. 396 m u. GOK und der 352,53-m-Sohle in den Plänen der Unterlagen /U1/ bzw. /U2/ und /U4/ ist zu klären, welcher Sachverhalt tatsächlich vorliegt. Der anstehende Steinsalzbereich zwischen 276 m und 292 m u. GOK ist in den Plänen der Unterlagen /U1/ und /U2/ darzustellen. Die nicht vollständige Darstellung in den Anlagen erfüllt nicht die Forderung nach einer eindeutigen Dokumentation.

Die Funktionstüchtigkeit des *Asphalt-undurchlässigen Kernes* in der Teufenlage zwischen 307,53 m und 312,03 m u. GOK wird von den Prüfern aufgrund der Störung der 310-m-Sohle angezweifelt.

Forderung F31:

Die Randbedingungen des Schachtes hinsichtlich des anstehenden Gesteins sowie die Schachtgeometrien sind vollständig darzulegen und in der Nachweisführung zu berücksichtigen, was auch eine detaillierte Betrachtung des Bereiches der Korkenzieherwendel beinhaltet.

Der in der Unterlage /U4/ aufgestellten Forderung nach der Erarbeitung von Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich des Mauerwerkabrisses im Schacht Marie bei ca. 400 m u. GOK und des Laugenstandes bei ca. 499 m u. GOK für die Konzeptplanung und Nachweisführung wurde nicht entsprochen, obwohl erst die Machbarkeit einer Aufwältigung oder anderer möglicher angemessener Alternativen die Grundlage für einen sicheren Schachtverschluss darstellt.

Forderung F32:

Die Problematik des Bereiches unterhalb von 400 m im Schacht Marie mit Mauerwerksabriss und Laugenstand für den Schachtverschluss ist bereits in der Konzeptplanung zu berücksichtigen. Es sind Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen und ihre Machbarkeit betriebs- sowie gerätetechnisch nachzuweisen.

17 Bewertung der Aussagen zu den kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 2 und DE 3

17.1 Aussagen des Antragstellers

Der Antragsteller errechnet in /U2/ eine erforderliche Länge des Dichtelementes von 0,42 m für das kombinierte Widerlager-Dichtelement DE 3 (zur Verhinderung des Auspressens von Lösungen aus dem Grubengebäude) unter der Annahme, dass *durch die absolute Dichtheit des Bitumens und durch die vollständige Abdichtung der Kontaktfuge zwischen dem Dichtelement und dem Gebirge als einzige für die Dimensionierung relevante Größe, der durch den aufgelockerten Gebirgsbereich strömende Volumenstrom verbleibt.*

Für das Eindringen von Deckgebirgszuflüssen beim Schacht Marie wird für die Dichtelementlänge von 47 m ein Volumenstrom von 0,02 m³/a angegeben und eine errechnete Sicherheit von 80. Zur Darstellung der weiteren Berechnungswerte wird die Tabelle aus der Prüfunterlage /U2/ nachfolgend abgebildet:

Bezeichnung	Dichtelementlänge [m]	Volumenstrom [m ³ /a]	Sicherheit
Marie Deckgebirgszuflüsse	47,0	0,02	80
Marie Lösungen aus Grubenbau	25,0	0,03	60
Bartensleben Deckgebirgszuflüsse	47,0	0,02	80
Bartensleben Lösungen aus Grubenbau	42,5	0,02	102

Bei der Betrachtung des Durchflusses durch das Gesamtsystem wird in der Nachweisführung ausgesagt, dass *sich Fluidvolumenströme in das Grubengebäude in der Größenordnung von 0,03 m³/a für den Schacht Marie und 0,02 m³/a für den Schacht Bartensleben ergeben.*

Für *Volumenströme aus dem Grubengebäude* ergeben sich Werte über die beiden kombinierten Widerlager-Dichtelemente in der Größenordnung von etwa 0,02 m³/a für beide Schächte.

Für den Volumenstrom in das Grubengebäude wurde die hydraulisch wirksame Dichtelementlänge als Summe der Längen beider kombinierter Widerlager-Dichtelemente gewählt bzw. diese Gesamtlänge um 30 m reduziert (maximale Verluste von 15 m an beiden Elementen).

In der Unterlage /U4/ wird ausgeführt, dass *besonders das im Schacht aufgeschlossene Kaliflöz zwischen 271 m bis 276 m u. GOK und zwischen 292 m bis 295 m u. GOK zu beachten ist. Hier ist die Konzeptplanung auf die örtlichen Gegebenheiten abzustimmen, es ist zu prüfen, ob die Anforderungen an das Dichtelement mit dem verbleibenden Bereich von 300 m bis*

355 m u. GOK erreicht werden können. Auf Grund der erhöhten Löslichkeit von Kalisalzen werden diese Bereiche als Dichtbereiche ausgeschlossen bzw. bleiben bei der Dimensionierung der Dichtelementgeometrie nach Unterlage /U1/ unberücksichtigt.

17.2 Bewertungskriterien

Kriterien für die Bewertung sind eine vollständige Dokumentation der Modellgeometrie der Widerlager-Dichtelemente, insbesondere der Längen sowie die schlüssige Darstellung der Berechnungsannahmen in den Plänen des Bauwerksentwurfs.

17.3 Bewertung

Die Prüfer erachten es als Mangel der im Übrigen schlüssigen Nachweisführung, dass hinsichtlich der Dimensionierung der Widerlager-Dichtelemente Widersprüche in den Randbedingungen existieren. Die Dimensionierung des Dichtelementes DE 2 beim Schacht Marie ist in den Plänen des Bauwerksentwurfs Schacht Marie mit 47,00 m bemaßt. Dieselbe Länge wurde für die Berechnung des Volumenstromes und die Angabe der Sicherheit nach der Tabelle angesetzt. Dabei wurden die beschriebene Reduzierung von 15 m aufgrund von Asphaltverlusten sowie die Nichtansetzung der Kaliflözbereiche nicht berücksichtigt. Auch sind mögliche Überlegungen zu einer erhöhten Wegsamkeit im Bereich der Korkenzieherwendel in die Nachweisführung nicht mit eingeflossen. Die Prüfer halten vor dem Grundsatz einer Verwendung von konservativen Ansätzen eine Nichtberücksichtigung des Bereiches der Korkenzieherwendel aufgrund von nicht auszuschließenden Wegsamkeiten auch nach einem Versatz dieses Bereiches für nicht angemessen. Somit kann als Dichtelementlänge für das kombinierte Widerlager-Dichtelement nur die nachfolgend berechnete Länge für den Schacht Marie in Ansatz gebracht werden:

Vorgesehener Bereich des Widerlager-Dichtelementes DE 2:

256,53 m bis 303,53 m u. GOK 47,00 m Länge,

davon unterhalb des Salzspiegels bei 268,80 m:

303,53 m bis 268,80 m u. GOK 34,73 m anzusetzende Länge, aber

abzüglich des in der Unterlage /U4/ angegebenen Kaliflözbereiches bei 271,00 m bis 276,00 m u. GOK sowie des Bereiches der Korkenzieherwendel bei 289,00 m bis 310,00 m u. GOK verbleiben als anzusetzende Dichtelementbereiche nur noch die Bereiche bei 268,80 m bis 271,00 m u. GOK und 276,00 m bis 289,00 m; daraus folgt eine reduzierte Dichtelementlänge von 15,20 m.

Selbst bei Nichtansatz des Bereiches der Korkenzieherwendel, aber mit Berücksichtigung der Kaliflözbbereiche verbleibt nur eine anzusetzende Dichtelementlänge von 24,53 m.

Der rechnerische Ansatz der Dichtelementlänge mit 47,00 m und der angegebene Volumenstrom von 0,02 m³/a sowie die Sicherheit von 80 sind somit nicht haltbar. Diese Diskrepanz ist in ähnlicher Weise auch für den Schacht Bartensleben festzustellen.

Forderung F33:

Es sind spezifische Nachweise für die möglicherweise auftretenden Dichtigkeitsprobleme im Bereich der Korkenzieherwendel zu führen und eine Darstellung der konstruktiven Durchbildung zu erbringen.

Darüber hinaus besteht in /U2/ ein Widerspruch zwischen den Tabellenwerten und den Angaben zur Beurteilung des Durchflusses durch das Gesamtsystem. Beim Schacht Marie wurden die Volumenströme der Deckgebirgszuflüsse und der Lösungen aus dem Grubengebäude in der textlichen Zusammenfassung des Durchflusses durch das Gesamtsystem im Vergleich zu den Tabellenwerten vertauscht.

Forderung F34:

Die Herleitung der Sicherheitsfaktoren und die Darstellung der Ergebnisse müssen schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein.

18 Schlussbetrachtungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen

Abschließend ausdrücklich darauf hinzuweisen ist, dass die im Prüfbericht dokumentierten Aussagen und Einschätzungen bisher ausschließlich auf einer verbal-argumentativen Bewertung der AS Unterlagen basieren. Die für eine abschließende Beurteilung für erforderlich erachteten eigenen rechnerischen Untersuchungen zum langfristigen Tragwerkverhalten und zur mechanisch / hydraulischen Integrität der Schächte bzw. der Schachtverschlussysteme erfolgten bisher nicht. Aussagen zur rechnerischen Richtigkeit der Angaben in den vorgelegten Unterlagen (z. B. Berechnungsergebnisse) können somit ebenso wenig wie eine Beurteilung von Vollständigkeit und Zweckmäßigkeit der berücksichtigten Lastfälle getroffen werden. Voraussetzung für eine diesbezügliche Stellungnahme ist eine nachhaltige rechnerische Aufarbeitung und Analyse der Schachtverschlussysteme mit den Elementen Prozessverständnis, physikalische Modellierung, numerische Simulation, Bewertung / Nachweisführung. Ob und inwieweit im Zuge dieser, von der Vorgehensweise des AS unabhängigen rechnerischen Untersuchung und darauf aufbauenden Bewertungen weitere Fragestellungen oder Defizite resultieren, bleibt dem Ergebnis einer solchen rechnerischen Prüfung vorbehalten. Als erste Empfehlung für das weitere Vorgehen bleibt vor diesem Hintergrund festzuhalten, die im Prüfauftrag mit Phase (b) bezeichneten Arbeiten zur rechnerischen Untersuchung des langfristigen Tragwerkverhaltens und zur mechanisch / hydraulischen Integrität der Schächte bzw. der Schachtverschlussysteme zu veranlassen. Eine über die Ausführungen im Prüfauftrag hinausgehende Begründung und Präzisierung der Notwendigkeit eigener rechnerischer Untersuchungen im Rahmen der Prüfung der AS Unterlagen erfolgte in einer gesonderten Stellungnahme. Auf eine wiederholende Darstellung der diesbezüglichen Ausführungen wird im vorliegenden Zwischenbericht verzichtet.

Diejenigen Bedenken, die auf der Grundlage der bestehenden Informationen die Durchführbarkeit des Konzeptes in Frage stellen könnten, sind durch die Hinweise, Empfehlungen und insbesondere Forderungen der Prüfer benannt. Hierzu sind entsprechende Ergänzungen seitens des AS zu erarbeiten. In der Konsequenz wird als zweite Empfehlung für das weitere Vorgehen vorgeschlagen, dem AS die Ergebnisse der vorliegenden Prüfung zur Kenntnis zu geben und im Rahmen eines gemeinsamen Fachgespräches die gegebenen Hinweise, Empfehlungen und Forderungen zu erörtern. Ein Schwerpunkt des Fachgespräches sollte nach Einschätzung der Prüfer der Frage nachgehen, warum der AS in seiner Konzeptplanung auf die

Integration eines langfristig wirksam werdendes Dichteelementes „verdichteter Salzgrus“ im Bereich des anstehenden Salzgesteins verzichtet hat. Diesbezüglich zu prüfen ist nach Einschätzung der Prüfer, ob ein dem geogenen Milieu entsprechendes Langzeitabdichtungselement in die Schachtverschlussysteme integriert werden kann oder muss, da bei ausschließlicher Verwendung artfremder Materialien im Bereich des Steinsalzgebirges eine geogene und damit geochemisch mit Sicherheit langfristig über geologische Zeiträume beständige Barriere eher nicht erreicht wird. Demgegenüber eröffnet die Teilverfüllung der Schächte mit verdichtetem Salzgrus in Verbindung mit der auflaufenden Konvergenz grundsätzlich die Möglichkeit, die bestehende Perforation der geologischen Barriere langfristig weitgehend adäquat zu reparieren.

Mit Bezug auf eine mögliche zeitliche Parallelisierung noch erforderlicher Untersuchungen wird auf die letztmalig im Rahmen der „Komplexbewertung“ ausführlich dokumentierte Notwendigkeit der Quantifizierung des Kriechvermögens der anstehenden Salzgesteine bei geringer deviatorischer Belastung hingewiesen (→ *Kriechverhalten des konvergenzbedingt auf die Verschlussysteme auflaufenden Salzgebirges*). Weiterhin zu nennen sind unter dem Gesichtspunkt erforderlicher Parameterermittlungen z.B. gegenständliche Untersuchungen bzw. Nachweise zur Gewährleistung der Dichtigkeit der Kontaktfuge zwischen Verschlussbauwerk und Gebirge. Als dritte Empfehlung für das weitere Vorgehen wird daher vorgeschlagen, insbesondere die Langzeitversuche zum Kriechvermögen unter geringer deviatorischer Beanspruchung zu veranlassen.

19 Anlagen

19.1 Rechtsgrundlagen zum Schachtverschluss im Zuge der Stilllegung von Anlagen für radioaktive Abfälle

Internationale Rechtsaspekte

Euratom-Richtlinien

Die Euratom-Richtlinien, die von der Europäischen Kommission auf Grundlage des Euratom-Vertrages erarbeitet werden, regeln den Umgang mit radioaktiven Stoffen und bilden die Grundlage für die nationalen gesetzlichen Regelungen der einzelnen Mitgliedsländer. Die Europäische Atomgemeinschaft (EURATOM) ist Bestandteil der Europäischen Gemeinschaften (EG), die einen supranationalen Kernbereich der Europäischen Union (EU) bilden. Bei der Entwicklung der Euratom-Richtlinien finden die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) Berücksichtigung sowie im geringeren Maße die Arbeiten der United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), der Internationalen Arbeitsorganisation der UN (ILO), der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA). Die IAEA ist eine eigenständige wissenschaftlich-technische Organisation, die mit der UNO durch ein Sonderabkommen verbunden ist. Sie hat zum Ziel, die friedliche Nutzung der Kernenergie und die Anwendung radioaktiver Stoffe sowie die internationale Zusammenarbeit in diesem Zusammenhang zu fördern und andererseits sicherzustellen, dass diese Technologien nicht für militärische Zwecke genutzt werden.

Nationale Regelwerke und Richtlinien

Bundesgesetze

Als relevante Bundesgesetze für die vorliegenden Prüfunterlagen sind das Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz (AtG)) und das Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung (Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)) heranzuziehen.

Das Atomgesetz für die friedliche Verwendung der Kernenergie in Deutschland regelt neben den rechtlichen Aspekten für die Errichtung und den Betrieb von kerntechnischen Anlagen auch deren Stilllegung.

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren -Atomgesetz (AtG)-

AtG §1 Zweckbestimmung des Gesetzes

Zweck dieses Gesetzes ist,

- 2. Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen zu schützen und durch Kernenergie oder ionisierende Strahlen verursachte Schäden auszugleichen.*

AtG §7 Genehmigung von Anlagen

- (3) Die Stilllegung einer Anlage nach Absatz 1 Satz 1 sowie der sichere Einschluss der endgültig stillgelegten Anlage oder der Abbau der Anlage oder von Anlagenteilen bedürfen der Genehmigung. Absatz 2 gilt sinngemäß. Eine Genehmigung nach Satz 1 ist nicht erforderlich, soweit die geplanten Maßnahmen bereits Gegenstand einer Genehmigung nach Absatz 1 oder Anordnung nach § 19 Abs. 3 gewesen sind.*

AtG §9a Verwertung radioaktiver Reststoffe und Beseitigung radioaktiver Abfälle

- (3) (...), der Bund hat Anlagen zur Sicherstellung und zur Endlagerung radioaktiver Abfälle einzurichten.*

AtG §12 Ermächtigungsvorschriften (Schutzmaßnahmen)

- (1) Durch Rechtsverordnung kann zur Erreichung der in §1 bezeichneten Zwecke bestimmt werden,*
 - 2. welche Vorsorge dafür zu treffen ist, dass bestimmte Strahlendosen und bestimmte Konzentrationen radioaktiver Stoffe in Luft und Wasser nicht überschritten werden,*
 - 9. welchen Anforderungen die schadlose Verwertung und die geordnete Beseitigung radioaktiver Reststoffe sowie ausgebauter und abgebauter radioaktiver Anlagenteile zu genügen hat, (...)*
 - 10. auf welche Weise der Schutz von radioaktiven Stoffen, (...) von Anlagen nach Anlagen des Bundes nach §9a Abs. 3 gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter zu gewährleisten ist,*

Gesetz zum vorsorgenden Schutz der Bevölkerung gegen Strahlenbelastung -Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)-

StrVG §1 Zweckbestimmung

Zum Schutz der Bevölkerung ist

- 2. die Strahlenexposition der Menschen und die radioaktive Kontamination der Umwelt im Falle von Ereignissen mit möglichen nicht unerheblichen radiologischen Auswirkungen unter Beachtung des Standes der Wissenschaft und unter Berücksichtigung aller Umstände durch angemessene Maßnahmen so gering wie möglich zu halten.*

Verordnungen

Zwei für den vorliegenden Prüfkomples zu berücksichtigende Gesetzesverordnungen stellt innerhalb des Atomrechts die Strahlenschutzverordnung (StrSchV) und im Bereich Abfallrecht die Deponieverordnung (DepV) dar.

Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen -Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)-

Teil 1 Allgemeine Vorschriften

StrlSchV 2001 §1 Zweckbestimmung

Zweck dieser Verordnung ist es, zum Schutz des Menschen und der Umwelt vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung Grundsätze und Anforderungen für Vorsorge- und Schutzmaßnahmen zu regeln, die bei der Nutzung und Einwirkung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung zivilisatorischen und natürlichen Ursprungs Anwendung finden.

Teil 2 Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierender Strahlung aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten

Kapitel 1 Strahlenschutzgrundsätze, Grundpflichten und allgemeine Grenzwerte

StrlSchV 2001 § 6 Vermeidung unnötiger Strahlenexposition und Dosisreduzierung

(1) Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede unnötige Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt zu vermeiden.

(2) Wer eine Tätigkeit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 plant oder ausübt, ist verpflichtet, jede Strahlenexposition oder Kontamination von Mensch und Umwelt unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.

Kapitel 3 Anforderungen bei der Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung

Abschnitt 4 Schutz von Bevölkerung und Umwelt bei Strahlenexpositionen aus Tätigkeit

StrlSchV 2001 §47 Begrenzung der Ableitung radioaktiver Stoffe

(1) Für die Planung, die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung, den sicheren Einschluss und den Abbau von Anlagen oder Einrichtungen gelten folgende Grenzwerte der durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser aus diesen Anlagen oder Einrichtungen jeweils bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung im Kalenderjahr:

- 1. Effektive Dosis - 0,3 Millisievert*
- 2. Organdosis für Keimdrüsen, Gebärmutter, Knochenmark (rot) - 0,3 Millisievert*
- 3. Organdosis für Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, Schilddrüse, andere Organe oder Gewebe gemäß Anlage VI Teil C Nr. 2 Fußnote 1, soweit nicht unter Nr. 2 genannt - 0,9 Millisievert*
- 4. Organdosis für Knochenoberfläche, Haut - 1,8 Millisievert.*

Es ist dafür zu sorgen, dass radioaktive Stoffe nicht unkontrolliert in die Umwelt abgeleitet werden.

(3) Für den Betrieb, die Stilllegung, den sicheren Einschluss und den Abbau von Anlagen oder Einrichtungen legt die zuständige Behörde die zulässigen Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Luft und Wasser durch Begrenzung der Aktivitätskonzentrationen oder Aktivitätsmengen fest. Der Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte des Absatzes 1 gilt als erbracht, wenn diese Begrenzungen nicht überschritten werden.

Verordnung über Deponien und Langzeitlager -Deponieverordnung (DepV)-

DepV §1 Anwendungsbereich

(1) Diese Verordnung gilt für

- 1. die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachsorge von Deponien.*

DepV §2 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung bedeuten die Begriffe

10. Deponie der Klasse IV (Deponieklasse (IV, DK IV): Untertagedeponie, in der die Abfälle

a) in einem Bergwerk mit eigenständigem Ablagerungsbereich, der getrennt von einer Mineralgewinnung angelegt oder vorgesehen ist, oder

b) in einer Kaverne

vollständig im Gestein eingeschlossen, gelagert werden.

DepV Anhang 2 Hinweise zur Durchführung des Langzeitsicherheitsnachweises im Rahmen der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung für Bergwerke im Salzgestein (zu §3 Abs. 5)

< Fundstelle des Originaltextes: BGBl. I 2002, 2823 – 2826 >

1 Allgemeines

1.1 Ziel

Durch einen Langzeitsicherheitsnachweis ist zu belegen, dass die Errichtung (ggf.), der Betrieb und die Nachsorgephase einer Deponie der Klasse IV zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre führen können. Die TA Abfall definiert als Schutzziel in Nummer 10 für Untertagedeponien, die im Salzgestein errichtet und betrieben werden, den vollständigen und dauerhaften Abschluss der Abfälle von der Biosphäre.

1.2 Einlagerungsmedium

Zur Erfüllung der Zielsetzung nach Nummer 1.1 übernimmt das Salzgestein als Wirtsgestein gleichzeitig die alleinige Funktion des Barrieregesteins. Der Langzeitsicherheitsnachweis ist daher grundsätzlich für das Salzgestein als Barrieregestein zu führen. Weitere geologische Barrieren können gegebenenfalls eine zusätzliche Sicherheit bieten, sie sind aber nicht zwingend erforderlich.

