



Stilllegung des ERA Morsleben

3. Zwischenbericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte)

– Bewertung P 218 –

BS-Projekt-Nr. 0108-03/15

erstellt im Auftrag des

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt
des Landes Sachsen-Anhalt
Olvenstedter Straße 4
39108 Magdeburg

durch die

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Aachen, 05.05.2011

Anmerkung:

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers (BS) wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.



AUTOREN

Dieser Bericht wurde von folgenden Bearbeitern erstellt:

Brenk Systemplanung GmbH, Aachen

- Dipl.-Phys. S. Kistingner

TU Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, Clausthal-Zellerfeld

- Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh
- Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. K.-H. Lux

Es wird versichert, dass dieser Bericht nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und ohne Ergebnisweisung angefertigt worden ist.

Unterschrift Projektleiter	Unterschrift Geschäftsführung
----------------------------	-------------------------------



ZUSAMMENFASSUNG

In der Unterlage [P 218] werden

- erforderliche Sicherheitsnachweise („Nachweiserfordernisse“) aufgeführt,
- Sicherheitsnachweismethoden beschrieben und
- Sicherheitsnachweiskriterien¹ zusammengestellt,

mit denen die Sicherheit des ERAM im Hinblick auf Standsicherheit und Integrität sowohl für den Zeitraum der Stilllegung und unmittelbar danach („Bauzustände“) als auch in der Nachbetriebsphase („stabile Endzustände“) nachgewiesen werden sollen.

In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts werden die Bewertungsmaßstäbe angegeben. Diese sind

- für die Vollständigkeit und den Inhalt der Nachweiserfordernisse verschiedene rechtliche Regelwerke,
- für die Nachweismethodik der Stand von Wissenschaft und Technik, der sich aus der Deponieverordnung, Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der DGEG und dem Eurocode 7 ableiten lässt, und
- für die Nachweiskriterien ebenfalls der Stand von Wissenschaft und Technik.

In Kapitel 4 werden die in [P 218] aufgeführten Nachweiserfordernisse geordnet wiedergegeben (s. Tabelle 1) und auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Da die Grundlage mancher Nachweiserfordernisse unklar ist und zum Teil voneinander abweichende Angaben innerhalb der Unterlage [P 218] als auch Unterschiede gegenüber den Angaben im Plan zur Stilllegung [A 281] bestehen, empfehlen wir eine systematische Ableitung und präzise Formulierung der Nachweiserfordernisse:

- F 1: Vom BfS sollte eine Aufstellung aller Nachweiserfordernisse vorgelegt werden, die zur Erlangung einer Plangenehmigung für die Stilllegung des ERAM zu erfüllen sind.**
- F 2: Vom BfS sollte dargelegt werden, aus welchen Forderungen im gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk diese Nachweiserfordernisse entstammen bzw. wie sie aus diesen abgeleitet wurden.**
- F 3: Vom BfS sollten bei der Formulierung der aus dem Regelwerk abgeleiteten Nachweiserfordernisse unbestimmte Begriffe vermieden bzw. definiert werden.**
- F 4: Soweit das BfS „sekundäre“ Nachweiserfordernisse aufstellt, die nicht unmittelbar aus den Regelwerken abgeleitet werden sondern sich aus einer Aufspaltung einer Nachweisführung in Teilnachweise ergeben, sollte dies im Rahmen der in F 1 und F 2 geforderten Darlegung erläutert werden.**

¹ Ein wesentliches Element der Nachweisführung zu den verschiedenen Nachweiserfordernissen ist der Vergleich eines bestehenden bzw. prognostizierten Zustands mit sogenannten Nachweiskriterien. Diese haben die Form von Ungleichungen für bestimmte den Zustand charakterisierende Größen (wie mechanische Spannungen, Verformungen oder die Temperatur).



Tabelle 1: Nachweiserfordernisse (NW) zum Nachweis der *Sicherheit der Bauzustände* und der *stabilen Endzustände* (nach [P 218]).