1.3 Dauerhaft sichere Ablagerung

Bei der Entsorgung von Abfällen in einer Deponie der Klasse IV im Salzgestein ist der vollständige und dauerhafte Abschluss der Abfälle von der Biosphäre das erklärte Ziel. Danach richten sich die Anforderungen an die Abfälle, die bergbaulichen Hohlräume, die geotechnischen Barrieren (Abschlussbauwerke) und alle anderen technischen Einrichtungen und betrieblichen Maßnahmen. Salz als Wirtsgestein in Verbindung mit funktionstüchtigen Deckschichten hat hier die Bedingungen zu erfüllen, gas- und flüssigkeitsdicht zu sein, durch sein Konvergenzverhalten die Abfälle allmählich zu umschließen und am Ende des Verformungsprozesses kraftschlüssig einzuschließen.

1.5 Verletzung des Barrieregesteins durch bergbauliche Tätigkeiten

Das Barrieregestein wird bei Bergwerken durch die erforderlichen Schächte verletzt. Daher sind diese Schächte nach Stilllegung der Untertagedeponie durch Abschlussbauwerke nach dem jeweiligen Stand der Technik so zu verschließen, dass die Einhaltung der Schutzziele gewährleistet ist.

2 Langzeitsicherheit

2.1 Umfang und Anforderungen

Bei der Beseitigung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen in Deponien der Klasse IV im Salzgestein ist der Langzeitsicherheitsnachweis für das Gesamtsystem "Abfall/Untertagebauwerk/Gebirgskörper" unter Berücksichtigung planmäßiger und außerplanmäßiger (hypothetischer) Ereignisabläufe zu führen, wobei den standortspezifischen Gegebenheiten Rechnung zu tragen ist.

Der Langzeitsicherheitsnachweis als übergreifender und zusammenfassender Einzelnachweis im Rahmen der nach Nummer 10.3 der TA Abfall geforderten standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen der beiden anderen Einzelnachweise,

- dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis und*
- dem Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase.*

Insbesondere dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis kommt zur Beurteilung der langfristigen Wirksamkeit und Integrität der Barriere Salz eine entscheidende Bedeutung zu.

Ist der vollständige Einschluss durch den geotechnischen Standsicherheitsnachweis belegt, kann auf Modellrechnungen zu nicht planbaren Ereignisabläufen verzichtet werden, sofern plausibel dargelegt wird, ob und wie sich nicht planbare Ereignisse auswirken werden. Hierzu wird in der Regel eine verbalargumentative Betrachtung als ausreichend angesehen, die jedoch standortbezogen zu verifizieren ist.

2.4 Geotechnischer Standsicherheitsnachweis

Der Nachweis der Standsicherheit sowohl in der Betriebs- als auch in der Nachsorgephase ist durch ein gebirgsmechanisches Gutachten zu erbringen. Dabei sind insbesondere folgende Aufgabenstellungen abzuarbeiten:

1. Einordnung und Bewertung der geologischen/tektonischen und hydrogeologischen/hydrologischen Kenntnisse hinsichtlich ihrer Relevanz für die angetroffene und zu prognostizierende gebirgsmechanische Situation im Bereich des Grubengebäudes.

5. Erstellung eines Sicherheitsplanes zum Nachweis der Standsicherheit sowie zur gebirgsmechanischen Bewertung der Langzeitsicherheit (Integrität/Intaktheit) der geologischen Barrieren; dabei sind die möglichen Risiken zu beschreiben und die zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten zu definieren, die den rechnerischen Nachweisen zugrunde zu legen sind.

6. Festlegung der zu berücksichtigenden möglichen Einwirkungsfaktoren geologischer/tektonischer Art (u. a. Primärspannungszustand, Temperaturfeld, Erdbeben) oder anthropogener Art (z. B. durch Hohlraumauffahrungen, Abfalleinbringung).

11. Erarbeitung der aus gebirgsmechanischer Sicht erforderlichen Maßnahmen während des Einlagerungsbetriebes und zum Betriebsabschluss

- betriebsbegleitende geotechnische Messungen*
- gebirgsmechanische Grundsätze für die Verwahrung und für Abschlussbauwerke.*

Die Empfehlungen des Arbeitskreises "Salzmechanik" der Fachsektion Felsmechanik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. zur Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge - Ablagerung in Bergwerken - können bei den geotechnischen Untersuchungen herangezogen werden (GDA-Empfehlung "Geotechnik der Deponie und Altlasten", 3. Auflage 1997, Verlag Ernst u. Sohn Berlin).

2.5 Nachweis der Langzeitsicherheit

Aufbauend auf den vorlaufenden Untersuchungsergebnissen sind in dem übergreifenden und zusammenfassenden Langzeitsicherheitsnachweis für das Gesamtsystem "Abfall/Untertagebauwerk/Gebirgskörper" auf der Grundlage des Mehrbarrierensystems folgende Einzelsysteme zu betrachten und zu bewerten:

2.5.1 Bewertung der natürlichen Barrieren

2.5.2 Bewertung von technischen Eingriffen auf die natürlichen Barrieren

2.5.3 Bewertung der technischen Barrieren

Allgemeine Verwaltungsvorschriften

Allgemeine Verwaltungsvorschriften gewährleisten eine einheitliche Rechtsanwendung der Behörden und verpflichten diese zur Anwendung. Verwaltungsvorschriften sind dabei auf das Innenrecht einer Verwaltung beschränkt und stellen Regelungen innerhalb einer Verwaltungsorganisation von einer übergeordneten Verwaltungsinstanz an nachgeordnete Verwaltungsbehörden dar. Verwaltungsvorschriften werden auch als Technische Anleitung (TA), Anordnung, Dienstanweisung, Erlass, Richtlinie oder Verfügung bezeichnet.

Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1

Kapitel 2 Allgemeine Vorschriften

2.1 Stand der Technik

Stand der Technik im Sinne dieser Technischen Anleitung ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme für eine umweltverträgliche Abfallentsorgung gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare geeignete Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.

Kapitel 10 Besondere Anforderungen an Untertagedeponien im Salzgestein

10.1 Grundsatz

Bei der Ablagerung von Abfällen in untertägige Anlagen im Salzgestein sollen die Abfälle dauerhaft von der Biosphäre ferngehalten werden. Die untertägige Ablagerung hat so zu erfolgen, dass keine Nachsorge erforderlich ist.

10.3 Standortbezogene Sicherheitsbeurteilung

Der Nachweis der Eignung des Gebirges für die Anlage einer Untertagedeponie muss durch eine standortbezogene Sicherheitsbeurteilung erbracht werden. Diese Sicherheitsbeurteilung hat das Gesamtsystem „Abfall-Untertagebauwerk-Gebirgskörper“ zu berücksichtigen.

Grundlage der standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung ist die Analyse der zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten bei Errichtung, beim Betrieb und in der Nachbetriebsphase. Hieraus sind die erforderlichen Kontroll- und Schutzmaßnahmen abzuleiten.

Zur standortbezogenen Sicherheitsbeurteilung sind folgende Einzelnachweise zu führen:

- a) Geotechnischer Standsicherheitsnachweis,*
- b) Sicherheitsnachweis für die Betriebsphase,*
- c) Langzeitsicherheitsnachweis.*

10.3.3 Langzeitsicherheitsnachweis

Durch einen Langzeitsicherheitsnachweis ist zu belegen, dass die Errichtung, der Betrieb und die Nachbetriebsphase einer Untertagedeponie zu keiner Beeinträchtigung der Biosphäre führen können.

Dazu sind Barrieren der Untertagedeponie (z.B. Abfallbeschaffenheit, Versatz und Verschlüsse von Schächten und Bohrungen), das Verhalten des Salzgesteins, des Nebengesteins und des Deckgebirges sowie Ereignisabläufe im Gesamtsystem durch geeignete Modelle auf der Basis konkreter Standortdaten oder ausreichender konservativer Annahmen nachzubilden und zu bewerten. Die geochemisch-hydrogeologischen Gegebenheiten wie Grundwasserbewegungen und Lösungspotentiale (Barrierewirksamkeit) sind zu betrachten.

10.5.5.5 Kontrolle der Höhenlage der Verfüllsäule

Nach Beendigung der Abschlussmaßnahmen bei Bergwerken ist die Höhenlage der nach Nr. 10.6.1 herzustellenden Verfüllsäule jährlich, nach 20 Jahren in Abständen von 5 Jahren, zu kontrollieren.

10.6 Abschlussmaßnahmen

Nach Stilllegung einer Untertagedeponie sind Abschlussmaßnahmen durchzuführen, die gewährleisten, dass die abgelagerten Abfälle dem Biozyklus zuverlässig entzogen werden.

Vor der Stilllegung der Untertagedeponie sind die Abschlussmaßnahmen nach dem Stand der Technik zu planen. Die Planung ist der zuständigen Behörde zur abfall- und bergrechtlichen Zulassung vorzulegen.

Neben vorbereitenden Maßnahmen zur Wiedernutzbarmachung des Geländes, wie dem Rückbau betrieblicher Anlagenteile, ist als wichtigster Teil der Abschlussmaßnahmen die Verfüllung der Schächte und sonstiger Zugänge einer Untertagedeponie nach den Anforderungen der Nrn. 10.6.1 und 10.6.2 auszuführen.

10.6.1 Bergwerke im Salzgestein (UTD-Typ 1)

Der technische Aufbau der Verfüllsäule ist unter Berücksichtigung des geologischen Profils und des Ausbaus im Einzelnen festzulegen.

Die Verfüllung muss folgende Anforderungen erfüllen:

- a) Sie muss auf der gesamten Länge des Schachtes oder sonstiger Zugänge erfolgen.*
- b) Sie muss so erfolgen, dass ein nachträgliches Setzen der Verfüllsäule so gering wie möglich gehalten wird.*
- c) Sie muss eine Verbindung zwischen Ablagerungsbereich und Biosphäre auf Dauer verhindern.*

Im Bereich der Geländeoberfläche sind der Schacht und sonstige Zugänge durch eine massive Platte aus geeignetem Material (z.B. Beton) zu verschließen. Der Verschluss ist so auszuführen, dass die unterliegende Verfüllsäule nach Nr. 10.5.5.5 kontrolliert werden kann.

Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten

Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld – Verfügung vom 14.07.1989–10.3 1/89–B II f 5.2–I –

3.4 Sicherung der Füllsäule gegen Auslaufen des Füllgutes

Vor Beginn der Verfüllungsarbeiten sind Maßnahmen zu treffen, die ein Auslaufen des Füllgutes in die mit dem Schacht durchschlägigen Grubenbaue und dadurch eintretende Sackungen und Brückenbildungen in der Füllsäule während und nach Beendigung der Schachtverfüllung verhindern. Es ist davon auszugehen, dass die Füllsäule unter Wasser geraten wird.

Das Auslaufen des Füllgutes in die mit dem Schacht durchschlägigen Grubenbaue kann

- *durch die Verwendung eines besonderen Füllgutes zur Erzielung einer standsicheren Füllsäule,*
- *durch Einbringen von Abdämmungen in den Schachtzugängen oder*
- *durch die Anwendung anderer technisch gleichwertiger Maßnahmen verhindert werden.*

3.4.1 Sicherung durch Verwendung von standfestem Füllgut

3.4.1.1 Geschichtete Verfüllsäulen

Nach den bisherigen Erfahrungen kann eine standsichere Füllsäule erzielt werden, wenn als Füllgut Hartgesteinschotter ausreichender Korngröße nach Nr. 5.3 verwendet wird. Dieser zeigt den aus Bunkern bekannten Siloeffekt, der auch unabhängig von geomechanischen und hydrologischen Veränderungen erhalten bleibt. Dieser Siloeffekt besteht in einem Gleichgewichtszustand zwischen der Schwerkraft und der durch die Reibung bedingten, nach oben gerichteten Kraft.

5.3 Anforderungen an Schotter bei geschichteten Füllsäulen

Schotter, der zur Abtragung von Lasten in geschichteten Füllsäulen eingesetzt werden soll, muss aus Hartgestein bestehen und den Technischen Lieferbedingungen für Gleisschotter der Deutschen Bundesbahn (TL 91861) entsprechen.

7.1 Abdecken

Die Abdeckung mit ihrem Auflager ist für eine Verkehrslast von mindestens 32 kN/m² zu berechnen, sofern nicht höhere Lasten zu erwarten sind.

Die Auflagerbreite der Abdeckplatte muss mindestens gleich ihrer Dicke gewählt werden.

7.2 Öffnungen in der Abdeckplatte

Die Abdeckplatte ist zur Beobachtung des Füllgutes im Schacht sowie zur Durchführung von Nachverfüllungen mit einer ausreichend großen (etwa 600 mm Durchmesser oder Seitenlänge) Öffnung zu versehen. Diese Öffnung soll mittig angeordnet werden. Sie ist durch ein fest eingebautes Gitter mit höchstens 150 mm Stababstand zu sichern und durch einen Stahlbetondeckel o. ä. zu verschließen. Das Gitter soll möglichst dicht unter diesem Verschluss liegen. Die Oberkante dieses Verschlusses soll über das umgebende Gelände nicht hinausragen.

Empfehlungen

Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken

4.5 *Rechnerische Sicherheitsnachweise*

Für die jeweilige Grenzsituation sind zugehörige Nachweismodelle zu entwickeln, die die folgenden Teile umfassen:

- *Darlegung der zu untersuchenden Gefährdungssituation*
- *Einwirkung, wie Primärzustand des Gebirges, Temperatur, Hohlraumauffahren, Auswirkungen des Abfalls, Erdbeben usw.*
- *Strukturelles Berechnungsmodell, das die Gebirgsformationen, die Hohlräume und deren Veränderungen möglichst wirklichkeitsnah erfassen muss*
- *Stoffmodelle für Salz-, Neben- und Deckgebirge, ggf. für Abfall und Versatz*
- *Berechnung der sicherheitsrelevanten Zustandsgrößen wie Verformungen, Spannungen, ggf. Durchlässigkeiten für Flüssigkeiten (und Gase)*
- *Überprüfung und Beurteilung der Berechnungsergebnisse*
- *Sicherheitskonzept, das Aussagen trifft, ab welchen Grenzwert Gefährdungen bestehen. Vgl. Abschnitt 4.2*

5.3.5 *Stilllegung*

Im Rahmen der Stilllegungsarbeiten einer Untertagedeponie sind die Schächte nach dem neuesten Stand der Technik zu verfüllen. Die Schachtverfüllung soll neben dem Schutz der Oberfläche gewährleisten, dass in der Nachbetriebsphase einerseits keine Flüssigkeiten aus dem wasserführenden Deckgebirge in die Grubenbaue fließen können und andererseits in die Grubenbaue gelangte und durch Abfälle kontaminierte Flüssigkeiten (Laugenzuflüsse) nicht über den Schacht in die Biosphäre gelangen können. Beim Einbau von Schachtpfropfen ist zu berücksichtigen, dass diese auch dem größten zu erwartenden Gebirgsdruck ohne Fraceinwirkung auf das umstehende Gebirge standhalten müssen.

Bei der Ausführung der Schachtverfüllung ist die Verfüllsäule gegen Auslaufen in die an den Schacht angrenzenden Grubenbaue dauerhaft zu sichern.

Oberhalb der obersten Schachtabgänge, aber genügend weit unter dem Fundament des Wasserabschlusses des Schachtausbaues gegen das Gebirge, ist eine wasserstauende Schicht aus Material mit möglichst geringer Durchlässigkeit nach erdbautechnischen

Grundsätzen einzubauen. Zuvor ist die Auflockerungszone des Gebirges im Einbaubereich auszuräumen oder durch Injektionen zu dichten.

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk

(Rdschr. D. BMI v. 20.4.1983 – RS – AGK 3 – 515 790/2 –

1. Einführung

Zur Endlagerung können sie (die radioaktiven Abfälle) in eine geeignete geologische Formation eingebracht werden. (...) Unter diesen Voraussetzungen werden nach Beendigung der Einlagerung und Verfüllung und nach Verschluss des Endlagerbergwerkes grundsätzlich keine weiteren Maßnahmen notwendig.

Weil die Ingenieurkonzepte für das Endlagerbergwerk und die Anforderungen an die Einlagerungsprodukte von der betrachteten nicht normierbaren geologischen Gesamtsituation geprägt werden, können keine allgemeingültigen quantitativen Sicherheitskriterien festgelegt werden. Die erforderliche Sicherheit eines Endlagerbergwerkes in einer geologischen Formation muss daher durch eine standortspezifische Sicherheitsanalyse nachgewiesen werden, die dem Gesamtsystem geologische Verhältnisse, Endlagerbergwerk und Abfallprodukte/-gebinde Rechnung trägt.

Die im Folgenden zusammengestellten Kriterien beziehen sich auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle, die als „wartungsfreie, zeitlich unbefristete und sichere Beseitigung dieser Abfälle“ definiert ist. Bei der Endlagerung in großtechnischem Maßstab kommen Verfahren und Methoden zum Einsatz, bei denen eine Rückholbarkeit der Abfälle nicht erforderlich ist.

2. Schutzziele

Die für den Betrieb eines Endlagerbergwerkes geltenden Schutzziele werden durch das Atomgesetz und die Strahlenschutzverordnung vorgegeben. Darüber hinaus sind alle einschlägigen Vorschriften zu beachten.

Nach Beendigung der Betriebsphase muss das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stilllegung dürfen keine Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen, die die Werte des §45 der Strahlenschutzverordnung (StrSchV) überschreiten.

3. Maßnahmen zur Verwirklichung der Schutzziele

Zur Erreichung der Schutzziele sind auf Basis geologischer Gegebenheiten technische Maßnahmen und Vorgehensweisen sorgfältig aufeinander abzustimmen.

3.2 Mehrbarrierenkonzept

Durch einzelne oder die Summe dieser Barrieren muss sichergestellt werden, dass nach menschlichem Ermessen keine unzulässige Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Biosphäre erfolgt. Je nach unterstelltem Störfall trägt die einzelne Barriere ihren Anteil dazu bei, die Ausbreitung radioaktiver Stoffe ausreichend zu verhindern bzw. zu verzögern.

3.3 Anerkannte Regeln der Technik

Bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers sind die anerkannten Regeln der Technik anzuwenden. Der Weiterentwicklung von Wissenschaft und Technik ist dabei ausreichend Spielraum zu ergeben.

4.6 Hydrogeologische Verhältnisse

Nach der Stilllegung des Endlagerbergwerkes dürfen in der Endlagerformation vorhandene oder möglicherweise zutretende Wässer oder Salzlösungen nicht bzw. nicht in unzulässigem Umfang in die Biosphäre gelangen.

5.2 Sicherheitsanalysen

Störfallszenarien sind im Einzelnen zu begründen und in ihren Randbedingungen festzulegen. Auf der Basis dieser Störfallbetrachtungen sind standortspezifische Sicherheitsanalysen nach naturwissenschaftlichen Methoden durchzuführen. Für die Sicherheitsanalysen werden Teilsysteme und der Ereignisabläufe im Gesamtsystem durch geeignete Modelle auf der Basis ausreichend konservativer Annahmen nachgebildet.

Mögliche Schwachstellen sind auf diese Weise zu identifizieren. Bei der Analyse des Gesamtsystems können eventuelle Schwachstellen in einem Teilsystem durch entsprechende vorbeugende Maßnahmen oder verbesserte Ausgestaltung anderer Teilsysteme ausgeglichen werden.

Solche Sicherheitsanalysen sind sowohl für die Betriebs- und die Stilllegungsphase als auch für die Zeit nach der Stilllegung eines Endlagerbergwerkes erforderlich. Dabei sind

gegebenenfalls mögliche Transportvorgänge von Radionukliden in die Biosphäre nach der Einlagerungsphase zu berücksichtigen.

9. Stilllegung

Die Stilllegung des gesamten Endlagerbergwerkes ist mit der Verfüllung der Schächte abzuschließen.

Verfüllung und Abschluss der Hohlräume sind mit geeigneten Materialien und Techniken durchzuführen und haben zum Ziel, durch Hohlraumreduzierung zur Stabilitätserhöhung beizutragen, den Zutritt von Transportmedien, wie z.B. Wasser, zu den radioaktiven Abfällen zu erschweren bzw. zu verhindern und eine eventuell mögliche Radionuklidfreisetzung auf ein zulässiges Maß zu minimieren.

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk -Vorschlag der GRS-

Die hier vorgeschlagenen Sicherheitskriterien enthalten Sicherheitsprinzipien und Schutzziele für die Endlagerung sowie die grundlegenden Anforderungen für den Nachweis der Betriebs- und Langzeitsicherheit von Endlagern.

Sie umfassen jedoch nicht die Anforderungen für die Standortauswahl, da bereits der BMU-Arbeitskreis „Auswahlverfahren Endlagerstandorte“ ein Verfahren zur Standortauswahl sowie entsprechende Anforderungen und Kriterien vorgeschlagen hat. Ebenso unberücksichtigt bleiben nicht radiologische Anforderungen und Anforderungen zum Schutz gegen Einwirkung Dritter. Auch die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle, wie in Art. 2 des „Übereinkommens über nukleare Entsorgung“ vereinbart, wird nicht einbezogen.

Sicherheitsprinzipien der Endlagerung

Die fundamentalen Grundsätze der Endlagerung sind:

- *der langzeitige Schutz von Mensch und Umwelt vor potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle und*
- *die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.*

Sie werden durch Sicherheitsprinzipien für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen konkretisiert:

- *Die aus der Endlagerung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt soll niedriger sein als die natürliche Strahlung.*
- *Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt dürfen auch in Zukunft das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen.*
- *Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Stoffe in Deutschland dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig.*
- *Für die Betriebs-, Stilllegungs- und Nachbetriebsphase des Endlagers ist die Sicherheit nachzuweisen. Bestandteil dieser Nachweise sind standortspezifische Sicherheitsanalysen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.*
- *Standortauswahl und Endlagerauslegung müssen die langzeitige Sicherheit gewährleisten. Der Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase des Endlagers muss über einen Zeitraum von einer Million Jahre geführt werden können.*
- *Die Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase darf sich nicht auf aktive Maßnahmen nach dem Verschluss abstützen.*

Radiologische Schutzziele

Die deutschen Gesetze und Verordnungen enthalten keine radiologischen Schutzziele für die Nachbetriebsphase von Endlagern. Diese werden in den Sicherheitskriterien definiert: Das Risiko, dass ein Individuum einen schweren gesundheitlichen Schaden aus der Strahlenexposition (Individualdosis) erleidet, ist zu begrenzen. Die Individualdosis bezieht sich auf den Menschen mit seinen heute geltenden Verhaltensweisen.