	Sicherheit der Bauzustände	stabile Endzustände ²⁾
Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“		
NW der Begrenzung der Senkung der Tagesoberfläche	(1)	(1) ³⁾
NW der Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden	(2)	
Schutzziel „Barrierenintegrität“		
NW des Erhalts der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume	(3)	((2))
NW einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume	(4)	(3)
NW der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel	(5)	
NW Schutz der obersten Anhydritschollen ¹⁾	(6)	((4))
Schutzziel „Arbeitssicherheit“		
NW der Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen	(7)	

(x) = Nachweis erforderlich

((x)) = Nachweis wünschenswert, aber nicht erforderlich

¹⁾ Das Nachweiserfordernis „Schutz der obersten Anhydritschollen“ umfasst den „*Nachweis der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung in der jeweils obersten Anhydritscholle, wenn der Anhydrit ein potentieller Lösungspfad ist. Alternativ dazu ist der Nachweis der Unterschreitung der Bruchgrenze des Anhydrits oder einer Zustandsverbesserung des Anhydrits möglich.*“ ([P 218] S. 12)

²⁾ Es werden zwei Endzustände betrachtet: (a) trockenes Endlager, (b) vollgelaufenes Endlager

³⁾ alternativ (es ist nur einer der beiden Nachweise zu führen)

In Kapitel 5 werden die Angaben in [P 218] zur Methodik der Nachweisführung wiedergegeben und bewertet. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass die Angaben in [P 218] nicht im Widerspruch zu den Anforderungen der Deponieverordnung und den Empfehlungen der DGEG stehen. Sie sind jedoch so allgemein gehalten, dass sie nicht daraufhin überprüft werden können, ob die Nachweismethodik diese Forderungen erfüllt bzw. ob sie sachgerecht ist und dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Da die Angaben zur Nachweismethode auf verschiedene Unterlagen verteilt sind ([P 212], [G 216], [P 218], [P 214], [P 215], [P 224], [P 234], [P 243], [P 245], ...), kann die Nachweismethodik erst nach Prüfung dieser Unterlagen abschließend bewertet werden.

In Kapitel 6 werden die Angaben in [P 218] zu den Nachweiskriterien wiedergegeben und bewertet. Grundsätzlich ist eine Bewertung der Nachweiskriterien erst dann zweckmäßig, wenn die zugrunde liegenden Nachweiserfordernisse feststehen. Dies setzt die Erfüllung der in Kapitel 4 abgeleiteten



Forderungen F 1 bis F 4 voraus. Da schon jetzt absehbar ist, dass einige der vom BfS aufgeführten Nachweiserfordernisse unstrittig sind oder zumindest in ähnlicher Form zu erbringen sind, prüfen wir in Kapitel 6 trotz dieser Einschränkung die in [P 218] angegebenen Nachweiskriterien. Im Ergebnis der weiteren Prüfung der Nachweiserfordernisse kann es jedoch durchaus sein, dass einzelne Nachweiskriterien entfallen oder modifiziert werden müssen und dass andere hinzukommen. Die Bewertungen in Kapitel 6 stehen unter diesem Vorbehalt.

Im Ergebnis der Prüfungen formulieren wir Forderungen (F), Einschätzungen (E) und Hinweise (H):

- Forderungen betreffen Kritikpunkte, die nach unserer Einschätzung einer Nachbearbeitung durch das BfS bedürfen. Wir empfehlen der Genehmigungsbehörde, diese Forderungen dem BfS gegenüber zu erheben.
- Einschätzungen betreffen Beurteilungen, die wir bei der Bewertung der Einzelnachweise zugrunde legen werden.
- Hinweise geben wir im Zusammenhang mit den Nachweiserfordernissen zum Schutz der Erdoberfläche. Inhaltlich entsprechen sie Einschätzungen und Forderungen. Wir haben sie jedoch als Hinweise formuliert, da wir empfehlen, diese Sachverhalte durch die zuständige Bergbehörde bewerten zu lassen.

Wir kommen zu insgesamt 16 Forderungen, 6 Einschätzungen und 5 Hinweisen, auf die wir an dieser Stelle lediglich verweisen, da sie nur im Zusammenhang mit den Ausführungen in Kapitel 4 und 6 verständlich sind.

Kapitel 7 enthält ein Glossar und Kapitel 8 das Literaturverzeichnis.



INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG	1
2. BERICHTSAUFBAU	3
3. BEWERTUNGSMAßSTÄBE	4
4. NACHWEISERFORDERNISSE	6
4.1. Angaben in [P 218]	6
4.2. Bewertung	7
4.2.1. Bewertung auf Vollständigkeit	7
4.2.2. Bewertung auf Plausibilität	10
5. NACHWEISMETHODIK	17
5.1. Angaben in [P 218]	17
5.2. Bewertung	17
5.2.1. Bewertungsmaßstab	17
5.2.1.1. DIN ENV EN 1997-1	18
5.2.1.2. Deponieverordnung und Empfehlungen der DGEG	19
5.2.2. Bewertung der Angaben in [P 218]	21
5.2.2.1. Bewertung der Sicherheitselemente	21
5.2.2.2. Bewertung der Nachweismethode	23
6. NACHWEISKRITERIEN	25
6.1. Begrenzung der Senkung der Tagesoberfläche	25
6.1.1. Angaben in [P 218]	25
6.1.2. Bewertung	25
6.2. Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden	26
6.2.1. Angaben in [P 218]	26
6.2.2. Bewertung	27
6.3. Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume ..	27
6.3.1. Angaben in [P 218]	27
6.3.2. Bewertung	29
6.3.2.1. Vollständigkeit der Kriterien für die Barrierenintegrität	29
6.3.2.2. Kombination der Kriterien für die Barrierenintegrität	32
6.3.2.3. Dilatanzkriterium	36
6.3.2.4. Fluidkriterium	38



6.3.2.5. Kriterium für die Vergleichsverzerrung	38
6.4. Ausreichend dicke Salzbarriere für „nicht zutrittsgefährdete“ Grubenräume.....	39
6.4.1. Angaben in [P 218]	39
6.4.2. Bewertung.....	39
6.5. Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel	40
6.5.1. Angaben in [P 218]	40
6.5.2 Bewertung.....	41
6.6. Schutz der obersten Anhydritschollen.....	41
6.6.1. Angaben in [P 218]	41
6.6.2. Bewertung.....	42
6.7. Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen	44
6.7.1. Angaben in [P 218]	44
6.7.2. Bewertung.....	47
7. GLOSSAR.....	51
8. LITERATUR	52



1. EINLEITUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat beim zuständigen Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) die Durchführung des Planfeststellungsverfahrens nach § 9 b Atomgesetz (AtG) zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) beantragt. Der Stilllegung des ERAM liegt ein Sicherheitskonzept zugrunde, das im Plan zur Stilllegung des ERAM [A 281] in Verbindung mit weiteren Verfahrensunterlagen dargelegt wird. Die Brenk Systemplanung GmbH (BS) wurde vom MLU beauftragt, im Rahmen des Prüfkomplexes 8 (PK 8; geotechnische Aspekte) die geotechnischen Teile dieses Sicherheitskonzepts auf Plausibilität und Vollständigkeit zu prüfen.

Gegenstand des PK 8 ist die Prüfung,

- ob die vom BfS unter geotechnischen Gesichtspunkten angeführten Nachweiserfordernisse und die verwendete Nachweismethodik sachgerecht und vollständig sind,
- ob und wenn ja welche Nachweiserfordernisse zu ergänzen oder zu ersetzen sind bzw. ob und wenn ja wie die Nachweismethodik zu ändern ist und
- ob die eingereichten Unterlagen den Anforderungen aus den Nachweiserfordernissen und der Nachweismethodik genügen.

Im Zentralteil der Grube Bartensleben wurden Hohlräume im Rahmen der bergbaulichen Gefahrenabwehr im Zentralteil (bGZ) schon vor Beginn der eigentlichen Stilllegungsmaßnahmen verfüllt. Da in den nicht verfüllten Grubenbauwerken des ERAM grundsätzlich ein weiterer Sicherheitsverzehr auftritt, ist eine vorzeitige Verfüllung weiterer Grubenbaue des ERAM noch vor dem Planfeststellungsbeschluss denkbar. Solche Maßnahmen könnten z. B. als Änderungen der bestehenden Dauerbetriebsgenehmigung separat beantragt werden, würden allerdings auch den Anforderungen aus dem Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung unterliegen bzw. müssten unschädlich im Hinblick auf die Stilllegung sowie auf die Einhaltung der langfristigen Ziele der Stilllegung sein. Für eine vorzeitige Verfüllung sind gegenwärtig Teile des Lagers H im Grubengebäude Marie in Diskussion. Aufgrund des dortigen Lösungszutritts und aufgrund seiner Funktion als Stapelraum für im Havariefall zutretende Lösungen ist auf diesen Grubenteil jedoch ein besonderes Augenmerk zu richten.