Der Antragsteller hat die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems in einer Langzeitprognose zu beschreiben.

Langzeitsicherheitsanalysen

Grundlage der Langzeitsicherheitsanalyse sind die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems. Außerdem sind Entwicklungen, die durch Aktivitäten des Menschen ausgelöst werden können, zu berücksichtigen. Hierbei bestehende Szenarien-, Daten- und Modellunsicherheiten sind im Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen. Zur Beurteilung der Datenunsicherheiten werden Unsicherheitsanalysen gefordert, zu deren Bewertung ein Konfidenzintervall für ein Perzentil der Dosis festgelegt wird.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit muss über den Zeitraum geführt werden, für den wissenschaftlich fundierte Prognosen zur Standortentwicklung möglich sind. Basierend auf den Anforderungen der Standortauswahl wird ein Zeitraum von einer Million Jahren zugrunde gelegt.

Nachweis der Einhaltung der Schutzziele

Die zu betrachtenden potenziellen Entwicklungen des Standortes werden unterteilt in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien. Szenarien mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten brauchen nicht weiter berücksichtigt zu werden. Das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager soll mittels repräsentativer Szenarien betrachtet werden.

Den Szenariengruppen werden Schutzziele zugeordnet. Die in der Konsequenzenanalyse für wahrscheinliche Szenarien ermittelte Strahlenexposition für eine Einzelperson wird an dem Richtwert der effektiven Dosis von 0,1 mSv im Kalenderjahr gemessen. Das Schutzziel ist so gewählt, dass die zugelassene Strahlenexposition innerhalb der mittleren Schwankungsbreite der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland (2,4 mSv pro Kalenderjahr) liegt. Auch wird der Grenzwert für die Bevölkerung von 1 mSv pro Kalenderjahr effektive Dosis der EU-Grundnormen deutlich unterschritten.

Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien

2 Sachstand

Aufgrund der Präzisierung und Weiterentwicklung der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Synopsis), Entwurf, Stand 12.03.02 ergeben sich unter anderem folgende Änderungen bzw. Weiterentwicklungen zu den deutschen Sicherheitskriterien von 1983:

- Die radiologischen Schutzziele werden differenzierter definiert. Kriterium für das radiologische Schutzziel in der Betriebsphase und für die wahrscheinlichen Szenarien in der Nachbetriebsphase ist die effektive Dosis einer Person (Individualdosis). Für die Nachbetriebsphase wird für die weniger wahrscheinlichen Szenarien der Risikobegriff eingeführt.*

- Dem Vorschlag der ICRP 81 /ICRP 98a/ zur angemessenen Berücksichtigung der Optimierung des Strahlenschutzes für die Nachbetriebsphase (constrained optimisation) wird gefolgt.

- Anforderungen an den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase werden dargestellt.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit soll durch eine Unsicherheitsanalyse ergänzt werden.

- Beim Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase wird beim Bewertungsmaßstab zwischen der natürlichen Entwicklung des Endlagers und menschlichen Eingriffen in der Nachbetriebsphase unterschieden.

- Der unbeabsichtigte Eingriff des Menschen in das Endlager soll in Form realistischer Referenzszenarien berücksichtigt werden.

3 Bewertungsmaßstäbe

Radiologische Anforderungen für die Nachbetriebsphase des Endlagers sind in der Strahlenschutzverordnung explizit nicht enthalten. Als Maßstab für den Strahlenschutz in der Nachbetriebsphase werden zum Einen die Prinzipien der IAEA /IAEA 95/ zur Bewertung herangezogen. Zum Anderen hat die ICRP bereits 1985 /ICRP 85/ und erneut 1998 /ICRP 98a/ Empfehlungen für die Strahlenschutzanforderungen für die Endlagerung fester radioaktiver Abfälle ausgesprochen.

Bezüglich der Nachweisführung der Sicherheit des Endlagers in der Nachbetriebsphase sind die Entwicklungen der Sicherheitsphilosophie in den letzten zehn Jahren zu beachten, wie sie sich in den Ergebnissen der IAEA-Konferenz von 1998 /IAEA 98/ und in dem Bericht der OECD/NEA von 1999 /OECD 99/ widerspiegeln. Wesentliche Punkte sind in diesem Zusammenhang:

□ Die Betrachtung langer Zeiträume über 10.000 Jahre kann nicht ignoriert werden. Allerdings ist ein abgestuftes Vorgehen bei der Sicherheitsbetrachtung des Endlagers für die ferne Zukunft und der zugehörigen Nachweisführung angemessen. Dieses widerspricht nicht dem ethischen Prinzip, wonach die gleiche Vorsorge für alle Generationen zu treffen ist.

□ Für die Sicherheitsbetrachtung des Endlagers in ferner Zukunft können in Ergänzung zu Dosis- oder Risikokriterien andere Sicherheitsindikatoren für den Sicherheitsnachweis bedeutsam werden.

Im Übrigen sind weitere technische Regeln, z. B. des KTA und des DIN zu beachten, soweit sie auf die Endlagerung anwendbar und übertragbar sind.

4 Bewertung

Die radiologischen Schutzziele für die Nachbetriebsphase des Endlagers werden in der Diskussionsgrundlage für wahrscheinliche Szenarien der langzeitigen Entwicklung des Endlagers als Grenzwert der jährlichen Individualdosis und für weniger wahrscheinliche Szenarien als Risikokriterium definiert. In einer Szenarienanalyse sollen alle in den Grenzen der praktischen Vernunft denkbaren natürlichen Entwicklungen betrachtet und in die Klasse der wahrscheinlichen, der weniger wahrscheinlichen und der auf Grund ihrer sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit nicht weiter zu betrachtenden Szenarien eingeordnet werden.

Die als Kriterien für den Nachweis der Sicherheit in der Nachbetriebsphase vorgeschlagene Festlegung einer Dosis- bzw. Risikobegrenzung entspricht der internationalen Vorgehensweise und ist Stand von Wissenschaft und Technik.

In der Diskussionsgrundlage wird gefordert, bei Planung und Auslegung eines Endlagers künftig die Möglichkeit von unbeabsichtigten menschlichen Aktivitäten, die die Funktion des Endlagers beeinträchtigen könnten, zu berücksichtigen. Dabei wird zwischen dem direkten Eindringen in das Endlager und der Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Barrieren des Endlagers unterschieden.

Zur Behandlung des direkten Eindringens in das Endlager in Langzeitsicherheitsanalysen sollen nur ausgewählte Szenarien (Referenzszenarien) herangezogen werden. Gefordert werden die transparente und nachvollziehbare Dokumentation der Szenarienanalyse, die Begründung ihrer Einzelschritte und die nachvollziehbare Darstellung der wesentlichen Entscheidungen.

Menschliche Aktivitäten, die zur Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der Barrieren des Endlagers führen, sollten anhand derselben Kriterien beurteilt werden, die für die natürliche Entwicklung des Endlagers gelten.

19.2 Darlegung des wissenschaftlich-technischen Kenntnisstandes und des daraus ableitbaren Standes von Wissenschaft und Technik

Als weitere Grundlagen sind in Ergänzung zu den genannten Regelwerken, Vorschriften und Empfehlungen nachfolgende Unterlagen gegenständlich für die Ermittlung des aktuellen Kenntnisstandes heranzuziehen.

Schmidt, M.W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; BIRTHLER, H.; Boese, B.; Storck, R.; Sitz, P.; Krauß, A.; Eulenberger, K.-H., Schleining, J.-P.; Duddeck H.; Ahrens, H.; Menzel, W.; Salzer K.; Minkley W.; Busche H.; Lindloff, U.; Gierenz, S.: „Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken, Vorprojekt“, Forschungsbergwerk Asse; GSF- Bericht 32/95, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, 1995

BAND 1: Text und Abbildungen

1. Darstellung des gegenwärtigen Standes von Wissenschaft und Technik für Schachtverschlüsse in Salzbergwerken

Die ausgewiesene Varianz der geologischen, geomechanischen und hydrogeologischen Verhältnisse und der Erhaltungszustände der Schachtröhren auf die Verschlussaufgabe macht im Einzelfall auf das Objekt bezogene detaillierte Ausführungsforderungen notwendig, die aus einem Vorschriftenwerk mit allgemeine Forderungen hervorgehen müssen

2. Anforderungen an Schachtverschlüsse

Gefährdungsbild 2: Versagen der Dichtwirkung

Beanspruchungen

- 1. Aus dem Ausgangszustand des unverritzten Gebirges*
 - *geologische Verhältnisse im Gebirge*
 - *primärer Gebirgsspannungszustand*
 - *ursprüngliche Gebirgstemperatur*
 - *tektonische Störzonen, Inhomogenität im Gebirge*
 - *geomechanische Parameter des Gebirges*

2. *Aus der Überzugswirkung des Schachtsicherheitspfeilers und ggf. des Grubengebäudes*
 - *Spannungsänderung*
 - *Verformungs- und Deformationsverhalten*
3. *Aus dem Hohlraumausbruch*
 - *Spannungsänderungen*
 - *Auflockerungen*
 - *Temperaturänderungen*
4. *Durch Fluide und Gase*
 - *Zutritt von Wässern und Salzlösungen aus offenen Systemen*
 - *Zutritt von Wässern und Salzlösungen aus geschlossenen Systemen*
 - *Austritt von natürlichem und künstlichem Gas*
5. *Aus Seismizität*
 - *Erdbeben*
 - *Bergbauinduzierte Seismizität*
6. *Aus dem Schachtverschluss*
 - *Die Beanspruchungen aus dem Schachtverschluss selbst (z.B. Hydratationswärme bei Beton) können erst bei Vorliegen eines Konzeptes für ein Abschlussbauwerk zusammengestellt werden*

Anforderungen

1. *Tragfähigkeit des Gesamtsystems*
2. *Wartungsfreiheit*
3. *Gewährleistung der technischen Dichtheit*
4. *Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit auf der Basis des Standes von Wissenschaft und Technik, daher:*
 - *Beschränkung auf wenige Materialien, die deutliche (z.B. optische) Unterschiede aufweisen und sich leicht verarbeiten lassen*
 - *Verwendung einer geometrischen Form, die einfach gefertigt werden kann, wobei die Fertigungstoleranzen realistisch eingeschätzt werden müssen*

- *Beschränkung auf wenige Komponenten innerhalb des Schachtverschlusses*
 - *Verwendung eines einfach konstruierten Anschlusses (Fuge) des Abdichtungsbauwerkes an das Wirtsgestein mit möglicher Tolerierung von Gleitbewegungen in axialer Richtung des Schachtverschlusses*
 - *Möglichst wenig zusätzlicher Ausbruch im Wirtsgestein für den Schachtverschluss und schonende Ausbruchverfahren*
 - *Beachtung hoher Qualitätssicherungsmaßnahmen*
5. *Langzeitsicherheit*
6. *Qualitätskontrolle*

3. Konzepte für die technischen Lösungen

Konzipiertes Verschlussystem

Verfüllsäule I (obere Verfüllsäule)

Die Länge wird durch die Lage der Hauptdichtung bestimmt. Im Salinar ist die Einbaulage vorwiegend im Schachtröhrenabschnitt mit wasserdichtem Ausbau. Im Bereich des wasserdichten Ausbaus ist ein vertikales Hinterströmen nicht auszuschließen. Daher sind Untersuchungen über den Zustand des Kontaktbereiches zwischen Ausbau und Gebirge vorzunehmen.

Aufgaben:

Stützung der Schachtstöße bzw. des Ausbaus und Sicherung des Schachtkopfes einschließlich des Schachtdeckels.

Materialien:

Setzungsarme klassierte Hartgesteinschotter in Stabilisierungsabschnitten.

Einbringen des Materials über Versturz.

Verfüllsäule II (untere Verfüllsäule)

Diese liegt zwischen Füllortverfüllung und Unterkante der Hauptdichtung im Salinar. Die Hauptdichtung soll unterhalb des wasserdichten Ausbaus angeordnet werden. Der Schachtstoß kann dabei durch Mauerung, Beton oder Ankerung gesichert sein.

Aufgaben:

- *sichere Positionierung der Hauptdichtung*
- *Stützfunktion für die Schachtstöße*

- *Lastabtrag des auf die Hauptdichtung lastenden Fluiddrucks, des Gewichts der Verfüllsäule I und ihrer Eigenmasse in die Schachtstöße*
- *Auflastwirkung auf die evtl. über dem Füllort zusätzlich eingebrachte Dichtung*

Der Abtrag der Lasten ohne Setzungen bedingt einen direkten Kontakt zum Gebirge bzw. einen noch intakten Schachtausbau sowie eine Verfüllung mit setzungsarmen Material.

Empfohlene Materialien:

- *klassierte Hartgesteinschotter (Basalt) im Kornbereich 25 bis 93 mm*
- *mechanisch verfestigter Steinsalzgrus in noch nicht genau definierter Kornabstufung (nur unter der Voraussetzung, dass nur gesättigte Lösungen den Bereich erreichen können). Salzgrus darf aber nur im Salinar bei entferntem Mauerwerk oder Beton eingebaut werden, d.h. Salzgrus sollte vorzugsweise dort verwendet werden, wo der Schachtausbau bereits entfernt bzw. gar nicht vorhanden ist. Für Salzgrus sind noch keine Technologien zur mechanischen Verdichtung auf der Schachtsohle bekannt.*

Füllortbereich

Mit der Füllortverfüllung muss die Stabilität der gesamten Verfüllsäule erreicht werden, damit diese nicht in die Schachtabgänge ausfließen kann.

Anforderungen:

- *Verfüllung mit Hartgesteinschotter*
- *Ausbau von störenden Einbauten im Füllort und einer völligen Beräumung des Schachtsumpfes*
- *Schotterböschung muss 40° bis 45° in den Schachtabgängen betragen*
- *Zur Gewährung einer sicheren Abböschung der Schottermassen im Füllort sind die Firstbereiche am Schachtübergang abzuschrägen*
- *Unsicherheiten bei der Ausbildung des Böschungswinkels der Schottersäule können durch Verfüllungen der Grubenbaue im Umkreis von ca. 25 m mit Schottermassen kompensiert werden*

Dichtungen

Anforderungen:

- *Dichtung ist im standfesten und dichten Steinsalz anzuordnen, damit die Schachtstoßkonvergenz für die Dichtwirkung genutzt werden kann. Mit dem „Fließen“ des Salzes im Langzeitmaßstab und der Verformungsbegrenzung durch das Dichtmaterial soll erreicht werden, dass die Durchlässigkeit des aufgelockerten Gebirgsbereichs zeitab-*

hängig reduziert und eine gute Dichtung des Kontaktbereiches erfolgt (radiale Kontaktdruckspannung)

- *Dichtung muss gebirgsverbunden sein, d.h. der Schachtausbau muss in diesem Bereich entfernt und ein dichter, nicht entfestigter Gebirgsstoß hergestellt werden. Dies ermöglicht einen echten Dichtungs-Gebirgs-Verbund infolge der Konvergenz des Salzes und des Quellvermögens des Dichtmaterials*
- *Bei „Gründung“ der Dichtung im standfesten und dichten Steinsalz ist ein Einbau der Dichtung bis in den unlöslichen und kompakten Salzton oder Buntsandstein mit entsprechender „Sicherheitsreserve“ zum Ausgleich von Setzungen vorzusehen*
- *In den Hauptdichtungen müssen auch die wasserabweisenden und viskosen Eigenschaften des Asphalts zur flexiblen Abdichtung gegen von oben zusitzende Lösungen genutzt werden*
- *Oberhalb der Dichtung im Schachtstoßbereich ist eine Überschussmenge als Puffer ohne direkten Gebirgskontakt vorzusehen, die ein Defizit an Dichtmaterial durch Setzungen und Verlustes an Dichtmaterial infolge Abströmen in Klüfte und Spalten ausschließt*
- *Bei der Abdichtung gg. aufsteigende Lösungen müssen die Dichtungen durch auflastige Verfüllsäulen statisch belastet oder durch entsprechend ausgelegte Widerlager positioniert werden*

Ein trockener Einbau von Tonmineralien in Dichtungen ermöglicht die effektive Ausnutzung des sich bei Feuchtigkeitsaufnahme entwickelnden Quelldrucks.

Gegenwärtig gibt es noch zahlreiche Defizite bzgl. der Kenntnisse über die Langzeitdichtwirkung, das Verhalten gg. Salzlösungen, die günstigste Einbautechnik und die Kontaktflächendichtung zum Gebirge der verschiedensten Dichtstoffe.

Daher wird empfohlen:

- *Kombinationsdichtungen für die speziellen Aufgabenstellungen und abgestimmt auf die jeweiligen Einbaubedingungen, z.B. feucht eingebautes Tonmineralgemisch, trocken eingebautes Tonmineralgemisch und Bitumen bzw. Asphalt. Bei konstanten Gebirgseigenschaften im Dichtungsbereich ist es sinnvoll, die Dichtungslänge nicht größer als das 7- bis 11-fache des Schachtdurchmessers auszuführen (nach GREER und DAEMEN).*

Anforderung:

- *Dimensionierung der Dichtung muss entsprechend dem zu erwartenden hydrostatischen Druck im Dichthorizont und im Extremfall als geschlossenes System gegenüber*

aufsteigenden Lösungen entsprechend dem petrostatischen Druck minus dem Druck der anstehenden Flüssigkeitssäule erfolgen.

Schachtkopfbereich

Der Schachtkopfbereich wird kurz vor den Verfüllarbeiten oder spätestens vor dem endgültigen Schachtverschluss saniert. Die Schachtabdeckung nach DIN 1229 muss notwendige Kontrollen des Füllstandes und evtl. der Verfüllsäule I mit der Nachverfüllung gewährleisten. Daher soll diese mit einer verschließbaren Öffnung ($d \geq 0,5 \text{ m}$) und für eine Verkehrslast von 20 kN/m^2 dimensioniert sein. Auch sind die Schachtverwahrungsrichtlinien der betreffenden Oberbergämter zu beachten. Eine geforderte Wartungsfreiheit ist allerdings für den Fall UTD im Salzbergbau in Frage zu stellen.

4. Numerischer Nachweis durch geotechnische und hydrogeologische Rechenmodelle

Strukturmodell

- *Steinsalz: FEM-Berechnungsausschnitt um so größer, je stärker der Krieeffekt und je länger die Zeit ist*
- *Dreidimensional erfasste Strukturen sind i. d. R. nur auf Kosten der Genauigkeit in Detailstrukturen durchführbar und erfordern zusätzlichen Diskretisierungsaufwand. Daher ist es bei Voruntersuchungen des Schachtverschlusses ausreichend, rotations-symmetrische Strukturmodelle zu wählen sowie auch bei Einwirkungen aus dem Grubengebäude auf den Schacht*
- *Diskretisierung im Strukturmodell muss den rechnerischen Aus- und Einbau von Konstruktionsteilen des Schachtes und des Schachtverschlusses in möglichst realitätsnaher Form ermöglichen*

Einwirkungen

Für die Untersuchung der Schachtzustände sind die Ist-Zustände in zeitlich möglichst realistischer Folge zu überprüfen (Schacht-„Geschichte“)

Die weiteren Einwirkungen ergeben sich aus den zu untersuchenden Gefährdungssituationen, z.B.:

- *Langzeitverhalten des verschlossenen Schachtes*
- *Auflaufen von Flutungsdrücken, sowohl von oben als auch vom Bergsinnern*

- *Störfallszenarien am Verschlussbauwerk (z.B. örtliche Laugenzutritte oder Laugenvorgänge)*
- *Evtl. auch dynamische Einflüsse aus Erdbeben oder aus möglichen Bergschlägen aus der Nähe des Schachtes*

Hydrogeologisches Nachweismodell

Modellstrategie

- *Dreidimensionale Modellierung des Gas- und Laugenflusses (Diskretisierung in kartesischen radialen oder irregulären Blöcken)*
- *Berücksichtigung eines dualen Porenraumsystems (unterschiedliche Porositäten und Permeabilitäten für Gas und Lauge) mit kommunizierenden Kluft- und Matrixzonen*
- *Modellierung anisotroper Bereiche durch Richtungsorientierung der Permeabilität*
- *Berücksichtigung gravitativer und kapillarer Kräfte*
- *Darstellung der Fließwege und der Fließgeschwindigkeiten von Gas und Lauge*
- *Zeitinkrementale Berechnung der Druck- und Sättigungsverhältnisse*
- *Der Einfluss einer inelastischen Verformung auf die hydraulischen Materialeigenschaften wird z. Zt. nicht berücksichtigt*

Eintrittsphasen von Flüssigkeit:

- *Flüssigkeitszutritt aus den Grundwasserhorizonten oberhalb des Dichtelementes und des luftgefüllten Grubengebäudes*
- *Flüssigkeitszutritt aus den Grundwasserhorizonten und Füllung des Grubengebäudes über den Schacht*
- *Flüssigkeitszutritt aus den Grundwasserhorizonten wird ausgeschlossen; es erfolgt ein schneller Flüssigkeitszutritt über das Grubengebäude zum Schacht*
- *Gleichzeitiger Flüssigkeitszutritt aus den Grundwasserhorizonten und aus dem Grubengebäude*

5. Notwendigkeit einer Durchführung von Versuchen

Teile des geotechnischen Langzeitsicherheitsnachweises:

- *Analyse vorliegender Erfahrungen auf dem Gebiet der Schachtverschlüsse und deren Adaption auf neu zu konzipierende über lange Zeiträume funktionstüchtige Verschlussbauwerke*

- *Erstellen, Berechnen und Interpretieren von geotechnischen und hydrogeologischen Modellen und Modellen zur Langzeitsicherheit. Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die langfristige Funktionstüchtigkeit der Baukomponenten von Schachtverschlüssen sowie deren Interaktion untereinander und mit dem umgebenden Gebirge*
- *Durchführung eines großmaßstäblichen In-situ-Versuches im Maßstab 1:1, um die wirklich erzielbare technische Qualität von Schachtverschlüssen sowie deren Verformungen und Lastaufnahme unmittelbar nach Fertigstellung des Bauwerkes herzuleiten. Daraus ist zu prüfen, ob und in welchem Umfang Nachbesserungen gegebenenfalls überhaupt noch notwendig werden, und ob bzw. ab wann das Verschlusssystem als wartungsfrei gelten kann. Die derzeit gültigen Richtlinien zum Verfüllen der Schächte sehen technische Möglichkeiten, z.B. zum Nachversetzen der Verfüllsäulen, planmäßig vor bzw. fordern diese Untersuchungen. Die vorgesehenen in-situ-Untersuchungen dienen auch dem Nachweis, dass ein wartungsfreies, langfristig funktionstüchtiges Gesamtbauwerk von technisch hoher Qualität erstellt werden kann.*

BAND 2: Anhang

1. Darstellung des gegenwärtigen Standes von Wissenschaft und Technik für Schachtverschlüsse in Salzbergwerken

Widerlager

Es ist zwischen folgenden Widerlagerarten zu unterscheiden:

- *„Gebirgsverbundenes, statisches Widerlager“ – kraftschlüssiger Verbund zwischen statischem Widerlager und Gebirge*
- *„Gleitfähiges, statisches Widerlager“ – zug- und/oder schubspannungsfreie Zonen im statischen Widerlager oder zwischen statischem Widerlager und Gebirge*

Widerlager haben nicht nur den Abtrag von Spannungen infolge von Flüssigkeits- und Gasdruck und das Gewicht von Füllsäulen aus kohäsionslosen Material in das die Schachtröhre umgebende Gebirge zu gewährleisten, sondern auch bestimmte Füllsäulenabschnitte aus kohäsionslosem Material und die Dichtmaterialien der oberhalb der Widerlager angeordneten Dichtungen in ihrer Einbaulage zu fixieren und so ihre Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Es ist hierbei offen, ob die Beanspruchungen durch Standwässer aus dem Deckgebirge oder durch aufsteigende Lösungen/Gase hervorgerufen werden.

Nicht geeignet im Sinne eines statischen Widerlagers ist eine vollständige Verfüllung der Schächte mit kohäsionslosen Materialien, wie Kiesen, Sanden, Haldenmaterialien u. a.. Diese Verfüllmaterialien dienen der Stabilisierung der Schachtröhren, der Vermeidung von Ablö-

sungen aus den Schachtstößen und der Sicherung der Tagesoberfläche im Schachtkopfbereich.

Setzungen der Verfüllsäule durch das Eigengewicht bzw. durch Wasser-/Laugenaufnahme in Größenordnungen von mehreren Metern können durch Nachverfüllungen ausgeglichen werden. Eine Fixierung bestimmter Dichtelemente an einer bestimmten Stelle im Schacht ist damit nicht möglich.

Im Salinar muss zusätzlich noch mit umfangreichen Lösevorgängen am Schachtstoß gerechnet werden, die ein Absacken der vorhandenen Füllsäulen um mehr als 100 m zur Folge haben können, wie es aus den Anlagen 1.7 und 1.8 (Kupferschächte Otto Brosowski und Fortschritt I) ersichtlich ist.

Somit kommen als statische Widerlager in Frage:

- Verfüllsäulen aus kohäsiven Material (mit Bindemittel Zement oder Filteraschen)*
- Verfüllsäulen aus Schotter*
- Pfropfen auf relativ kurzer Einbaulänge*

Bei auftretenden Zersetzungen kann die Stabilität der Verfüllsäulen vor allem in Füllortbereichen verloren gehen, das Füllmaterial in vorhandene horizontale Grubenbaue ausfließen und größere Setzungen im Schacht die Folge sein.

Um diesen Prozess zu erschweren, können stabile Dämme aus Schotter im Schachtbereich beitragen. Korrosionsbeständiger Schotter aus Basalt bzw. ähnlichen Materialien nach den Technischen Lieferbedingungen der Deutschen Bahn AG wird in zunehmendem Maße für die Stabilisierung der Füllortbereiche eingesetzt. Infolge der vorhandenen hohen Gesteinsfestigkeit, Korngröße und -form sowie der sich einstellenden Kornverzahnung besitzt der Schotter eine hohe Setzungsarmut und Unempfindlichkeit gegenüber aufsteigenden Wässern. So bleiben die sich in den Füllörter/Schachtabgängen bildenden Böschungen von ca. 42°-45° stabil.

Durch Vermeidung von Löseerscheinungen des Salinars an den Stößen der Schachtröhre und der Schachtabgänge sind gute Voraussetzungen für die Stabilität der Verfüllsäule. Das wird erreicht, wenn im Schacht nur gesättigte Lösungen anstehen und der Aufsättigungsprozess ausschließlich im Grubengebäude erfolgt.

Reicht die Schottersäule bis in den Bereich des vorgesehenen Verschlussbauwerkes, so bildet sie eine gute Basis zur Fixierung von Dichtungen am entsprechenden Standort. Bei geschichteten Verfüllsäulen aus Schotter und Kies/Sand sind dies Voraussetzungen nicht gegeben, da Kiese und Sande vor allem bei Wasserzutritten zu erheblichen Setzungen führen. Die Dich-

tungen verlieren so ihre stabile Grundlage. Setzungen von über 7 m im Schacht Desdemona innerhalb von sieben Jahren zeigen diese Problematik auf.

Einteilung nach der Dichtwirkung beim Einbau

Passive Dichtstoffe

Hierzu zählen Materialien, die beim Einbau keine dichtenden Eigenschaften aufweisen, sondern diese Wirkung später durch äußere Einflüsse realisieren. Diese sind:

- *verschiedenste Tonarten und Mineralgemische, die trocken eingebaut werden und erst durch Wasserzutritt zum Quellen und damit zum Abdichten angeregt werden und*
- *hydraulische Lösungen (z.B. ausgesalzene Tonlösungen), die bei speziellen Dichtaufgaben (z.B. Gasspeicher) erst nach Aufbau des gesamten Dichtsystems mit Druck über Standleitungen aktiviert werden*

Aktive Dichtstoffe

Diese Materialien wirken sofort nach dem Einbau dichtend. Infolge ihrer natürlich dichtenden Eigenschaften benötigen sie keine äußeren Einflüsse, um die an sie gestellten Dichtfunktionen zu erfüllen. Hierzu zählen:

- *Fluide, die aufgrund ihrer niedrigen Viskosität sich gut ausbreiten und dichtend wirken (z.B. hydrostatisch wirkende Stoffe wie Bitumen und Asphalte) und die sowohl zur Übertragung hydraulisch aufgebrachter Drücke auf das Stützbauwerk als auch als eigenständige Dichtelemente zum Schutz von Widerlagerbauwerk und Hohlraumkontur genutzt werden und*
- *Tone und Mineralgemische, die mit dem Wassergehalt eingebracht werden, bei dem sie infolge ihres Quellvermögens expandiert sind und somit nach entsprechender Verdichtung beim Einbau sofort Dichtfunktionen übernehmen können.*

Arten von Dichtstoffen

Tone

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_F sollte möglichst um eine 10er Potenz niedriger liegen als das umgebende Gebirge. So schlägt [Pierau] für Dichtelemente in der Oberkreide einen k_F -Wert von 10^{-8} m/s vor; das umgebende Gebirge besitzt einen Wert von 10^{-7} m/s.

Bitumen/Asphalt

Bitumen und Asphalte (Bitumen mit Gesteinsmehl gefüllt) zeichnen sich durch ihr viskoses und/oder elastisches Materialverhalten aus. Der entsprechend zutreffende Stoffzustand ist von der Temperatur und der Belastungsgeschwindigkeit abhängig. Kurzzeitige schlagartige Belastungen führen zu elastischen Verformungen bzw. zum Zubruchgehen, Langzeitbelastungen bei geringer Belastungsgeschwindigkeit führen zu einem viskosen Verhalten. Weitere Eigenschaften:

- *Dichte von Bitumen bei 25°C: $\rho = 1000-1080 \text{ kg/m}^3$ (bei Zusatz von Füllern -> Asphalt: $\rho = 1300 \text{ kg/m}^3$, z.B. eingesetzt in den Schachtverschlüssen von Burggraf-Bernsdorf),*
- *Chemische Beständigkeit gegen die meisten Basen und Säuren (Ausnahmen: organische Lösungsmittel und Salpetersäure),*
- *Keine Wasserundurchlässigkeit und -aufnahmefähigkeit aufgrund der hohen Kohäsion,*
- *Keine wesentlichen biologischen Degradationen (Herabsetzung typischer Eigenschaften) mit $5,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.*

Bitumen und Asphalt können folgende Aufgaben übernehmen:

- *Korrosionsschutz von Bauwerken untertage gegen hochmineralisierte Wässer an horizontalen und vertikalen Angriffsflächen*
- *Vollquerschnittsabdichtung*
- *Abdichtung von Spalten und Fugen im schachtkonturnahen Gebirgsbereich und im Kontaktbereich zwischen Pfropfenbauwerk und Gebirge*
- *Aufrechterhaltung hydrostatischer Druckwirkungen bzw. Druckübertragungen (z.B. als Begrenzungsmedium für Tonsuspensionen in den Pfropfen der Schächte Burggraf-Bernsdorf und Ludwighall-Immenrode)*

Verwahrung von Untertagedeponien

Zusätzliche Grundsätze gegenüber der Schachtverwahrung sind: Die Langzeitsicherheit des Verschlussbauwerkes, die Ausschaltung von Lösevorgängen an den Schachtstößen, die Stabilität von statischen Widerlagern über extrem lange Zeiträume und die Stabilität der Verfüllsäulen über diese lange Zeit.

2. Anforderungen an Schachtverschlüsse

Untertagedeponie im Salzbergbau

Zutritte von Lösungen während der Nachbetriebsphase

Um einen Zutritt von Grundwasser aus dem Deckgebirge über den Schacht in die Deponehohlräume zu verhindern, muss deshalb ein langzeitsicheres Dichtelement unterhalb des heute wasserdichten Schachtausbaus in den Schachtverschluss eingebaut werden.

Anforderungen an Verschlussbauwerke aus den Belastungsszenarien

Das Verschlussbauwerk im Schacht muss eine Abdichtung gegen evtl. aufsteigende kontaminierte Laugen darstellen. Der zu erwartende Druck entspricht der Druckdifferenz zwischen Grundwasserhorizont und Unterkante Schachtverschluss. Dabei ist das spezifische Gewicht der Lösung zu berücksichtigen. Ein petrostatischer Druck ist zunächst nur als Grenzfall für die zu erstellenden geotechnischen Modelle und deren Bewertung relevant, da über die Leckage im Salinar ein Druckausgleich von Lösungen mit dem Grundwasserhorizont zu erwarten ist und deshalb für den Anwendungsfall nur ein offenes hydraulisches System (hydrostatischer Druck) anzunehmen.

Setzt man voraus, dass keine potentiellen Wegsamkeiten in Schachtnähe vorhanden sind und somit zutretende Lösungen größere Entfernungen in großen Zeiträumen überwinden müssen, um in Schachtnähe zu gelangen, ist es wahrscheinlich, dass nur gesättigte Lösungen den Schacht erreichen. Auflösungsprozesse in diesem Bereich sind unbedingt zu verhindern.

Während der Nachbetriebsphase wird es zum hydraulischen und statischen Versagen des wasserdichten Ausbaus kommen. Für das Verschlussbauwerk im Schacht ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer Dichtung unterhalb des wasserdichten Ausbaus.

Fazit

Wesentliche Dimensionierungsaufgaben:

- Berechnung des Verschlussbauwerkes auf Durchströmungsverhalten mit kontaminierten Lösungen*
- Statische Auslegung des Verschlussbauwerkes gegen axial hydrostatischen und radialen petrostatischen Druck*

Markscheiderische und technische Angaben

Lage, Teufe, Einfallen (nur bei nicht seigeren Schächten), Alter, Querschnittsgröße und –form, Ausbau, Einbauten, untertägige (betriebebene und abgeworfene) Anschlüsse und benachbarte Hohlräume (Art, Lage, Querschnitt, Zustand), Abbau in Schachtnähe, geologische und hydrogeologische Situation, letzte Nutzung, Bebauung an der Tagesoberfläche, evtl. frühere Verwahrung und Schachtschäden.

Alle Einbauten, die ein vollständiges Verfüllen verhindern und die beim Verfüllguteinbringen zu Bruch gehen können, sind zu berauben. Holzeinbauten sollten grundsätzlich beraubt werden.

Die Länge des Schachtverschlusses ist eine ingenieurmäßige einstellbare Größe, welche die Dichtheit des Gesamtsystems bestimmt.

Weiterhin ist sicherzustellen, dass sich das Spannungsverformungsverhalten des Schachtverschlusses derart einstellt, dass sich der Schachtverschluss seinen planmäßigen Aufgaben – Kraftübertragung und Abdichtung – nicht entzieht. Die Konsequenz wäre eine nicht erreichbare Erhöhung der Dichtigkeit durch Kraftschluss und Lastaufbau infolge Konvergenz. Das bedeutet, dass die relative Lage der Umgebung und des Schachtverschlusses zueinander möglichst erhalten bleiben muss. Aus diesem Grunde ist zu prüfen, ob es sinnvoll ist, das Spannungsverformungsverhalten des Schachtverschlusses dem des umgebenden Wirtsgesteins anzupassen. Es ist darauf zu achten, dass der Schachtverschluss nicht als „hard inclusion“ wirkt und durch Überbeanspruchung seine Funktion verliert.

4. Numerische Nachweise durch geotechnische und hydrogeologische Rechenmodelle

Auf folgende Probleme ist hierbei besonders zu achten:

- *Die Programmbeschreibungen müssen ausweisen, mit welchen Iterationsalgorithmen die z. T. stark nichtlinearen Probleme gelöst werden*
- *Bei der Ermittlung des Primärzustands im Gebirge ist nur der Spannungszustand von Interesse, die zugehörigen Verformungen müssen hingegen Null gesetzt werden*
- *Die Programme müssen den materiellen Ausbau von Strukturelementen (z.B. Ausbruch der alten Schachtverkleidung) und den Wiedereinbau von Elementen mit anderen Stoffeigenschaften (z.B. Verschlussmaterialien) gestatten*
- *Insbesondere für Berechnungen für sehr lange Zeiträume muss abgesichert sein, dass die Zeitschrittwahl, die Wahl von impliziten und expliziten Iterationsschritten zu stabilen und richtig konvergierenden Berechnungsabläufen führt*

- *Sind auch instationäre Temperaturfelder zu untersuchen, so ist eine iterative Kopplung zwischen Temperaturfeld und Spannungs-Verformungszuständen erforderlich, weil z.B. die Kriecheffekte sehr stark von der Temperatur abhängen*
- *Analog wie bei instationärer Temperatur kann auch eine Durchfeuchtung von Steinsalz zur Kopplung der Entwicklung von Durchfeuchtungsvorgängen mit dem davon abhängigen Stoffansatz erforderlich sein. Durchfeuchtung erhöht i. d. R. den Kriecheffekt und kann damit wiederum zur Abminderung der Durchlässigkeit führen*
- *Bei der FEM-REM-Kopplung ist darauf zu achten, ob durch den Ansatz einer (vereinfachenden) Symmetrisierung der Gleichungssysteme nicht unzulässig große Fehler auftreten*
- *FEM und REM sind grundsätzlich Kontinuums-Methoden. Strukturelemente mit Porenhöhlräumen (z.B. Schotterfüllung eines Teils des Schachtes) können damit nur näherungsweise, in ihren realen Eigenschaften nur „verschmiert“ als Kontinuum erfasst werden. Die Berechnung mit Ansätzen einer Diskontinuums-Theorie ist so aufwendig, dass sie für die Anwendungen bei den vorliegenden Schachtproblemen nicht empfohlen wird*
- *Für dynamische Probleme mit Erhalt der Kontinuität (also nicht für Untersuchungen des unmittelbar vom Gebirgsschlag betroffenen Gebirgspfeilers aus Salzstein) eignet sich die Randelementmethode (REM) besonders gut, weil u. a. Reflexionsprobleme vermieden werden*

Die wichtigsten Berechnungsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Die primären Gebirgsspannungen beeinflussen wesentlich die Größe des Bereiches mit Festigkeitsüberschreitungen im Widerlager*
- *Die Festigkeit des Salzgebirges ist für die Standsicherheit nicht entscheidend*
- *Der Lastfall ohne Laugendruck verursacht i. a. ungünstigere Beanspruchungen im Widerlager*
- *Widerlager mit ausgeprägten Krieeigenschaften weisen günstigere Beanspruchungen auf als Einbauten mit rein elastischen Materialverhalten*
- *Wesentlichen Einfluss auf den Spannungszustand im Absperrbauwerk besitzt die Schubsteifigkeit in der Kontaktfuge zwischen Widerlager und Gebirge*
- *Bei Laugendrücken in Höhe der primären Gebirgsspannung ergibt sich rechnerisch ein Aufreißen der Kontaktfuge an der Seite der Druckaufgabe*

Breidung, K. P.; K+S Aktiengesellschaft, Kassel: „Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdettfurth Schacht II“, Abschlussbericht, K+S Aktiengesellschaft Kassel; Bundesministerium für Bildung und Forschung (Bonn), Bad Salzdettfurth, 2002

Arbeitspaket 1 – Vorbereitung, Planung und Projektabwicklung

Als Dichtmaterialien weisen Bitumen und Asphalte in vertikalen Grubenbauen ein vorteilhaftes Dichtverhalten auf. In der Praxis wurden sie immer in schichtweise Kombinationen mit Tonen eingesetzt. Nachteilig ist ihr „Flüssigkeitscharakter“, wodurch Zweifel an der mechanischen Integrität einer einzelnen Bitumen- oder Asphaltdichtung bestehen.

Als Material für statische Widerlager für Verschlussbauwerke im Salinar kommen, neben arteigenen Salzen, nur im Salinar langzeitstabile Hartgesteine in Frage. Der Nachteil von Salzgrus ist seine geringe Setzungsstabilität aufgrund des über sehr lange Zeiträume verlaufenden Kompaktionsverhaltens.

Das Dichtelement muss in jedem Fall durch beidseitig setzungsstabile Widerlager positioniert werden. Dies gilt sowohl bei möglicher beidseitiger Belastung, als auch bei einseitiger Belastung, da auch das Widerlager an der Flüssigkeitszutrittseite (auch von oben) gegen den Quelldruck des Dichtmaterials bemessen sein muss, um eine Auflockerung des Dichtelementes zu verhindern und um so die Kontaktbereichsdichtung zum Schachtstoß nicht zu gefährden.

Das zwischen beiden Füllsäulen positionierte Hauptdichtelement kann im Bedarfsfall (Abdichtung gegen von oben zutretende Wässer bei Undichtigkeiten des Schachtausbaus, Abdichtung gegen von unten zutretende geologisch bedingte Zuflüsse, Hinterlösungen der Schachtmauerung) durch weitere, im Bereich der Füllsäulen positionierte, Dichtelemente ergänzt werden.

Die Sicherung der gesamten Füllsäule im Füllortbereich gegen Auslaufen in das Grubengebäude ist nur mit einem setzungs- und böschungsstabilen Schotter möglich. Dazu muss der Schachtsumpf vollständig geräumt sowie die Füllörter bis auf das feste Salz freigeräumt werden.