Ein weiterer Gegenstand des PK 8 ist deshalb die Prüfung,

- welche (ggf. zusätzlichen) Nachweiserfordernisse sich im konkreten Fall einer vorgezogenen Verfüllung des Lagers H ergeben und
- ob die zu Lager H vorliegenden Unterlagen diesen Anforderungen genügen.

Die Prüfung zu PK 8 wird in die Prüfung der Verfahrensunterlagen und Nachweise auf Plausibilität und Vollständigkeit (Phase 1) und die inhaltliche Prüfung der Verfahrensunterlagen und Nachweise (Phase 2) untergliedert. Gemäß unserem Angebot vom 03.02.2009 sind zu Phase 1 dieser Prüfung im Rahmen der Arbeitspunkte (AP) 1 bis 4 vorgesehen:

AP 1: Vorabprüfung der Standsicherheit und des stabilen Endzustands für das Lager H im Sinne einer Ersteinschätzung.



- AP 2: Darstellung und rechtliche Bewertung des Sicherheitskonzepts des BfS und Konkretisierung der Vorgehensweise bei der weiteren Prüfung der Planunterlagen.
- AP 3: Prüfung der dem Themenbereich „Geomechanik, Standsicherheit“ zugeordneten Verfahrensunterlagen auf Plausibilität und Vollständigkeit.
- AP 4: Identifikation von Fragen zwecks Konkretisierung der Anforderungen an die inhaltliche Prüfung von Unterlagen bzw. Nachweisen in der nachfolgenden Phase 2 der Arbeiten.

Der vorliegende dritte Zwischenbericht beinhaltet die Bewertung der Prüfunterlage [P 218] im Rahmen der Arbeiten zu AP 3.

Im Ergebnis der Prüfungen formulieren wir Forderungen (F), Einschätzungen (E) und Hinweise (H):

- Forderungen betreffen Kritikpunkte, die nach unserer Einschätzung einer Nachbearbeitung durch das BfS bedürfen. Wir empfehlen der Genehmigungsbehörde, diese Forderungen dem BfS gegenüber zu erheben.
- Einschätzungen betreffen Beurteilungen, die wir bei der Bewertung der Einzelnachweise zugrunde legen werden.
- Hinweise geben wir im Zusammenhang mit den Nachweiserfordernissen zum Schutz der Erdoberfläche. Inhaltlich entsprechen sie Einschätzungen und Forderungen. Wir haben sie jedoch als Hinweise formuliert, da wir empfehlen, diese Sachverhalte durch die zuständige Bergbehörde bewerten zu lassen.



2. BERICHTSAUFBAU

In der Unterlage [P 218] werden

- erforderliche Sicherheitsnachweise („Nachweiserfordernisse“) aufgeführt,
- Sicherheitsnachweismethoden beschrieben und
- Sicherheitsnachweiskriterien² zusammengestellt,

mit denen die Sicherheit des ERAM im Hinblick auf Standsicherheit und Integrität sowohl für den Zeitraum der Stilllegung als auch in der Nachbetriebsphase nachgewiesen werden sollen.

In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts werden die Bewertungsmaßstäbe angegeben. Diese sind

- für die Vollständigkeit und den Inhalt der Nachweiserfordernisse verschiedene rechtliche Regelwerke,
- für die Nachweismethodik der Stand von Wissenschaft und Technik, der sich aus der Deponieverordnung, Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der DGEG und dem Eurocode 7 ableiten lässt, und
- für die Nachweiskriterien ebenfalls der Stand von Wissenschaft und Technik.

In Kapitel 4 werden die in [P 218] aufgeführten Nachweiserfordernisse geordnet wiedergegeben und auf Vollständigkeit und Plausibilität geprüft. Da die Grundlage mancher Nachweiserfordernisse unklar ist und zum Teil voneinander abweichende Angaben innerhalb der Unterlage [P 218] als auch Unterschiede gegenüber den Angaben im Plan zur Stilllegung [A 281] bestehen, empfehlen wir eine systematische Ableitung und präzise Formulierung der Nachweiserfordernisse (Forderungen F 1 bis F 4).