Aus Sicht der Langzeitstabilität ergeben sich folgende Einschränkungen bzw. Prioritäten:

- *Als Dichtmaterial wird ausschließlich Bentonit ausgewählt. Kombinationen mit Bitumen/Asphalten werden nicht in Betracht gezogen*

- *Das Dichtelement muss nicht nur gegen Flüssigkeitsdruckbelastung von oben, sondern auch gegen Flüssigkeitsdruckbelastung von unten seine Dichtfunktion dauerhaft behalten*
- *Setzungsstabile Füllsäulen aus langzeitstabilem Hartgesteinschotter werden als beidseitige statische Widerlager für die Positionierung vorgesehen. Salzgrus wird nicht untersucht, jedoch sollen vergleichende Betrachtungen (Modellrechnungen) zwischen Salzgrus und Schotter durchgeführt werden*

Konzept für die Untersuchung der Schottersäule

Stand von Wissenschaft und Technik

- *Die Standsicherheit einer Verfüllsäule aus Gleisschotter wurde aus dem in Bunkern festgestellten Siloeffekt abgeleitet. Daraus folgt, dass bereits Schottersäulen begrenzter Höhe ausreichen sollen, um entsprechende Belastungen abzutragen. Die erforderliche Höhe dieser tragenden Schotterschicht kann berechnet werden*
- *Bei Einsatz von Gleisschotter soll die Stabilität der Füllortböschungen bei einem Winkel von 42° bis 45° gewährleistet sein*
- *Das Verhalten einer Schottersäule unter Last, insbesondere bei Zutritt gesättigter Salzlösung, kann nicht aus den Teilkenntnissen zum Gleisschotter abgeleitet werden*
- *Hinsichtlich der Langzeitbeständigkeit ist von den möglichen Hartgesteinen der Basalt zu bevorzugen (natürliche Analoga, z.B. die Basaltintrusionen des Werra-Gebietes)*
- *Es können auch andere Materialien als Referenzschotter eingesetzt werden, wenn man die sonstige Gleichwertigkeit zum Basaltschotter nachweist*

Konzept für die Untersuchung des Bentonitdichtelementes

Stand von Wissenschaft und Technik

- *Trotz praktischer Kenntnisse und Erfahrungen liegen keine Daten zum Materialverhalten von Tonen unter salinaren Bedingungen vor (Dichtverhalten nach Zutritt salinärer Lösungen und Langzeitstabilität von Tonen im Salinar)*
- *Materialauswahl orientiert sich stark an lokale Tonvorkommen*
- *Die bekannte Einbautechnologie orientiert sich nicht an konkreten Bemessungsparametern, sondern an der üblichen Verfahrensweise der Bodenmechanik*
- *Tone als Dichtmaterial wurden in der Regel in Kombination mit Bitumen/Asphalt eingesetzt. Hierbei ist der wirksame Anteil des Tones am Dichtverhalten des Systems nicht nachweisbar*

- *Neuere Tonmaterialien zur Bohrlochverfüllung sind hinsichtlich ihrer Wirksamkeit für untertägige Dichtelemente im Salinar nicht untersucht*

Erkenntnisse aus dem BMBF-Vorhaben 02C0193 „Materialuntersuchungen für Mehrkomponentensysteme auf Ton/Bentonit-Basis für Dichtung und Lastabtrag, mit hohem Rückhaltevermögen, für den langzeitsicheren Verschluss von UTD und Endlagern im Salinar“:

- *Im Vergleich mit Wasser und bei gleicher Bentonittrockendichte erhöht sich bei Einwirkung hochkonzentrierter Salzlösungen die hydraulische Leitfähigkeit und es verringert sich der Quelldruck*
- *Wird der Ton feucht eingebaut, wird durch das Vorquellen das nutzbare Quellpotential verringert. Außerdem kommt es evtl. zum Austrocknen mit Schrumpfrissen*
- *Um Zielwerte für die hydraulische Leitfähigkeit und den Quelldruck zu erreichen, ist eine, je nach lokalen Verhältnissen festzulegende Trockendichte des Tones zu realisieren*
- *Beide Forderungen – trockener Einbau und hohe Trockendichte – erfordern neue Einbauverfahren*
- *Mit natürlichen Salztonproben wurden die für die Funktionsweise eines Dichtelementes im stabilen Endzustand wichtigen Parameter bestimmt. Durch ein Vergleich mit natürlichen Analoga lassen sich die Eigenschaften eines Dichtelementes im Salinar über lange Zeiträume vorhersagen*

Für die Gestaltung eines Dichtelementes konnten folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- *Die Hauptparameter der Bemessung der Bentonitdichtelemente ist die erforderliche Bentonittrockendichte und das notwendige Verhältnis von Länge : Radius des Dichtelementes. Dabei ist die Dichterduzierung des Bentonits bei möglichem Quellvolumen zu berücksichtigen*
- *Bentonit wird lufttrocken eingebaut, um ein nachteiliges Vorquellen auszuschließen*
- *Lange Dichtelemente aus trocken eingebautem Bentonit ermöglichen nach Flüssigkeitszutritt durch den sich entwickelnden Quelldruck und die Wandreibung einen Lastabtrag des Dichtelementes gegenüber axialen Flüssigkeitsdrücken und können somit als redundantes Element zum statischen Widerlager angesehen werden*
- *Auf Grund des Selbstheilungseffektes nach Flüssigkeitszutritt werden Inhomogenitäten und Imperfektionen ausgeglichen („self sealing“-Effekt)*

- *Ein Dichtelement aus trockenen Presslingen kann sich infolge einer Selbstnachverdichtung unter axialen Flüssigkeitsdrücken den entsprechenden Belastungen anpassen bzw. sein Sicherheitsspotential verbessern*
- *Auf der Flüssigkeitsseite muss durch einen Aufsättigungsbereich im Salzhautwerk abgesichert werden, dass im Falle eines Flüssigkeitszutrittes der trockene Bentonit nur mit gesättigter Salzlösung zusammen trifft*

Im Auftrag der NAGRA wurde an der TU Bergakademie Freiberg ein Verfahren zur Herstellung trocken kompakter Presslinge aus MX-80 entwickelt, aus denen Bohrlochverschlüsse mit hoher Einbaudichte errichtet werden können. Das Verfahren basiert auf einem kontinuierlichen Prozess mit einer Walzenpresse als Hauptausrüstung.

Weitere vergleichbare Arbeiten sind im Rahmen des BACCHUS-Projektes für die Entwicklung von Verfüllmaterialien für radioaktive Endlager durchgeführt worden.

Zu relevanten Einbauverfahren für großflächige Dichtelemente (Querschnittsfläche > 4m²) liegen keine konkret verwertbaren Informationen vor.

Gliederungen der Untersuchungen zum Dichtelement:

Für die Materialauswahl des im in-situ-Versuch vorgesehenen Bentonits gelten folgende Hauptkriterien, die für das Dichtelement entscheidend sind:

- *Hydraulische Leitfähigkeit k_f gegenüber NaCl-Lösung < $5 \cdot 10^{-10}$ m/s*
- *Quelldruck p_{q0} bei Zutritt von NaCl-Lösung ca. 1 MPa (für die Dichtheit der Kontaktzone)*
- *Nachgewiesene Langzeitstabilität*
- *Wirtschaftlichkeit*

Arbeitspaket 2 – Bestandsaufnahme und Voruntersuchungen der Versuchsstandorte

Technischer Zustand Bohrschacht

Permeabilitätsmessungen mit der Gasdruck-Puls-Methode:

Da die gemessene Permeabilität des im Bohrschacht umliegenden Steinsalzes um Größenordnungen kleiner ist, als die zu erwartende Permeabilität des Dichtelementes im gesättigten Zustand, ist eine großräumige Umströmung des Dichtelementes nicht zu erwarten. Allerdings kann zum stoßnahen Bereich, bis zu einer Entfernung zur Kontur von 4 cm, keine Vorhersage getroffen werden, da die Permeabilität in diesem Bereich nicht gemessen werden kann.

Arbeitspaket 3 - Untersuchungen zur Schottersäule

Untersuchungen zur Materialauswahl

Generell ausgeklammert aus der Betrachtung wurde kohäsive Materialien, da für zementgebundene oder andere bindemittelhaltige Materialien keine Langzeitstabilität unter salinaren Bedingungen nachgewiesen werden kann.

Die Untersuchungen zur Langzeitstabilität beinhalten neben grundsätzlichen Betrachtungen zur chemisch-mineralogischen Beständigkeit des Grundmaterials vor allem vergleichende Untersuchungen zur Verwitterungsbeständigkeit und zur mechanischen Beständigkeit unterschiedlicher Schottersorten.

In den Untersuchungen zur Setzungsstabilität wurden Materialparameter zur Beschreibung des Setzungsverhaltens unter realistischen Belastungen, d.h. im trockenen Einbauzustand und nach einer angenommenen Flutung mit gesättigter Salzlösung bestimmt. Diese Materialparameter fanden Eingang in numerische Modellrechnungen, mit denen das Verhalten einer setzungsstabilen Füllsäule aus dem ausgewählten Material unter verschiedenen Lastfällen realitätsnah beschrieben werden konnte.

Das konkrete Ergebnis dieser Untersuchungen ist die Auswahl eines geeigneten Referenzschotters, der alle gestellten Anforderungen des in-situ-Versuchs erfüllt.

Die Langzeitbeständigkeit des Basaltes unter salinaren Bedingungen kann durch natürliche Analoga, z.B. den Basaltintrusionen des Werra-Gebietes belegt werden.

Mit dem Basalt gleichwertig ist Diabas. Deshalb kann auch für einen Diabasschotter die chemische Langzeitstabilität unter salinaren Bedingungen vorausgesetzt werden.

Auswahl eines Referenzschotters

Als Referenzschotter wird ein Schotter bezeichnet, für den die Gleichwertigkeit zum Gleisschotter der Deutschen Bahn nachgewiesen werden kann.

Eine absolute Gleichwertigkeit zum Gleisschotter der Deutschen Bahn ist nicht erforderlich, da einige Anforderungen an den Gleisschotter für den Einsatz im Salzbergbau nicht relevant sind: Dies betrifft beispielsweise folgende Anforderungen:

- zulässige Abweichungen in der Kornverteilung*
- Aufnahme dynamischer Belastungen bei schwankenden Temperaturen (Tageszeit, Jahreszeit)*
- Farbliche Gesichtspunkte (gleichmäßiges Aussehen)*

Es wurden Drucksetzungsversuche durchgeführt, um das Drucksetzungsverhalten und die Veränderung der Kornkennlinie sowie das Siloverhalten des Schotters bei Belastung untersucht.

Nachfolgend wurde das Drucksetzungsverhalten der einzelnen Schottersäule unter Laugenzutritt untersucht. Dazu wurde nach Beendigung des ersten Versuchszyklusses (Drucksetzungsversuche im trockenen Ausgangszustand) die Schottersäule mit Lauge geflutet und erneut belastet.

Ein weiteres Kriterium der Auswahl des Referenzschotters ist die Veränderung der Kornverteilung des Schotters infolge der Belastung. Durch Punktbelastung, Kantenabrieb und nachfolgende Veränderungen der Korngrößenverteilung kann es zu Veränderungen des Materialverhaltens der Schottersäule über lange Zeiträume kommen.

Mechanische Veränderungen der Schottersäule über lange Zeiträume kann man ausschließen, wenn man nachweist, dass unter Belastung die Korngrößenverteilung des Schotters sich praktisch nicht ändert.

Vergleicht man die Ergebnisse der einzelnen Schottersorten nach den Versuchen, fällt auf, dass sich bei den meisten Schottersorten die Kornkennlinie zu kleineren Fraktionen verschiebt. Diese Verschiebung im Kornspektrum (Kornverkleinerung) kann langfristig zu Veränderungen im mechanischen Verhalten einer Schottersäule führen.

Hinsichtlich der Veränderung der Kornform fand überwiegend eine Verbesserung der Kornform statt, die zu einem geringeren Anteil ungünstig geformter Körner führte. Als ungünstig geformt gelten Körner, deren Verhältnis von Länge zu Dicke > 3 ist.

Reibungswinkel im trockenen und gefluteten Zustand

Die Scherfestigkeit des Schotters ist aufgrund von Kornbrucherscheinungen vom Spannungsniveau und den dabei auftretenden Verformungen abhängig. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass durch die Sättigung des vormals trockenen Schotters der Scherwiderstand um ca. 4° verringert wird.

Setzungsverhalten unter realistischen Belastungen (trocken und geflutet)

Die Forderung einer möglichst setzungsstabilen Schottersäule als Widerlager eines Schachtverschlusses geht über die bisherigen Anforderungen einer Schachtverfüllung hinaus. Deshalb sind auch bisherige positive Erfahrungen des Schottereinsatzes in der Schachtverfüllung nicht ausreichend, um die Setzungsstabilität einer Schottersäule zu quantifizieren.

Bei einer Auflast von 0,2 MPa, diese entspricht dem Druckaufbau in der Verfüllsäule aufgrund der Silowirkung, betrug die Setzung des trockenen Schotters 0,04%. Nach einem simulierten Zufluss von Wasser betrug die Setzung 0,16%. Daraus folgt, dass im Falle eines Flüs-

sigkeitszuflusses nach dem Einbau mit einer Nachsetzung (Sättigungssetzung) von 0,12% zu rechnen ist. Dies ist auf die Erhöhung der Komprimierbarkeit infolge Reibungsverminderung an den Korngrenzen des Schotters zurückzuführen.

Bei einer Vertikallast von 15 MPa (entspricht dem Überlagerungsdruck bei 600 m) betrug die maximale Volumenkompaktion 25% (bezogen auf eine Einbaudichte von 1,5 t/m³). Bei dieser Vertikallast betrug die Sättigungssetzung 3%. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Triaxialversuche überein, bei denen bei Effektivbelastungen von 1,5 MPa eine Sättigungssetzung von 0,4% gemessen wurde.

Maßnahmen im Schacht und schachtnahen Bereich sowie Einbringtechnologie

Maßnahmen vor Einbau der Schottersäule:

- Entfernen der Einbauten im Schacht und schachtnahen Bereich
- Säubern des Schachtsumpfes und der Sohlen im Füllortbereich
- Kontrolle des Formschlusses zwischen Mauerwerk und Gebirge

Die Einbringtechnologie wird durch das Entleerungsgefäß und die optimale Fallhöhe charakterisiert. Es wurde festgestellt, dass bei einer Fallhöhe von 20 m über dem jeweiligen Einbauniveau eine ausreichende Verdichtung ohne Kornzerstörung erreicht wird. Unter den vorliegenden Betriebsbedingungen wurde eine Einbaudichte von 1,75 – 1,85 t/m³ erreicht.

Festlegung der Schotterböschung im Füllortbereich

Bei Einsatz von Gleisschotter soll die Stabilität der Füllortböschungen bei einem Böschungswinkel von 42° - 45° gewährleistet sein. Eine Erhöhung des Sicherheitsniveaus erreicht man durch geringere Böschungswinkel. In-situ-Versuche ergaben, dass bei einem Böschungswinkel von 36° eine ausreichende Stabilität des Füllortbereiches gegeben ist, wenn der Schotter befeuchtet eingebaut und nachverdichtet wurde.

Entwickelte technische Maßnahmen:

- Verdichtung der Füllortböschung bis zum Firstanschluss – dabei sofortige Abflachung der Böschung
- Nach der verdichteten Böschung wird eine verdichtete Vorschüttung als Widerlager mit dem gleichen Schottermaterial firstbündig aufgebracht
- Aus Optimierungsberechnungen wurde die erforderliche Länge dieses Widerlagers in Richtung Streckenachse mit der gemittelten Höhe der abgehenden Strecke festgelegt
- Nach der verdichteten Vorschüttung aus Schotter wird zur Sicherung der Firste gegen Ausbruch eine unverdichtete Vorschüttung aus Salzhauwerk firstbündig aufgebracht

- *Aus Optimierungsberechnungen wurde die erforderliche Gesamtlänge beider Vorschüttungen in Richtung Streckenachse mit der doppelten gemittelten Höhe der abgehenden Strecke festgelegt*

Voruntersuchungen im Schacht I

Verhalten einer trockenen Schottersäule

Zielstellungen:

- *Bestimmung der Lastverteilung und des Lastabtrages auf die Schachtsohle, im Schotter und auf die Stöße und damit der Nachweis der Anwendung der Silotheorie auf die Verhältnisse einer Schottersäule*
- *Bestimmung des lastabhängigen Setzungsverhaltens aus dem Eigengewicht des Schotter im Schacht und in einem Füllort ohne stützendes Widerlager*
- *Ermittlung der Einbaudichte, Porenzahl und Schüttwinkel des Schotter*
- *Optimierung von Messverfahren und –anordnungen sowie von Messbereichen und –genauigkeiten für den Hauptversuch im Schacht Salzdettfurth II*

Der Schacht Salzdettfurth I hat einen lichten Durchmesser von 5,25 m.

Ergebnisse:

- *Im Verlauf der Schüttung trat nach einer Füllhöhe von 8 – 10 m keine Zunahme des Vertikaldruckes auf*
- *In den unteren 16 m der Schottersäule wurden während der Schottereinbringung bis zu 15 mm Setzung festgestellt. Anschließend waren am Schachtstoß im Rahmen der Messgenauigkeit (Messunsicherheit von 3 mm) in allen Messabschnitten keine signifikanten Setzungen mehr festzustellen*
- *Es wurde der Siloeffekt nachgewiesen. Über ca. 10 m hinaus waren innerhalb der Schottersäule keine unmittelbaren Druckänderungen als Auswirkungen der Schüttung mehr festzustellen. Oberhalb von Füllortbereichen mit natürlich auslaufender unverdichteter Schotterböschung stellten sich ungleichmäßige Setzungen und lokale Auflockerungen ein*
- *Der geringe aber permanente Druckanstieg auf der Schachtsohle und der Sohle des Füllortes kann z.B. mit Sohlenhebungen aufgrund der Gebirgsspannungen zusammenhängen und ist für die spezielle Beurteilung des Siloeffektes in der Schottersäule nicht relevant*

- *Die Einbautechnik des verwendeten Schotters und die gewählte Körnung 32/80 mm ergaben eine weitgehende gleich bleibende Einbaudichte von ca. 1,75 t/m³*

Verhalten einer gefluteten Schottersäule

Ergebnisse:

- *In der Flutungsphase füllte sich der gesamte Porenraum mit gesättigter MgCl₂- Lösung*
- *Die Dichte betrug ca. 1,32 t/m³*
- *Es kam zu Verschiebungen der Böschungsoberfläche durch Nachrutschen, ohne wesentliche Veränderung des Böschungswinkels*
- *In der Schotterböschung setzte nach Abnahme des Auftriebs eine geringfügige Erhöhung der Lagerungsdichte ein*
- *Im Wesentlichen erhöhte der Fluiddruck den Druck in der Füllsäule hydrostatisch*
- *Die wirksamen Spannungen innerhalb der Schottersäule unter Silobedingungen und die daraus bestimmten Spannungen wurden kaum vom Auftrieb beeinflusst und sind quasi nicht vom Fluidstand abhängig. Anscheinend ist in diesem Bereich der Schotter in Form eines Traggewölbes so verkeilt bzw. verspannt, dass hier durch Auftrieb nur eine marginale Entlastung eintritt*
- *Die Erhöhung der totalen Spannungen führte weder zu nennenswerten Veränderungen der wirksamen Spannungen noch zu Setzungen in der Schottersäule*

Nachweis einer setzungsarmen Schottersäule – Versuch im Schacht II

Im Schacht II wurde eine komplette Schottersäule im Maßstab 1:1 (von der Schachtsohle bei 768 m Teufe bis ca. 500 m Teufe) nach den gewonnenen Erkenntnissen eingebaut. Durch eine entsprechende messtechnische Überwachung der Schottersäule und der Füllörter sollte die Setzungsstabilität dieser Schottersäule nachgewiesen werden.

Der Schacht steht in der Schachtsohle bei 768,21 m Teufe bis zum Füllort der 774 m- Sohle im Hauptanhydrit. Dieser Bereich ist mit einem ca. 0,5 m dicken Mauerwerk ausgebaut. Der lichte Durchmesser an der Schachtsohle beträgt 4,25 m. Ab ca. 7 m über der Sohle bis zum Füllort 774 m – Sohle ist er auf 5,10 m erweitert. Danach steht der Schacht im Durchmesser zwischen 5,60 m und 7,70 m bis zur geplanten Schotteroberkante bei ca. 513 m Teufe unausgebaut überwiegend im älteren Steinsalz. In geringer Mächtigkeit sind in diesem Bereich auch Schichten des Kaliflözes Stassfurt aufgeschlossen.

Vor der Verfüllung wurden die Schachteinbauten entfernt und der Schotter mit gesättigter Salzlösung befeuchtet (ca. 1 Mass.-%).

Ergebnisse zum Verhalten der Schottersäule im Schacht II:

- *Für eine qualifiziert eingebrachte Schottersäule aus Diabas sind substantielle Setzungen nur aus der Konsolidierung von Bereichen mit Einbaudichten $< 1,8 \text{ t/m}^3$ zu erwarten. Da diese Setzungen jedoch – soweit bisher erkennbar – mit sehr geringen und degressiven Raten von $< 1 \text{ mm/a}$ ablaufen und dieser Effekt durch die bezüglich der Setzungsgefährdung gegenläufig wirkende Gebirgskonvergenz verlangsamt wird, ist hieraus nach Abklingen der Temperaturänderungen langfristig lediglich von Gesamtsetzungen im Bereich weniger Zentimeter auszugehen*
- *Eine wesentliche Voraussetzung für eine setzungsarme Schottersäule sind ausreichend dimensionierte Widerlager in den Füllorten. Da beim Aufmaß der Böschungsoberfläche im Schacht I Neigungen von 30° bis 40° festgestellt wurden, sollte die Vorschüttung so dimensioniert werden, dass die Böschung der Vorschüttung kleiner 30° zur Horizontalen geneigt ist*
- *Damit verbleiben Lösungsprozesse durch den Zutritt ungesättigter Lösungen als substantielles Risiko für unkontrollierte Setzungen. Da durch eine gezielte Flutung des unteren Schachtabschnitts mit gesättigten Lösungen entsprechend der anstehenden Lagerstätte voraussichtlich keine zusätzlichen Setzungen initiiert werden, kann dies als Vorsorgemaßnahme geplant werden. Zusätzlich ist die Vorschüttung aus dem gleichen Material herzustellen, wie es im Füllort ansteht*
- *Durch eine firstbündige Salzvorschüttung vor die Schotterwiderlager in den Füllortbereichen kann ein vollständiger wettertechnischer Abschluss der Schottersäule erreicht werden. Es ist zu erwarten, dass dann im Schacht II die noch zu erkennenden geringen Setzungstrends abklingen*
- *Mit der lang anhaltenden Konsolidierung der Schottersäule sind auch weitere Änderungen der Spannungsverhältnisse in der Schottersäule zu erwarten. Diese werden aber, solange die Ränder intakt bleiben, zu keinen substantiellen Setzungen führen. Beim Zutritt von Salzlösungen ist entsprechend deren Dichte und Füllstand mit einem Anstieg des totalen Drucks in der Schottersäule um den Fluiddruck zu rechnen. Die wirksamen Drücke in der Schottersäule bleiben davon aber weitgehend unbeeinflusst*

Überprüfung des Siloeffektes

Signifikante Abweichungen zwischen den berechneten (d.h. auch den silotheoretischen Vorstellungen) und den gemessenen Spannungszuständen bestehen für die Horizonte Schachtsohle und Füllortsohle. Diese Messhorizonte weisen eine zeitabhängige Zunahme der Spannungen aus, ohne dabei gegen einen füllhöhenunabhängigen Endwert zu streben, wie die Werte der Messstellen im Inneren der Füllsäule.

Die Setzungen der Füllsäule beim Schüttvorgang wurden im „mm“-Bereich prognostiziert. Nach den Modellrechnungen wurde eingeschätzt, dass über die Füllortabgänge bis zur Ausbildung stabiler Böschungsverhältnisse größere Setzungen im „cm“-Bereich eintreten können.

Schlussfolgerung aus den Untersuchungen zur Schottersäule

Materialauswahl:

- *Auswahl eine langzeitstabilen Materials, d. h. Basalt oder Diabas*
- *Kornkennlinie 32/80 mm*
- *Bei Alternativmaterial ist der Eignungsnachweis des ausgewählten Schotters durch Untersuchung mit den Eigenschaften des vorliegenden Schotters zu vergleichen*

Maßnahmen im Schacht:

- *Entfernen der Einbauten im Schacht und schachtnahen Bereich*
- *Säubern des Schachtsumpfes und der Sohlen im Füllortbereich*
- *Kontrolle des Formschlusses zwischen Mauerwerk und Gebirge und evtl. Entfernung des Schachtausbaus*
- *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 Hartgesteinschotter über die Länge der gemittelten Füllorthöhe*
- *Salzvorschüttung vor die Schottervorschüttung in den Füllortbereichen über die Länge der gemittelten Füllorthöhe. Material soll der Lagerstätte des Füllortes entsprechen*
- *Neigungswinkel der Vorschüttung $< 30^\circ$*

Einbauparameter:

- *Angestrebte Einbaudichte des Schotters $1,80 \text{ t/m}^3$*
- *Keine großen Dichteunterschiede in der Schotterverfüllung*
- *Vorbefeuchtung des Schotters vor Einbau mit gesättigter Salzlösung (1 Mass.-%)*
- *Flutung des unteren Schachtabchnittes mit gesättigter Salzlösung entsprechend der anstehenden Lagerstätte (Ausschluss unkontrollierbarer Löseprozesse)*

Arbeitspaket 4 - Untersuchungen zum Dichtelement

Labor- und halbertechnische Untersuchungen

Hauptanforderungen an das Dichtelement (im durchfeuchteten Zustand), die für die Funktion des Dichtelementes entscheidend sind:

- *Hydraulische Leitfähigkeit k_f gegenüber NaCl-Lösung $< 5 \cdot 10^{-10}$ m/s (nach Vorgabe eines normierten Volumenstroms)*
- *Quelldruck p_{q0} bei Zutritt von NaCl-Lösung ca. 1 MPa (für die Dichteit der Kontaktzone)*
- *Nachgewiesene Langzeitstabilität*

Zusätzlich für die zukünftige Nutzbarkeit:

- *Wirtschaftlichkeit*
- *Vergleichbarkeit mit ähnlichen Projekten (Untersuchungen in der Schweiz, Schweden, USA)*
- *Reproduzierbarkeit und Übertragbarkeit der Ergebnisse des Versuches auf die zukünftige Realisierung*
- *Genehmigungsfähigkeit*

Um die gewünschte Einbaudichte $> 1,65$ g/cm³ zu erreichen, wurden Untersuchungen zum Verdichtungsverhalten der Mischungen aus Briketts und Mehl sowie Briketts und Granulat durchgeführt. Die größte Verdichtung sowohl für Briketts als auch für Granulat (0,5 bis 1 mm und 0,5 – 2 mm) wurde bei einer Frequenz von 50 – 100 Hz und Rüttelzeiten von 60 s bestimmt. Die Verdichtung erfolgte mit einer modifizierten Vibrationsplatte. Das Vibrationsgerät hat eine Grundplatte mit einem Durchmesser von 300 mm, welche gelocht ist. So kann während der Verdichtung das Granulat direkt aufgebracht werden. Die Sandschichten unterhalb der Dichtung wurden im Versuch nicht zusammengepresst. Allerdings wurden bei der untersten Bentonitschicht Briketts in die Sandschicht gedrückt.

Der Einbau des binären Gemisches muss so erfolgen, dass Setzungen des Dichtelementes infolge Setzung der darunter liegenden Schottersäule nur zu möglichst geringen Auflockerungen führen.

Versuche zum Setzungsverhalten im trockenen Zustand ergaben folgende Ergebnisse:

- *bei glatter Rohrwandung ist unabhängig der Absenkgeschwindigkeit eine einheitliche, geschlossene Setzung der gesamten Gemischsäule von einigen „cm“ ohne Auflockerung aufgetreten*

- *Bei Vorhandensein von Unebenheiten (Rauigkeitselementen) trat während der Setzung eine Auflockerung der Gemischsäule ein. An den Rauigkeitselementen bildeten sich Hohlräume. Es trat eine Klassierung des Korngemisches durch nach unten rieselndes Granulat auf. Die Auflockerung blieb im Wesentlichen auf den Randbereich (raue Rohrwandung) beschränkt. Mit größerem Durchmesser nehmen die Randeinflüsse ab.*
- *In Schächten sollte sich durch die Auflast der Verfüllsäule und die mit größerem Durchmesser abnehmenden Randeinflüsse der Unebenheiten eine Auflockerung weniger stark auswirken. Im lufttrockenen Zustand und bei ausreichend glatter Wandung ist das Bentonitgemisch in der Lage, einer möglichen Setzung der Verfüllsäule zu folgen. Bei der unter praxisnahen Bedingungen zu erwartenden unebenen Ausbildung der Schachtwandung ist jedoch besonders am Rand mit einer Auflockerung zu rechnen, so dass an der Wand besondere Vorkehrungen gegen eine zu starke Auflockerung zu treffen sind. Die Randbehandlung durch Anschüttung von Granulat muss deshalb in jedem Fall durchgeführt werden.*

Weitere Schlussfolgerungen:

- *Das Granulat muss während der Verdichtung alle vorhandenen Poren ausfüllen. Die verbleibende Gesamtporosität liegt bei ca. 30%*
- *Vom Kornband des einzubringenden Granulats hängt es ab, ob in die offenen Porenräume des binären Gemisches bei geringen Fluiddrücken Flüssigkeit eindringt oder nicht*
- *Zu Beginn der Befeuchtung des Gemisches ist nur ein geringer Fluiddruck aufzubringen. Hierdurch erhält der Bentonit die Möglichkeit, Flüssigkeit aufzunehmen und durch den Quellvorgang die vorhandenen Poren zu schließen. Damit wird ein Aktivieren der Dichtfunktion erreicht*
- *Bei sofort hohen Fluiddrücken (>10 bar) kommt es zur Ausbildung von Flüssigkeitspfaden im Bentonit. Der homogene Aufbau des Bentonits wird zerstört. Diese Pfade stellen auch nach Quellung des Bentonits Schwachstellen dar*
- *Ein „Fluten“ des Gemisches, d. h. ein Befeuchten des Gemisches vor Beginn des Quellvorganges, ermöglicht ein schnelles Ausfüllen der vorhandenen Poren mit Flüssigkeit*
- *Bei höheren Fluiddrücken bilden sich auch im gröberen Granulat Fließwege aus. Eine Flutung eines binären Gemisches mit dem ausgewählten Granulatkornband von 1-3 mm sollte deshalb nur mit Fluiddrücken von max. 6 bar realisiert werden.*
- *Stoßartige Belastungen des Fluides, z.B. durch Kolbenstöße von Pumpen, sind zu vermeiden*

- *Nach Ausbildung einer druckseitigen gesättigten Schicht kommt es infolge der mechanischen Wirkung des Fluiddruckes zu einer Kompaktierung des Bentonits. In einem dabei entstehenden fluidgefüllten Spalt sedimentiert der Bentonit. Es entsteht dort ein Bereich mit einer gegenüber der Einbaudichte verringerten Bentonitdichte*
- *Zum Erhalt der Dichtfunktion ist ein kontinuierlicher Übergang der hydraulischen Leitfähigkeit durch Einbau einer druckseitig vorgeschalteten Sand–Bentonit–Schicht zwischen Filtrationsschicht aus Sand und dem binären Bentonitgemisch zu realisieren*

Technikumsversuche in der Stahlrohrversuchsanlage mit 800 mm Durchmesser

Die Technikumsversuche ergaben, dass

- *eine Einbautrockendichte von mindestens $1,6 \text{ g/cm}^3$ erforderlich ist. Dies ist durch den Einsatz von hochverdichteten Briketts ($\Delta_{tr} > 1,9 \text{ g/cm}^3$) und Verwendung spezieller Verdichtungsgeräte (z. B. Vibrationsverdichter) zu realisieren*

Der in-situ-Versuch erfolgte an einem Bohrschacht mit 2,5 m Durchmesser in einer Teufe von 744 m bis 774 m.

Die Flüssigkeitszuführung erfolgte durch eine geneigte Bohrung zwischen der oberen Strecke (744 m-Sohle) und der Druckkammer im Bohrschacht.

Ein Eindringen des Bentonits der Dichtungen in die Schichten der Druckkammer und umgekehrt bei Flüssigkeitsbelastung wurde durch die Abstufung der Druckkammermaterialien von Schotter/Splitt bis zum Feinsand verhindert.

Die Aufgabe der Drainageschicht zwischen oberer Dichtung und oberem Widerlager bestand in der gezielten Fassung der den oberen Dichtungsbereich (Dichtung, Kontaktbereich und angrenzender Gebirgsbereich) möglicherweise durchströmenden Flüssigkeitsmenge.

Durch eine entsprechenden Ungleichförmigkeitsgrad und die gewählte Abstufung der Splittschichten wurde eine gute Verdichtbarkeit in der Filterschicht und der Druckkammer erreicht. Mit der Verdichtung sollte die Setzung dieser Schichten unter Einwirkung von Druck und Flüssigkeit (Druckkammer) verringert werden. Trockene Sandschichten können nicht verdichtet werden.

Kalium beeinträchtigt selbst in geringen Mengen die Dauerbeständigkeit des Montmorillonites. Die Illitisierung ist wesentlich von der Verfügbarkeit von K-Ionen abhängig.

Da für den Bohrschachtversuch keine Langzeitbeständigkeit in der Größenordnung von mehreren Jahren gefordert war, wurde der vorliegende Kaliumgehalt für den Bohrschachtversuch akzeptiert.

Ergebnisse

Mit steigender Fluiddruckbelastung kommt es zu einem zunehmenden Volumenstrom in den Dichtelementen sowie gleichzeitig zu Setzungsvorgängen innerhalb der Dichtelemente. Die Setzungsvorgänge werden begünstigt durch einen Vorlauf von Fluid in der Kontaktzone, da dadurch die Reibung zwischen Dichtelement und Salzoberfläche verringert wird. Die durch die Setzungsvorgänge entstehenden fluidgefüllten Räume im Bereich der Druckkammer werden durch Quelldehnung des Bentonits ausgefüllt. Mit zunehmender Sättigung kommt es auch zur Quelldruckausbildung.

Bei einem Fluiddruck von 6,6 MPa kam es zur Bildung von Wegsamkeiten im oberen Dichtelement entlang der bereits vorgeschädigten Bereiche (Flüssigkeitszutritt während der Flutung; Sand in der Kontaktzone). Nach 39 Tagen waren die Fließwege wieder ausgeheilt. Aus den Messwerten ist abzuleiten, dass es unter der Wirkung der hohen Drücke zu Setzungsvorgängen in den Dichtelementen von einigen Millimetern kommt.

Insgesamt hat der Bohrschachtversuch gezeigt, dass die getesteten Dichtelemente in einem Schacht grundsätzlich bis zu einem Fluiddruck von 7 MPa eine Abdichtung gewährleisten. Das Quellverhalten des Bentonits bewirkt die Abdichtung der durchfeuchteten Bereiche des Dichtelementes, wodurch die Durchlässigkeit verringert wird. Die bei Flüssigkeitsdrücken von 4 MPa und 7 MPa bestimmten Eindringraten zeigen mit der Zeit eine abnehmende Tendenz. Daraus folgt, dass die Dichtwirkung des Verschlusses sich mit der Zeit verbessert. Die in der ursprünglichen Planung vorgesehene Absenkung des unteren Dichtelementes durch die absenkbare Stahlstütze wurde aufgegeben.

Durch stichprobenartige Messungen des Wassergehaltes des umgebenden Steinsalzes nach Beendigung des Versuches wurde festgestellt, dass die Salzlösung bis zu 20 cm in die Kontur eingedrungen ist. Von wesentlicher Bedeutung für das Vorlaufen der Flüssigkeitsfront oder die Umströmung des Dichtelementes über die Kontaktzone des Gebirges dürften die ersten Zentimeter sein, die eine höhere Permeabilität und Porosität aufweisen können, jedoch nicht direkt messbar waren.

Allgemein war während des Ausbaus ein sehr fester Verbund zwischen Bentonit und Salz zu beobachten. Dies zeigt auch, dass durch das Quellverhalten des Bentonits die vorliegenden Unregelmäßigkeiten der Salzkontur ausgeglichen werden.

Schlussfolgerungen:

- Infolge des Flüssigkeitsdruckes tritt eine Nachverdichtung des noch nicht durchfeuchteten Bereiches des Dichtelementes ein, die zu einer Erhöhung der Trockendichte führt.*

Gleichzeitig füllt der Bentonit entstehende fluidgefüllte Hohlräume an der Grenze zur Druckkammer durch seine Quelldehnung aus

- *Als Ursache der kurzzeitigen Öffnung von Wegsamkeiten im oberen Dichtelement wurde das Einspülen von Feinsand aus der Filtrationsschicht (zwischen Dichtelement und Druckkammer) in die Kontaktzone Salz/Bentonit durch die Flutung erkannt. Erst die wiederholte Fluidzuführung ermöglichte einen ausreichenden Quellvorgang mit dem damit verbundenen Selbstheileffekt*
- *Durch den Bentonit beeinflusste Veränderungen der Salzkontur konnten nicht festgestellt werden*
- *Bei der Herstellung des Dichtmaterials ist auf die Vermeidung auch nur geringster Verunreinigungen mit Kalium zu achten. Derartige Verunreinigungen wirken sich negativ auf die Ausbildung des Quelldruckes aus*

Zusammenfassende Betrachtungen und Schlussfolgerungen

Standortwahl und vorbereitende Maßnahmen für die Realisierung eines langzeitstabilen Dichtelementes:

- *Auswahl von Schachtabschnitten mit intakten Steinsalz*
- *Quantifizierung der Auflockerungszone durch Permeabilitätsmessungen*
- *Herstellen einer glatten Kontur am Schachtstoß im Bereich des Dichtelementes*

Es wurde gezeigt, dass sich bei konstantem Flüssigkeitsdruck (Enddruck) mit zunehmender Belastungszeit die Dichtwirkung verbessert und das System einen Gleichgewichtszustand erreicht. Diese Erkenntnisse sind auf alle zukünftigen Schachtverschlüsse im Salinar übertragbar.

Arbeitspaket 5 - Numerische Modelle

Die sich in der modellierten Schottersäule darstellenden Belastungszustände sind eindeutig durch die Wirkung des erwarteten Siloeffektes gekennzeichnet. In den Modellrechnungen unter Modifikation der Füllortgeometrie, d. h. einem berücksichtigten Einfallen der Füllortsohle in Richtung des Schachtes bzw. einer stärkeren Abflachung der Firste am Schachtzutritt, zeigte keine signifikante Verbesserung der Böschungsstabilität. Es wurde festgestellt, dass eine nachhaltige Stabilisierung der Schachtzugangsbereiche eher durch das Eindringen von Verschüttungskörpern zu erreichen ist.

Die numerische Simulation der Schüttguteinbringung erfolgte analog der im Vorversuch angewandten Verfahrensweise durch Versturz aus einem schotterbefüllten Kübelgefäß, mit gleich bleibender Falldistanz zur Oberkante der letzten Schütteebene von 20 m.

Am Schüttkegel zeigte sich eine erhebliche flutungsinduzierte Bewegung in Richtung des freien Schachtzuganges, die eine Abflachung des aufgesättigten Böschungsfußes und ein Nachsacken der überlagernden Materialsäule in dm-Größe zur Folge hatte. In diesem Kontext deutet sich bereits an, dass aus der modelltechnischen Abbildung der Schotterpartikel durch kugelförmige Strukturelemente eine deutlich höhere Bewegungsneigung des Schüttgutes resultiert, als dies für kantige, verzahnungsbegabte und wenig rollfähige Schotterkörper realistisch ist.

Für das Setzungsverhalten einer Verfüllsäule aus Schotter sind die Stabilitätsverhältnisse im Bereich der in den Schachtzugängen frei ausgebildeten Böschungskörper von entscheidender Bedeutung. Das Schüttgut wird nur so weit in den Füllort eingeschoben, bis ein Kraftausgleich eintritt und sich eine stabile Böschungsform ausgebildet hat.

Bestimmend für das Materialverhalten innerhalb der geschlossenen Verfüllsäule ist die nachgewiesene Wirkung des Siloeffektes.

Der Einbau des Schotters hat stets feucht zu erfolgen, um die durch die nachträgliche Durchfeuchtung der Säule aktivierten Setzungserscheinungen zu minimieren.

Die Modellierung wurde unter Verwendung des zweidimensionalen Particle Flow Codes (PFC) durchgeführt.

Die Partikelgeometrie wurde durch eine kombinatorische Zusammenfügung derart verändert, dass eine direkte Verzahnungsfähigkeit der Körper entstand, die zu einer realitätsnäheren Beschreibung des kennzeichnenden Bewegungsverhaltens im modellierten Strukturverband führte.

Die Ergebnisse wiesen innerhalb der Schottersäule Konsolidierungssetzungen im Größenbereich mehrerer Zentimeter bis ein Dezimeter aus.

Es ist zu konstatieren, dass bei Vorgabe der einfachlinearen Anpassungsbeziehung zur Beschreibung der hydraulischen Permeabilitätseigenschaft des Bentonits als Funktion der vorliegenden Trockendichte das räumliche Vordringen der Sättigungsfront im Modell etwas überschätzt wird, während im Fall des Ansatzes der bilinearen Anpassungsform sich deutlich zu schmale Aufsättigungszonen darstellen.

Auf der Grundlage einer räumlichen Modellbildung im numerischen Berechnungsprogramm FLAC 3D wurde der sich im Nahfeld des Bohrschachtes darstellende sekundäre Gebirgsspannungszustand reproduziert und hinsichtlich der Möglichkeit eines durch die Wirkung der aufgeprägten Flüssigkeitsbelastungsstufen hervorgerufenen Dichtheitsverlustes untersucht. Die Berechnungsergebnisse belegten, dass ein durchgreifendes Aufreißen mit fracähnlichem

Versagen der Dichteigenschaft innerhalb des umliegenden Gesteinskörpers ausgeschlossen werden konnte.

Modellgrundlagen

Die Modellierung erfolgt unter Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften mit einem zweidimensionalen rotationssymmetrischen Modell. Die Symmetrieachse liegt dabei in der Bohrschachtachse. Ein solches Modell unterstellt die Homogenität eines Materialbereiches in Umfangsrichtung, so dass unabhängig von dem Drehwinkel der Modellebene gleiche Bedingungen im umgebenden Gestein angenommen werden.

Ergebnisse der hydraulischen Modellierung

Eine Prognoseberechnung bis zur kompletten Durchfeuchtung des Dichtelementes ergab, dass die Feuchtefront unter einer Fluiddruckbelastung von 4 MPa in der Druckkammer nach ca. 400 Jahren das untere Ende der Dichtung erreicht, mit einer sich anschließenden Austrittsrate über die Querschnittfläche der Dichtung von $6,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Jahr}$.

Langzeitsicherheitsbetrachtungen

Selbst bei ungestörter Entwicklung kommt es aufgrund der Konvergenz der Hohlräume im Grubengebäude zu einer Kompression der in der Grube eingeschlossenen Restluft. Der damit verbundene Druckanstieg führt zu einer mechanischen Belastung eines Schachtverschlusses. Zusätzlich zu der in der Grube befindlichen Restluft können durch Korrosionsprozesse im eingelagerten Abfall weitere Gasmengen produziert werden. Die Gasproduktion durch Korrosion setzt zwar das Vorhandensein von Wasser voraus – im Allgemeinen in hinreichendem Maße als Feuchtigkeit im Abfall selbst enthalten. Der von der GRS angenommene Korrosionsmechanismus ist im Unternehmen K+S jedoch nicht unwidersprochen und gilt als wissenschaftlich noch unzureichend belegt.

Kontaminierte Lösung wird – bei ausreichender Menge – durch die Konvergenz wieder über den Schachtverschluss verdrängt. Aufgrund der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Schachtverschlusses können während der Verdrängung der Lösung in Abhängigkeit von der Konvergenzrate hohe Laugendrucke im Inneren des Grubengebäudes auftreten. Der Teufenunterschied zwischen dem Schachtverschluss und den Einlagerungshohlräumen kann dazu führen, dass der durch die Konvergenz der tiefer gelegenen Hohlräume erzeugte Fluiddruck den lokalen Gebirgsdruck am Schachtverschluss überschreitet. Dies kann zu Bildung von neuen Wegsamkeiten im Gebirge oder im Verschluss führen, dem so genannten Frac.

Es ist nach dem momentanen Stand der Diskussion unklar, ob der Gastransport durch Kapillarfluss – also das Verdrängen des Wassers im Schachtverschluss – oder durch Mikrorissbildung im Bentonit erfolgt. Neuere Studien geben aber Hinweise auf den letztgenannten Prozess. Die bisherigen Untersuchungen wurden in anderen Formationen, wie Kristallgestein oder Ton gemacht und eine einfache Übertragung auf Bentonitbarrieren im Salinar ist nicht unbedingt möglich.

In der Praxis kann man eher davon ausgehen, dass ein Schachtverschluss mit einem Bentonitdichtelement nicht gasundurchlässig ist. Ebenso kann die Auflockerungszone des Gebirges eine messbare Gasdurchlässigkeit haben.

Der Abfall sollte in solcher Weise in der Deponie eingelagert werden, dass sich „hinter“ dem Deponiefeld keine weiteren Hohlräume mehr befinden. Weiterhin stellt eine möglichst niedrige Streckenverschlusspermeabilität eine deutliche zusätzliche Sicherheitsfunktion dar.

Der Einsatz von aufwendigeren Schachtverschlussystemen mit mehreren Verschlüssen in unterschiedlichen Teufenlagen des Schachtes könnte dazu geeignet sein, die Druckbelastung der Verschlüsse und die Schadstofffreisetzung zu verringern, was in weitergehenden Modellierungen zu untersuchen wäre. Weiterhin sollten die in dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse für eine hypothetische Untertagedeponie, durch die Modellierung zu einem realen Deponiestandort ergänzt und überprüft werden.