In Kapitel 5 werden die Angaben in [P 218] zur Methodik der Nachweisführung wiedergegeben und bewertet.

In Kapitel 6 werden die Angaben in [P 218] zu den Nachweiskriterien wiedergegeben und bewertet. Grundsätzlich ist eine Bewertung der Nachweiskriterien erst dann zweckmäßig, wenn die zugrunde liegenden Nachweiserfordernisse feststehen. Dies setzt die Erfüllung der in Kapitel 4 abgeleiteten Forderungen F 1 bis F 4 voraus. Da schon jetzt absehbar ist, dass einige der vom BfS aufgeführten Nachweiserfordernisse unstrittig sind oder zumindest in ähnlicher Form zu erbringen sind, prüfen wir in Kapitel 6 trotz dieser Einschränkung die in [P 218] angegebenen Nachweiskriterien. Im Ergebnis der weiteren Prüfung der Nachweiserfordernisse kann es jedoch durchaus sein, dass einzelne Nachweiskriterien entfallen oder modifiziert werden müssen und dass andere hinzukommen. Die Bewertungen in Kapitel 6 stehen unter diesem Vorbehalt.

Kapitel 7 enthält ein Glossar und Kapitel 8 das Literaturverzeichnis.

² Ein wesentliches Element der Nachweisführung zu den verschiedenen Nachweiserfordernissen ist der Vergleich eines bestehenden bzw. prognostizierten Zustands mit sogenannten Nachweiskriterien. Diese haben die Form von Ungleichungen für bestimmte den Zustand charakterisierende Größen (wie mechanische Spannungen, Verformungen oder die Temperatur).



3. BEWERTUNGSMAßSTÄBE

Der Prüfung der Unterlage [P 218] legen wir die folgenden Bewertungsmaßstäbe zugrunde:

Vollständigkeit der Nachweiserfordernisse

Für die Bewertung der Vollständigkeit der Nachweiserfordernisse sind die entsprechenden Anforderungen aus

- dem atom- und strahlenschutzrechtlichen Regelwerk,
- dem bergrechtlichen Regelwerk in Hinblick auf den Schutz von menschlichem Leben und Gesundheit sowie weiterer Schutzgüter (vgl. § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 bis 9 und Absatz 2 BBergG) sowie
- weiteren Fachrechten zum Schutz der im Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) genannten Schutzgüter

zugrunde zu legen. Da das Atomgesetz (AtG) die „nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden“ (vgl. § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG) fordert, sind bei der Bewertung der Vollständigkeit der Nachweiserfordernisse zusätzlich die internationalen Empfehlungen und Vorgehensweisen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu berücksichtigen.

Nachweismethoden

Für die Bewertung der bei der Stilllegung des ERAM anzuwendenden Methoden zur Erbringung dieser geforderten Sicherheitsnachweise bestehen keine verbindlichen Vorgaben. Hier fordert das AtG die „nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden“ (vgl. § 7 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG).

Die in [P 218] beschriebenen Nachweise für die Sicherheit der Bauzustände und für den stabilen Endzustand entsprechen aufgrund des gleichen Wirtsgesteins (Salz) und der gleichartigen Schutzziele (Schutz der Biosphäre vor dem Eintrag schädlicher Stoffe) dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis für Untertagedeponien im Salzgestein. Deshalb kann die dort angewendete Vorgehensweise zur Ermittlung des Stands von Wissenschaft und Technik herangezogen werden. In Anhang 2 Abschnitt 2.1.4 DepV sind Anforderungen an den geotechnischen Standsicherheitsnachweis für Untertagedeponien im Salzgestein zusammengestellt, die als Bewertungsmaßstab herangezogen werden können. Weitere Angaben zur Durchführung eines geotechnischen Sicherheitsnachweises enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der DGEg – Ablagerungen in Bergwerken – (hier insbesondere Kapitel 4) [DGEg 93]. Bei der Bewertung der in [P 218] geschilderten Nachweismethoden legen wir die Anforderungen dieser Unterlagen zugrunde.