Mohiuddin, G., „Rückhaltung radioaktiver Abfälle Eine Literaturstudie“, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMI (Bundesministerium des Innern), 1985

Ein Problem stellt die Wasserabgabe der Salzhydrate dar. Hierbei handelt es sich um Salzminerale, in deren Kristallstrukturen Wassermoleküle eingebaut sind und bei höherer Temperatur instabil werden (bereits teilweise unter 100°C).

Carnallit setzt hierbei Kristallwasser schon bei 80° bis 224°C frei (je nach Autor). Es ist zu beobachten, dass Carnallit mit steigendem Druck erst bei höheren Temperaturen Kristallwasser abzugeben beginnt.

Baltes, B.; Wernicke, R.S., „Grundsätzliche Aspekte für Verschlussbauwerke im Salinar - Stellungnahme zu einem Modell“, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMI (Bundesministerium des Innern), 1998

Das modellhafte Verschlussbauwerk

Nachweiselemente für Verschlussbauwerke:

- *Dichtigkeit*
- *Lastabtrag*
- *Beanspruchung*
- *Sicherheitspotential*
- *Versagensvorgang*

Das Verschlussbauwerk in einem Endlager für radioaktive Abfälle muss nicht nur die Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung von radiologischen Grenzwerten erfüllen, sondern auch in Herstellung und langfristiger Wirksamkeit robust sein. Das bedeutet Einfachheit in Aufbau, Herstellung und ihrer Qualitätssicherung und geringe Beeinflussung der Gesamtwirksamkeit durch Änderung einzelner Parameter oder Effekte.

Anforderungen an die Materialien des Verschlussbauwerkes

Dichtelement aus Bentonit

Quellvermögen

Der volle Quelldruck wird jeweils erst bei einer Wassersättigung des Bentonits erreicht. Bei inhomogener Durchfeuchtung entstehen auch inhomogene Quelldrücke. Die inhomogene Durchfeuchtung wird u. a. mit der Quellfähigkeit des Bentonits und der damit einhergehenden „Selbstabschirmung“ begründet. Dabei quoll der Bentonit auf und nahm geringe Permeabilitäten an. Die dahinter liegenden Bereiche konnten vom Wasser nur diffus erreicht werden. Somit blieben in Großversuchen die Quelldrücke unter den erwarteten Maximalwerten. Eine homogene Durchfeuchtung des Bentonits ist nur mit einer gezielten Bewässerung zu erreichen.

Daher sind Aussagen zur Dichtwirkung bedingt durch die zu erwartenden Inhomogenitäten sowie den daraus resultierenden Wechselwirkungen zwischen Dichtelement und Gebirge nur schwer vorhersagbar.

Permeabilitäten

Die Permeabilitätsentwicklung geht direkt mit der Entwicklung des Quellens einher. Daher gilt für die räumliche Verteilung der Permeabilitätsentwicklung das Gleiche wie für die Quelldruckentwicklung. Wesentliche Dichtwirkung kommt dem Verschlussbauwerk im Bereich des Saumes zum Gebirge zu. Dies soll im Experiment während der Beaufschlagung mit Wasser/Lauge verfolgt werden.

Tragfähigkeit des Dichtelements

Die im Labortests und halbtechnischen Versuchen ermittelten Stoffgrößen lassen hinsichtlich der gestellten Anforderungen zur Tragfähigkeit, Lastabtragung und Stabilität den Schluss auf Eignung der Bentonite zu. Allerdings sind diese Stoffparameter noch nicht unter realen Bedingungen im Salzgebirge verifiziert worden. Daher sind hierfür noch in-situ-Versuche erforderlich.

Langzeitbeständigkeit

Bentonite als natürliche Analoga müssen vergleichbar sein, d.h. die Belastungsgeschichte (Druck, Temperatur, Laugenzusammensetzung usw.) muss ähnlich der in der Deponie/dem Endlager unter Störfallgesichtspunkten zu erwartenden sein. Hinsichtlich der Anforderungen in einem Genehmigungsverfahren sollte dieser Frage Aufmerksamkeit gewidmet sein. In der Literatur werden die Mineralumwandlung und die mit der Smektitabnahme verbundene starke Erhöhung der Permeabilität thematisiert. Insbesondere wird der Einfluss von Kaliumlauge als sehr lange eingeschätzt. Zur Beurteilung sollten noch weitere Erfahrungen herangezogen werden. Bzgl. der Austrocknungsvorgänge des Bentonits für langzeitliche Auswirkungen muss eine Gesamtbetrachtung unter Einbeziehung des Einflusses des Gebirgssaumes (Auflockerungszonen, hygroskopische Wirkung des Steinsalzes) durchgeführt werden.

Konstruktive Gestaltung

Dichtelemente aus Formsteinen aus hochverdichtetem Bentonit, die zu einem Dichtkörper zusammengefügt werden sollen möglichst im unbeeinflussten Salinarbereich angeordnet werden und mit Wasser/Lauge für die Quelldruckentwicklung beaufschlagt werden.

Sitz, P.; Gruner, M., „Langzeitsichere Verschlüsse für Untertagedeponien und Endlager unter besonderer Berücksichtigung natürlicher Materialien“, Glückauf 132 Nr. 7, 1996

Auslegungsgrundsätze und Auslegungsanforderungen:

- *Es sind nur solche Materialien einzusetzen, deren Langzeitkorrosionsbeständigkeit unter den herrschenden Bedingungen gewährleistet und durch natürliche bzw. historische Analoga bestätigt ist*
- *Die für die Bemessung des Gesamtsystems (Lastannahme, Beanspruchung, Volumenstrom) anzusetzenden Kriterien müssen konservativ und transparent sein und sich auf die kritischen Grenzfälle beziehen*
- *Das Gesamtsystem muss von Anfang an Langzeitsicherheit gewährleisten*
- *Das Gesamtsystem ist (möglichst) so auszulegen, dass es mit zunehmender Zeit durch die Annäherung an Gleichgewichtszustände (Gebirgsdruckausbildung, Kriechvorgänge, Spannungsumlagerung, self sealing) in einen immer sichereren Zustand übergeht*
- *Das Gesamtverschlussystem muss robust und einfach sein, auf bekannten und erprobten Wirkungsweisen beruhen sowie sich durch bekannte und erprobte Verfahren technisch realisieren lassen*
- *Das Gesamtsystem muss strengen Vorschriften der Qualitätssicherung unterliegen*

Es ist eine dichtende Funktion bei den Tragelementen sowie eine tragende Funktion bei den Dichtelementen anzustreben. Diese Funktionen stellen zusätzliche nicht berücksichtigte Sicherheitsreserven dar.

Für hochbelastete statische Widerlager ist der Einsatz von Naturwerksteinen als Baustoff sinnvoll. Hierfür bieten sich vor allem die Basalte an, deren Langzeitbeständigkeit auch im Salinar durch natürliche Analoga, wie z.B. ihr Auftreten im Werra-Fulda-Lagerstättenbezirk, bewiesen ist. Basaltwerksteine zeichnen sich nicht nur durch extreme Festigkeiten (Druckfestigkeit bis 400 MPa, Zugfestigkeit bis 35 MPa, Biegezugfestigkeit bis 65 MPa), sondern auch durch sehr niedrige Porositäten (0,1% bis 1,0%) aus.

Sitz, P., „Stand auf dem Gebiet der untertägigen Verschlüsse unter besonderer Berücksichtigung des Bentoniteinsatzes“, Glückauf 133 Nr. 6, 1997

Ausführungen zum Langzeitverhalten sind für Endlager und Untertagedeponien wichtig.

Das zur Langzeitstabilität angestrebte Stoffgleichgewicht ist nicht von der Zeit, sondern in erster Linie von der Varianz der Umgebungsparameter abhängig. Langzeitstabilität ist gewährleistet, wenn innerhalb des Felds der möglichen Umgebungsparameter Druck, Temperatur und Chemie die Materialeigenschaften konstant bleiben bzw. sich in einem Toleranzbereich bewegen. Dazu müssen die Bentoniteigenschaften nach Zutritt salinarer Lösungen ermittelt werden, wobei neben Kurzzeitprozessen vor allem der stabile Endzustand betrachtet werden muss. Derart stabile Endzustände können nur durch natürliche Analoga ermittelt werden. Ein konservatives natürliches Analogon ist der detritische Toneintrag, der beispielsweise im Endzustand zum Braunroten und zum Roten Salzton führte. Beide Salztone haben 200 Mill. Jahre abdichtend gegenüber wasserführenden Hangendschichten gewirkt. Obwohl der natürliche Salzton im Vergleich zum Bentonit im Verschlussystem ungünstigeren Bedingungen ausgesetzt war, hat er trotz abgeschlossener Mineralumbildung in Richtung Illit/Chlorit langfristig seine Dichtfunktion erfüllt. Ausnahmen traten dort auf, wo der Salzton infolge bergmännischer, das heißt menschlicher Fehler überbeansprucht wurde.

Für Abdichtelemente sind hydraulische Leitfähigkeiten von 10^{-12} bis 10^{-11} m/s ausreichend, wofür bei Süßwassereinwirkung Trockenrohdichten von 1200 bis 1400 kg/m³ erforderlich sind. Bei salinaren Lösungen sind für gleiche hydraulische Leitfähigkeiten Trockenrohdichten zwischen 1600 und 1800 kg/m³ notwendig.

Da ein Vorquellen das wirksame Quellpotential reduziert, ist der Bentonit trocken, zum Beispiel in Form von Blöcken oder Presslingen, einzubauen. Mit hochverdichteten Presslingen in geeigneter Größe, Form und Zusammensetzung, mit denen aufgrund hoher Druck- und Abriebfestigkeit ein einwandfreies Handling möglich ist, können Schüttdichten bis 1500 kg/m³ erreicht werden. Durch Nachverdichtung lassen sich noch höhere Werte erzielen.

Vorteile:

- *Einfacher Einbau*
- *Einfaches Anpassen an die Hohlraumgeometrie*
- *Einbaufehler und Inhomogenitäten werden durch Homogenisierung bei der Sättigung ausgeglichen*
- *Möglichkeit einer schnellen und einfachen Sättigung*
- *Es können mit geschütteten Presslingen bei Süßwassereinwirkung hydraulische Leitfähigkeiten von 10-13 m/s und Quelldrücke bis 10 bar erreicht werden.*

Sitz, P.; Gruner, M., „Möglichkeiten der Bewertung der Langzeitstabilität von Bentonit durch natürliche Analoga“, Conference: Workshop: Natürliche Analoga zur Endlagerung radio-aktiver Abfälle, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1994

Langzeitstabilität von Bentoniten

Natürliche Analoga erbringen den Nachweis der Stabilität über den Zeitraum ihrer Existenz.

Dabei schreibt diese Bewertungsmethode vor,

- *dass es sich um das gleiche, bzw. um vergleichbare Ausgangsstoffe gehandelt hat.*
- *dass die Bedingungen und ihre zeitliche Variationen, denen das geologische Analogon ausgesetzt war, denen gleichgesetzt werden können, die in der UTD oder im Endlager zu erwarten sind.*

Langzeitbeständigkeit wird über den Prozess der Illitisierung beeinflusst. Es kommt zu einer Umwandlung von Montmorillonit zu Illit, was mit einer Abnahme der innerkristallinen Quellfähigkeit zur Folge hat. Für die Bewertung der Langzeitstabilität ist vor allem die Geschwindigkeit der Abnahme der Quellfähigkeit von Bedeutung. Daher ist sowohl die Eigenschaften der Metabentonide bzw. Kalium-Bentonide in den verschiedenen Umwandlungsstufen als auch die Umwandlungsgeschwindigkeit maßgebend. Dieser Prozess ist unter anderem abhängig von der Kaliumverfügbarkeit, wobei er sehr langsam abläuft.

Da sich Ton im Salinar aber als problematischer darstellt, ist hier die Suche nach einem natürlichen Analogon bedeutend.

Pierau, B.; Tegelkamp, M.; Rechtern, J., „Abdichtung von Schächten für Untertagedeponien“, 9. Nationales Felsmechanik Symposium, Editor: Wittke, W. FIZ, Karlsruhe, 1991

Anforderungen an das Verfüllgut:

- *Material muss kleine Wasser- und Gasdurchlässigkeit besitzen*
- *Verfüllgut muss auf Dauer wasserunlöslich und beständig gegen chemische Angriffe sein*
- *Verfüllgut selbst muss umweltverträglich sein*
- *Das verwendete Material soll eine geringe Zusammendrückbarkeit und ein geringes zeitabhängiges Spannungsdehnungsverhalten besitzen*

Es wird sich bei der Verfüllung mit reibungsfestem Material eine Silowirkung einstellen, so dass der aus der Verfüllung auf das Gebirge wirkende Seitendruck ab einer bestimmten Tiefe nicht mehr zunimmt, sondern konstant bleibt. Das Eigengewicht des Verfüllgutes wird über Gewölbewirkung abgetragen. Dies wirkt sich positiv hinsichtlich des Setzungsverhaltens aus, jedoch erreicht der aus der Gewölbewirkung resultierende Seitendruck in der Füllsäule nicht die Größenordnung der ehemals im unverritzten Gebirge herrschenden horizontalen Primärspannungen. Somit lassen sich Auflockerungen des Gebirges im schachtnahen Bereich durch den Druck der Füllsäule nur teilweise reduzieren. Aus diesem Grund ist eine Quellfähigkeit des Füllgutes erwünscht, die zu einem erhöhten Seitendruck in der Füllsäule führt. Weiterhin weisen quellfähige Materialien so genannte selbstheilende Eigenschaften auf, die zu einem selbständigen Verschluss eventuell entstandener Risse im Füllgut führen. Um beide Anforderungen zu erfüllen, soll dem Mineralgemisch ein gewisser Anteil quellfähiger Tonminerale (z.B. Bentonit) beigegeben werden, die bei Zufuhr von Wasser in der Füllsäule quellen und den gewünschten Horizontaldruck bewirken.

Nachteilig beim Ton sind die geringe Festigkeit und die große Verformbarkeit. Darüber hinaus besteht meistens ein ausgeprägt zeitabhängiges Spannungsdehnungsverhalten, das sich in Form von Konsolidations- und Krieberscheinungen äußert. Diese nachteiligen Eigenschaften können jedoch durch die Zugabe von grobkörnigen Mineralstoffen (Sande und Kiese) günstig beeinflusst werden. Es entstehen dann tonige Mineralgemische, die i. a. alle gestellten Anforderungen in zufrieden stellender Weise erfüllen können.

Albrecht, H; Meister, D.; Stork, G-H.; Wallner, M., „Zur Frage des Standsicherheitsnachweises von Hohlräumen in Salzgesteinen“

Salzlagerstätten können auch in Bereichen, in denen der Schichtenaufbau durch die Einlagerung kompetenter Gesteine, wie Anhydrit, Dolomit, Salzton und insbesondere des zu Sprödbbruch und Gebirgsschlag neigende Carnallit gestört sein. Durch die Vielfältigkeit der Einflüsse auf die Standsicherheit ist der im allgemeinen Ingenieurbau übliche Sicherheitsbegriff sowie der dazugehörige Standsicherheitsnachweis auf Untertagebauwerke nicht ohne weiteres anwendbar. Ein auf Grundlage der ingenieurgeologischen-geotechnischen Untersuchungen geführter Standsicherheitsnachweis muss Berechnungen, Messungen während der Bauzeit und des Betriebs, Messungen an praxisbezogenen Großmodellen, Betriebserfahrungen, Dimensionierung und Bauverfahren als aufeinander abgestimmte und sich ergänzende Teile eines umfassenden Gesamtkonzeptes enthalten.

Knickmeyer, W., „Hinweise für das Verfüllen stillgelegter Schächte“, 1969

Für die theoretische Betrachtung der Schachtverfüllung sind folgende physikalische Werte des Füllgutes wesentlich: Kornverteilung und Durchlässigkeit des Füllgutes, Lagerungsdichte, innere Reibung und Wandreibung. Selbst wenn man alle Faktoren ermittelt hat, ist eine Vorausberechnung über das Verhalten des Füllguts schwierig, da es durch die mechanische Beanspruchung und den Einfluss des Wassers verändert wird.

Einigermaßen genau zu ermitteln ist die Silowirkung im Schacht: Durch die Reibung des Füllgutes an der Schachtwand wirkt nur ein Teil des Gewichts der Füllsäule als Kraft auf die Bodenfläche des Schachtes. Die wirksame Höhe der Füllsäule kann berechnet werden, wenn der Winkel der inneren Reibung des Füllguts und der Wandreibungswinkel bekannt sind.

In den mit dem Schacht durchschlägigen Grubenbauen wirkt die Horizontalkomponente des Vertikaldrucks in Richtung der freien Fläche, so dass das Füllgut in den horizontalen Grubenbau hineinlaufen kann. Die Bewegung kommt erst dann zur Ruhe, wenn durch die Reibung des Füllguts am Umfang der Strecke sich eine Kraft aufgebaut hat, die der wirkenden Horizontalkraft entspricht. Die Länge der horizontalen Verfüllung ist abhängig vom Reibungswinkel, von der Wichte des Materials und vom wirkenden Vertikaldruck. Es handelt sich also um ein labiles Gleichgewicht, das durch eine Veränderung der genannten Einflussfaktoren aufgehoben werden kann. Es müssen also Maßnahmen getroffen werden, die eine Stabilisierung des Füllguts im Bereich der horizontalen Grubenbaue herbeiführen. Für die Lagerungsdichte des Materials ist die Verdichtung durch Herabstürzen bedeutsam.

Der versetzte Abschnitt in den Füllrörtern muss so lange sein, dass der Reibungswiderstand des Füllmaterials im horizontalen Grubenbau unter Auftrieb größer ist als der Seitendruck des nicht unter Auftrieb stehenden Füllguts im Schacht. Der Seitendruck und die Länge L des erforderlichen horizontalen versetzten Abschnitts mit dem Sicherheitsfaktor 2 lässt sich nach der DIN 1055 Blatt 6 berechnen.

Köckritz, V.; Sitz, P.; Behrend, J.; Gruner, M., „Tone, Asphalte, Quellschlämme als Materialien für Verschlussbauwerke“

Auch gegenüber bakterieller Einwirkung sind Bitumen sehr resistent. Es ist keine nennenswerte biologische Degradation bekannt.

Diese Aussage wird durch die Tatsache gestützt, dass vor geologisch langen Zeiträumen entstandene Bitumen, z.B. der Asphaltsee in Trinidad biologisch nicht abgebaut worden sind (natürliche Analoga). Des Weiteren sind jungsteinzeitliche Werkzeuge und Geräte aus Fundstätten in Ägypten bekannt, bei denen Bitumen als Bindemittel Verwendung gefunden hat und die biologisch nicht zersetzt wurden. Ebenso sind weit vor Christi Geburt an Euphrat und

Tigris errichtete Bäder, Straßen und Dammbauwerke mit Bitumen als Mörtel bzw. Abdichtmaterial nicht durch biologische Degradation zerstört worden und zum Teil noch heute funktionsfähig.

Unter der Einwirkung von mechanischen Beanspruchungen zeigen die Bitumen und Asphalte ein ausgeprägtes elasto-viskoses Verhalten. Kurzzeitige schlagartige Belastungen werden wie von elastischen Körpern durch elastische Verformungen bzw. Zubruchgehen aufgenommen. Langzeitbelastungen bei geringer Belastungsgeschwindigkeit führen zu einem viskosen Verhalten von Bitumen.

Bitumen können unter diesen Beanspruchungen als hochviskose Flüssigkeiten ohne Fließgrenze und mit einer temperaturabhängigen Strukturviskosität betrachtet und auch mathematisch modelliert werden. (Beim Auftreten von effektiven Spannungen steigt z.B. die Verformungsgeschwindigkeit exponentiell an).

Sitz, P., „Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen“

Die Abdichtwirkung von beschwertem Bitumen ist nur dann gewährleistet, wenn es zu keiner größeren Sedimentation des zugegebenen Feststoffes kommt. Die Sinkgeschwindigkeit eines Feststoffteilchens berechnet sich nach dem STOKES'schen Gesetz.

Aus technologischen Gründen und zur Erzielung einer guten Haftung am Gebirgsstoß ist das Bitumen vor dem Einbringen auf 80° bis 100°C zu erwärmen (Temperaturen > 100°C sollten zur Vermeidung einer Wasserdampfbildung nicht überschritten werden). Um die Sedimentation gering zu halten, ist beim Einbringen von beschwertem B200 eine Schichtdicke von 15 cm nicht zu überschreiten; eine neue Schicht darf erst dann eingebracht werden, wenn die Temperatur der vorhergehenden Schicht $\leq 65^{\circ}\text{C}$ ist.

19.3 Inhaltliche Anforderungen an die konzeptionelle Vorgehensweise in Anlehnung an §55 der HOAI

Die konzeptionelle Vorgehensweise für die vorgelegte Konzeptplanung wird nachfolgend in Anlehnung an die Grundleistungen der Leistungsphase 2 (§55, HOAI) mit schachtverschluss-spezifischer Präzisierung durch die Prüfer und Darstellung des Leistungsumfanges wie folgt definiert:

(1) Analyse der Grundlagen:

- Darlegung des Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar bzw. im wasserlöslichen/wassersensitiven Gebirge anhand bereits realisierter Projekte und wissenschaftlicher Untersuchungen auf nationaler und internationaler Ebene,
- Aufarbeitung der bergbautechnischen Entwicklung der Schachtanlagen Marie und Bartensleben und Identifizierung daraus gegebenenfalls resultierender Beeinträchtigungen der Integrität (Dichtheit) der zu erstellenden Schachtverschlussbauwerke sowie Darlegung der gegenwärtigen bergbaulichen Situation,
- Objektbezogene Darstellung und Diskussion der geologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Situation,
- Vergleich verschiedener Materialien und Konstruktionsprinzipien für die Verschlusskonstruktionen mit besonderer Berücksichtigung der erforderlichen Langzeitbeständigkeit bzw. Langzeitfunktionstüchtigkeit;

(2) Abstimmung der Zielvorstellungen auf die Randbedingungen:

- Zusammenstellung der heranzuziehenden Normen und Richtlinien für das Schachtverschlussprojekt,
- Festlegung der Zielvorgaben und Definition der Anforderungen an die Schachtverschlüsse unter Berücksichtigung der Randbedingungen;

(3) Untersuchung von Lösungsmöglichkeiten mit ihren Auswirkungen auf die bauliche und konstruktive Gestaltung und deren Zweckmäßigkeit unter Beachtung der Umweltverträglichkeit:

- Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes mit einer Gefährdungs- und Einwirkungsanalyse,
- Festlegung von Lastfallkombinationen und Gefährdungsbildern,

- Festlegung der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit in den einzelnen Nachweisführungen und Ermittlung der Größe der vorhandenen Versagenswahrscheinlichkeit sowie Art der praxisbezogenen Hilfsmittel, beispielsweise die Verwendung von Sicherheitsfaktoren, um die Einhaltung der festgelegten bzw. geforderten Bauwerkszuverlässigkeiten zu erreichen,
 - Auswahl geeigneter Baumaterialien für die Verschlussbauwerke mit Eignungsuntersuchung und Nachweisführung insbesondere in Bezug auf ihre Langzeitstabilität sowie ihrer mechanischen und hydraulischen Eigenschaften unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen / Einwirkungen,
 - Erstellung von Konstruktionsprinzipien, die den Anforderungen hinsichtlich der Gefährdungsbilder gerecht werden;
- (4) Erarbeitung eines Planungskonzeptes mit Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten nach gleichen Anforderungen mit zeichnerischer Darstellung und Bewertung:
- Erstellung eines Planungskonzeptes auf Grundlage der herausgearbeiteten Konstruktionsprinzipien und projektbezogenen Anforderungen mit zeichnerischer Darstellung,
 - Untersuchung und Bewertung alternativer Lösungsmöglichkeiten für das Planungskonzept und gegebenenfalls Optimierung des Entwurfes,
 - Nachweisführung mit einem idealisierten Modell nach dem erstellten Sicherheitskonzept und anschließender Darstellung und Interpretation der Berechnungsergebnisse sowie gegebenenfalls Überarbeitung und Optimierung in einem iterativen Prozess, bis alle erforderlichen Nachweise erbracht sind; Einschätzung von Gebirgsparametern für die Nachweisführung zu den Festigkeits- und Verformungseigenschaften sowie zu den hydraulischen Eigenschaften der anstehenden Gebirgsformationen sowie Parameterbestimmung für die Baumaterialien des Schachtverschlusses auf der Grundlage von Versuchen und Erfahrungen sowie Abbildung des Schachtverschlussbauwerkes (technische Konstruktion und umgebendes Gebirge) in ein nachweisbezogen konservativ abstrahiertes Modell, mit dessen Hilfe das Tragwerksverhalten hinreichend zuverlässig beschrieben (prognostiziert) werden kann und die erforderlichen Nachweise nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geführt werden können (physikalische / chemische Modellierung und numerische Simulation).

- Sensitivitätsanalyse mit Parametervariation;
- (5) Klären und Erläutern der wesentlichen fachspezifischen Zusammenhänge, Vorgänge und Bedingungen.
- (6) Überarbeiten des Planungskonzeptes nach Bedenken und Anregungen.
- (7) Zusammenstellung aller Vorplanungsergebnisse und Bewertung der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und der Langzeitbeständigkeit auf der Grundlage von Versuchsergebnissen und Erfahrungen

20 Liste der verwendeten Literatur

- (1) Euratom-Richtlinien /L1/
- (2) Atomgesetz (AtG) /L2/
- (3) Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrlVG) /L3/
- (4) Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /L4/
- (5) Deponieverordnung (DepV) /L5/
- (6) Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall) Teil 1 /L6/
- (7) Richtlinie für das Verfüllen und Abdecken von Tagesschächten; Oberbergamt Clausthal-Zellerfeld – Verfügung vom 14.07.1989 – 10.3–1/89– B II f. 5.2–I– /L7/
- (8) Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. „Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken“ /L8/
- (9) Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. „Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Kavernen“ /L9/
- (10) CEN – Eurocode 1, „Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Bauwerke – Teil 1: Grundlagen der Tragwerksplanung“ /L10/
- (11) CEN – Eurocode 7, „Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“, Teil 1, Allgemeine Regeln /L11/
- (12) DIN 1054:2005-01, „Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau“ /L12/
- (13) SIA – 260, „Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken“ /L13/
- (14) Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI); (1991): in der Fassung der Bekanntmachung vom 4. März 1991 (BGBl. I S. 533) /L14/
- (15) DIN 1055:2002-06, „Einwirkungen auf Tragwerke – Teil : Wichten und Flächenlasten von Baustoffen, Bauteilen und Lagerstoffen“ /L15/
- (16) DIN 1055, „Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 6: Einwirkungen auf Silos und Flüssigkeitsbehälter“ /L16/

- (17) Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (BMI 1983) /L17/
- (18) Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (Vorschlag der GRS) /L18/
- (19) Rahmenrichtlinie für die Gestaltung von Sachverständigengutachten in atomrechtlichen Verwaltungsverfahren -Bek. d. BMI v. 15.12.1983 –RS I 6- 513 820/4-
- (20) Schmidt, M. W.; Fruth, R.; Stockmann, N.; Birthler, H.; Boese, B.; Storck, R.; Sitz, P.; Krauß, A.; Eulenberger, K.-H.; Schleining, J.-P.; Duddeck H.; Ahrens, H.; Menzel, W.; Salzer K.; Minkley W.; Busche H.; Lindloff, U.; Gierenz, S.: „Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken,Vorprojekt“, GSF-Bericht 32/95, GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH, 1995
- (21) Breidung, K. P.; K+S Aktiengesellschaft, Kassel: „Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II“, Abschlussbericht, K+S Aktiengesellschaft Kassel; Bundesministerium für Bildung und Forschung (Bonn), Bad Salzdetfurth, 2002
- (22) Sitz, P.; Gruner, M.: „Möglichkeiten der Bewertung der Langzeitstabilität von Bentonit durch natürliche Analoga“, Sammlung der Vorträge anlässlich des Workshops „Natürliche Analoga zur Endlagerung radioaktiver Abfälle“ am 04. und 05. November 1993 im Kernforschungszentrum Karlsruhe, S.215-224, 1993
- (23) Mohiuddin, G.: „Rückhaltung radioaktiver Abfälle. Eine Literaturstudie“, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMI (Bundesministerium des Innern), 1985
- (24) Baltes, B.; Wernicke, R. S.: „Grundsätzliche Aspekte für Verschlussbauwerke im Salinar - Stellungnahme zu einem Modell“, Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMI (Bundesministerium des Innern), 1998
- (25) Sitz, P.; Gruner, M.: „Langzeitsichere Verschlüsse für Untertagedeponien und Endlager unter besonderer Berücksichtigung natürlicher Materialien“, Glückauf 132 Nr. 7, 1996
- (26) Sitz, P.: „Stand auf dem Gebiet der untertägigen Verschlüsse unter besonderer Berücksichtigung des Bentoniteinsatzes“, Glückauf 133 Nr. 6, 1997

- (27) Sitz, P.; Gruner, M.: „Möglichkeiten der Bewertung der Langzeitstabilität von Bentonit durch natürliche Analoga“, Conference: Workshop: Natürliche Analoga zur Endlagerung radio-aktiver Abfälle, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1994
- (28) Pierau, B.; Tegelkamp, M.; Rechtern, J.: „Abdichtung von Schächten für Untertagedeponien“, 9. Nationales Felsmechanik Symposium, Editor: Wittke, W. FIZ, Karlsruhe, 1991
- (29) Busche, H.: „Das Forschungsprojekt zur Abdichtung von Deponieschächten im Schacht Salzdetfurth II“, Glückauf V134/12, 1998
- (30) Müller-Höppe, N.; Krone, J.; Niehues, N.; Poehler, M.; Raitz von Frentz, R.; Gauglitz: „Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager. Hauptband und Kurzfassung“,
<http://edok01.tib.uni.hannover.de/edoks/e01fb01/331118068.pdf>, 1999
- (31) Häfner, F.; Heinrich, F.; Sitz, P.: „Querschnittsabdichtung von untertägigen Hohlräumen und von Bohrlöchern unter besonderer Berücksichtigung der Endlagerung radioaktiver Abfallprodukte (Teil III)“, Neue Bergbautechnik, 20. Jg., Heft 7, S. 253-257, 1990
- (32) Knoll, P.; Schulte, T.; Lendel, U.: „Verfahren für die Dimensionierung dauerstand-sicherer Verfüllsäulen in Schächten“, Veröffentlichung der GEO-DYN Gesellschaft für Geophysikalisches Messen mbH, Teltow und GTU Ingenieurbüro Knoll - Geotechnischer Umweltschutz, Teltow, 1995
- (33) Albrecht, H.; Meister, D.; Stork, G-H.; Wallner, M.: „Zur Frage des Standsicherheitsnachweises von Hohlräumen in Salzgesteinen“, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
- (34) Knickmeyer, W.: „Hinweise für das Verfüllen stillgelegter Schächte“, Essen, 1969
- (35) Köckritz, V.; Sitz, P.; Behrend, J.; Gruner, M.: „Tone, Asphalte, Quellzemente als Materialien für Verschlussbauwerke“, Arbeitsgespräch „Verschlussbauwerke für untertägige Hohlräume im Salinar und im Hartgestein – Kenntnisstand zur Auslegung und Materialien, offene Probleme“, BMFT für Entsorgung , Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1993

- (36) Sitz, P.: „Querschnittsabdichtungen untertägiger Hohlräume durch Dämme und Pfropfen“
- (37) Schmidt, H.-H.: „Grundlagen der Geotechnik“, B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 2001
- (38) Aberle, B.; Klein, J.; Stadie, U.; Gärtner, D. (1999): Standsicherheitsnachweis für Schacht Bartensleben und Schacht Marie. Abschlussbericht U 461 M4 vom 12.8.1999, Deutsche Montan Technologie GmbH; Essen
- (39) Behlau, J.; Mingerzahn, G.; Bornemann, O. (2000): ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Abschlussbericht. BGR–Bericht, Archiv–Nr. 116872, Hannover, Dezember 2000
- (40) Langkutsch, U. u. a. (1998): ERA Morsleben - Hydrogeologische Standortbeschreibung und Modellgrundlagen. Abschlussbericht, BGR-Bericht, Archiv-Nr. 116 906, Berlin, Juni 1998
- (41) AG Morsleben (2000): Prüfbericht zum geologischen Lagerstättenmodell des ERA Morsleben; Stendal, 31.3.2000
- (42) Wittke, B (1999): Permeabilität von Steinsalz – Theorie und Experiment, WBI-Print e, Verlag Glückauf Essen, 1999
- (43) AG Morsleben (2006): Zwischenbericht zum Schachtverschlusssystem der Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben; Stendal, 20.11.2006

21 Liste der verwendeten Unterlagen

- /U1/ Konzeptplanung der Schachtverschlüsse für die Schächte Bartensleben und Marie des ERA Morsleben (AS Unterlage P 182)
- /U2/ Nachweisführungen zur Langzeitstabilität, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben (AS Unterlage P 177)
- /U3/ Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlusssystem der Schächte Bartensleben und Marie (AS Unterlage G 183)
- /U4/ Preuss, J. & Wellmann, P. L.: „Planungsstudie zum Schachtverschluss der Schächte Bartensleben und Marie“, BfS, 2000
- /U5/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Bartensleben (AS Unterlage I 107)
- /U6/ Geologische und hydrogeologische Situation des schachtnahen Bereiches, Schacht Marie (AS Unterlage I 108)
- /U7/ Untersuchung zur Entwicklung und Bewertung von Stilllegungskonzepten nach dem Abdichtkonzept (AS Unterlage I 114)

22 Zusammenstellung der Hinweise, Empfehlungen und Forderungen

Hinweis H	Empfeh- lung E	Forderung F	Seite	Stichwort
Laufende Nummer				
	1		38	Um der konzeptionell vorgesehenen Lösungs- optimierung gerecht zu werden, sind zwei geeig- nete Grundmodelle zu entwickeln, die Eingang in den Optimierungsprozess finden.
		1	38	Es ist zu prüfen, ob ein langfristig wirksam werdendes Dichtelement „verdichteter Salzgrus“ im Bereich des anstehenden Salzgesteins in die Schachtverschlusssysteme integriert werden kann oder muss.
		2	39	Die Höhe des Bemessungsgrenzwertes von 2 m ³ /a für Fluidströme im Bereich der Schacht- verschlüsse sollte mit Bezug auf das Langzeit- sicherheitskonzept begründet werden.
		3	39	Die Darstellung der Funktion der einzubringenden Tonschicht zwischen beiden Widerlager- Dichtelementen ist gegenständlich zu erbringen.
	2		42	Die in den Schachtverschlusskonzepten verwen- deten Angaben zur Bezeichnung, Lage, Höhe und Schichtenfolge der Schächte Bartensleben und Marie sowie daraus abgeleitete geologische Kon- struktionen sollten auf der Grundlage von /U5/ und /U6/ für bisher vorliegende Prüfunterlagen mit dem Ziel der Datenkohärenz aktualisiert wer- den.
		4	43	Es ist dringend zu klären, ob bzw. wo das Kaliflöz Staßfurt in carnallitischer Ausbildung oder als sylvinitisches Hartsalz vorliegt
1			45	In der Konzeptplanung wird auf Seite 55 darge- legt, dass der stärkste und zugleich letzte Deckge- birgszufluss bei 178 m auftritt. Diese Aussage ist falsch (siehe auch Abb. 3.2.1-3 in /U5/).

		5	45	Die lithologisch-stratigraphisch orientierte Homogenbereichseinteilung in /U5/ und /U6/ muss den geotechnisch dominierten Anforderungen der Schachtverschlussplanung angepasst werden und bedarf daher der Überarbeitung insbesondere unter Berücksichtigung der Kluft- und Zuflussverteilung.
2			45	Die stratigraphischen Bezeichnungen in Anlage 7 der Konzeptplanung /U1/ sind zu korrigieren.
		6	50	Bei der geohydraulischen Modellierung der Volumenströme im Bereich der Schachtverschlüsse sind mögliche Transportwege durch eine nicht vollständig beräumte bzw. durch den Einbau der Dichtelemente gebildete Auflockerungszone des schachtnahen Gebirges zusätzlich zu den bisherigen Modellansätzen zu berücksichtigen
	3		53	Die hydraulischen Eigenschaften der Homogenbereiche des schachtnahen Gebirges sollten einheitlich über Permeabilitätswerte beschrieben werden und nicht über spezifische Durchlässigkeiten, die implizit teufenabhängig variierenden Fluideigenschaften enthalten.
		7	54	Die Annahmen für die Permeabilitäten und die räumliche Ausdehnung der Auflockerungszonen im geplanten Bereich der kombinierten Widerlager-Dichtelemente DE 2 und DE 3 sind für die weiteren Planungsphasen durch repräsentative Messungen zu ermitteln. Dabei ist die konkrete Ausbildung des Salinars und der Schachtgeometrie in den geplanten Teufenbereichen der Dichtelemente zu berücksichtigen.
		8	54	Ein quantitativer Nachweis für die Setzungsstabilität der zusätzlichen 9 m mächtigen Filterschichten ist gegenständlich zu erbringen.
		9	58	Die Setzungsstabilität der vorgesehenen Filterschichtmaterialien aus abgestuften Kiesen, Sanden und Feinsanden ist nachzuweisen.
		10	60	Es ist zu untersuchen, welche Wandrauigkeit in Abhängigkeit von der vorgesehenen Beraubungstechnik erreicht wird. Der Nachweis der Setzungsstabilität ist mit diesen Wandeigenschaften zu führen.

		11	61	Die gesammelten Erfahrungen durch Versuche am Schacht Salzdetfurth II müssen hinsichtlich der Übertragbarkeit bei den Setzungen bzw. Sackungen auf den Schachtverschluss des ERAM.
		12	63	Bereits in der Konzeptplanung sind Angaben zu treffen, ob und in welchen Bereichen des Schachtes ein Berauben der Einbauten und der Auflockerungszone vorgesehen sind sowie Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen, wie die Beraubung betriebstechnisch sowie gerätetechnisch durchgeführt werden kann.
		13	63	Die Problematik von möglichen Ankern, die eine Störung hinsichtlich der Dichtigkeit des anstehenden Wirtsgesteins darstellt, ist in der Nachweissführung angemessen zu berücksichtigen.
		14	65	Es ist zu prüfen, ob der Ansatz eines petrostatischen Drucks grundsätzlich als ungünstigster Lastfall für den Fluiddruck anzusetzen ist.
		15	65	Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Erdbeben für den Standort Morsleben in Abhängigkeit der Magnituden ist zu prognostizieren und eine mögliche Gefährdung für das Verschlussbauwerk zu untersuchen.
		16	67	Es ist eine Konzeptplanung für die konstruktive Ausgestaltung der Füllörter auszuarbeiten. Die Sicherheit der dabei gewählten Konstruktion ist quantitativ zu beurteilen.
		17	69	Es sind konstruktive Lösungen zu erarbeiten, die einen Durchschlag des Fluiddruckes zum Bentonit-Dichtelement verhindern können. Alternativ ist die Unschädlichkeit einer derartigen Einwirkung durch eine geeignete Materialwahl nachzuweisen.
		18	72	Die Zulässigkeit der Übertragung der gesammelten Erfahrungen durch Versuche an den Schächten Salzdetfurth I und II auf das vorliegende Projekt muss hinsichtlich des Siloeffektes kritisch überprüft werden.
		19	74	Da insbesondere die Einbauart mit der Einbring- und Verdichtungstechnik Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes hat, ist diese schon in der Konzeptplanung darzulegen.

		20	74	Vom Antragsteller ist darzulegen und zu beurteilen, ob mit der Entfernung der Auflockerungszone die Zementinjektionen entfernt werden oder ob sie sich, im Falle des Verbleibens im anstehenden Gestein, negativ auf die Langzeiteigenschaften des Bentonits auswirken könnten.
		21	75	Die Übertragbarkeit der Versuche aus dem Forschungsprojekt Salzdetfurth auf das ERA Morsleben ist hinsichtlich der unterschiedlichen Schachtdurchmesser und der gezielten Bewässerung in Salzdetfurth nachzuweisen. Es ist zu untersuchen und zu bewerten, welchen Einfluss eine Teildurchfeuchtung des Dichteelementes auf die Wirksamkeit der restlichen Bentonitbereiche hat. Die Auswirkungen von Setzungen auf die Dichtigkeitsfunktion sind zu untersuchen und ihre Unbedenklichkeiten zu belegen.
		22	78	Die Berechnungen der numerischen Nachweise sind nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen, wonach ein dreidimensionales Berechnungsmodell heranzuziehen ist.
		23	78	Es sind zusätzlich unabhängige geomechanische Berechnungen für den Schacht Bartensleben durchzuführen.
		24	79	Die Nachweiskriterien, Berechnungen und Auswertungen der numerischen Nachweise sind schlüssig, vollständig und nachvollziehbar darzulegen.
	4		79	Das elasto-plastische Stoffgesetz, das hier zugrunde gelegt wird, sollte nachvollziehbar und schlüssig dargelegt werden.
3			79	Die Aussage, dass ein Stoffgesetz die elastischen Kennwerte Elastizitätsmodul E und Querdehnungszahl (n) charakterisiert, ist falsch.

		25	87	Die Herleitung der charakteristischen Werte für die Nachweisführung muss schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein. Ungeachtet der nicht bekannten Streubreite ist die Festlegung der charakteristischen Werte auf Grundlage von teilweise nur einem durchgeführten in-situ-Versuch der Aufgabenstellung nicht angemessen.
		26	87	Die Festlegungen der Teilsicherheitsbeiwerte in der Nachweisführung müssen schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein und auf der Grundlage eines geschlossenen Sicherheitskonzeptes definiert werden.
		27	89	Es ist ein geschlossenes Sicherheitskonzept zu erarbeiten. Die Bedeutung von Termini, die aus bestehenden Eurocodes übernommen werden, ist im Sachkontext des erarbeiteten Konzeptes zu definieren.
		28	89	Alle möglichen Einwirkungen sind im Sicherheitskonzept angemessen zu berücksichtigen. Risikoeinschätzungen müssen auf der Grundlage einer Nachweisführung begründet sein und schlüssig, vollständig und nachvollziehbar dargelegt werden.
		29	90	Die im Sicherheitskonzept festgelegten Grenzzustandsgleichungen sind einzuhalten und eine quantitative Aussage über das erreichte Sicherheitsniveau ist zu treffen.
		30	92	Die spezifische Problematik des anstehenden Carnallitits muss herausgearbeitet werden und die daraus resultierenden Konsequenzen für die Nachweisführung abgeleitet werden.
		31	93	Die Randbedingungen des Schachtes hinsichtlich des anstehenden Gesteins sowie die Schachtgeometrien sind vollständig darzulegen und in der Nachweisführung zu berücksichtigen, was auch eine detaillierte Betrachtung des Bereiches der Korkenzieherwendel beinhaltet.

		32	93	Die Problematik des Bereiches unterhalb von 400 m im Schacht Marie mit Mauerwerksabriss und Laugenstand ist bereits in der Konzeptplanung zu berücksichtigen. Es sind Lösungsmöglichkeiten aufzuzeigen und ihre Machbarkeit betriebs- sowie gerätetechnisch nachzuweisen.
		33	96	Es sind spezifische Nachweise für die möglicherweise auftretenden Dichtigkeitsprobleme im Bereich der Korkenzieherwendel zu führen und eine Darstellung der konstruktiven Durchbildung zu erbringen.
		34	96	Die Herleitung der Sicherheitsfaktoren bei den kombinierten Widerlager-Dichtelementen DE 1 und DE 2 und die Darstellung der Ergebnisse müssen schlüssig, vollständig und nachvollziehbar sein.