Die DIN EN 1997-1 („Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln“) und DIN EN 1997-2 („Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds“) gelten für den Hoch- und Ingenieurbau, worunter das Grubengebäude des ERAM nach unserem Verständnis nicht zu



rechnen ist³. Unabhängig hiervon können sie jedoch bzgl. allgemeiner Grundsätze und Vorgehensweisen herangezogen werden.

Nachweiskriterien

Für die Bewertung der vom BfS als „Nachweiskriterien“ bezeichneten funktionalen Zusammenhänge und deren Parametrisierungen bestehen keine verbindlichen Vorgaben. Wir orientieren uns deshalb wie bei den Nachweismethoden an dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Wie oben ausgeführt existieren keine verbindlichen Vorgaben, wie die geotechnischen Sicherheitsnachweise zu führen sind. Vor diesem Hintergrund stellen wir an die Ableitung und Darstellung der Nachweiskriterien die Anforderungen, dass

- sie nachvollziehbar und vollständig dokumentiert sind,
- die gewählten Zahlenwerte für die zulässigen Zustandsgrößen dem Sachverhalt entsprechen und hinreichend belegt sind,
- durch die Nachweise eine Beurteilung der projektbezogenen Gefährdungen erfolgen kann und
- die Summe der Nachweise abdeckend ist.

³ Hiervon unabhängig ist die Tatsache, dass einzelne Bauwerke wie z. B. die Abdichtungen durchaus als Ingenieurbauwerke eingestuft werden können.



4. NACHWEISERFORDERNISSE

4.1. Angaben in [P 218]

Nach [P 218] sind die *Sicherheit der Bauzustände*⁴ und der *stabile Endzustand* nachzuweisen. Der Nachweis der *Sicherheit der Bauzustände* umfasst die in Tabelle 3-1 Spalte 2 aufgeführten sieben Nachweiserfordernisse (NW).

Tabelle 4-1: Nachweiserfordernisse (NW) zum Nachweis der *Sicherheit der Bauzustände* und der *stabilen Endzustände* (nach [P 218]).

	Sicherheit der Bauzustände	stabile Endzustände ²⁾
Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“		
NW der Begrenzung der Senkung der Tagesoberfläche	(1)	(1) ³⁾
NW der Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden	(2)	
Schutzziel „Barrierenintegrität“		
NW des Erhalts der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume	(3)	((2))
NW einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume	(4)	(3)
NW der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel	(5)	
NW Schutz der obersten Anhydritschollen ¹⁾	(6)	((4))
Schutzziel „Arbeitssicherheit“		
NW der Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen	(7)	

(x) = Nachweis erforderlich

((x)) = Nachweis wünschenswert, aber nicht erforderlich

¹⁾ Das Nachweiserfordernis „Schutz der obersten Anhydritschollen“ umfasst den „*Nachweis der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung in der jeweils obersten Anhydritscholle, wenn der Anhydrit ein potentieller Lösungspfad ist. Alternativ dazu ist der Nachweis der Unterschreitung der Bruchgrenze des Anhydrits oder einer Zustandsverbesserung des Anhydrits möglich.*“ ([P 218] S. 12)

²⁾ Es werden zwei Endzustände betrachtet: (a) trockenes Endlager, (b) vollgelaufenes Endlager

³⁾ alternativ (es ist nur einer der beiden Nachweise zu führen)

⁴⁾ Bauzustände sind nach [P 218] „*vorübergehende Bemessungssituationen [...], die ursächlich durch den Bauvorgang selbst hervorgerufen sind.*“



Auf Seite 11 wird angegeben, dass diese Nachweise „*quantitativ*“ zu führen sind, wobei nicht erläutert wird, was hierunter verstanden wird.

Durch das NW „Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel“ soll sichergestellt werden, dass die Hydratationswärme des Salzbetons keinen Einfluss auf die Grundwasserströmung im Deckgebirge hat.

Durch das NW „Schutz der obersten Anhydritschollen“ soll erreicht werden, dass sich in den obersten Anhydritschollen thermisch oder mechanisch bedingt keine neuen Wasserwegsamkeiten bilden.

Weiterhin sind für den „stabilen Endzustand“ des trockenen und des vollgelaufenen Endlagers die 4 in Tabelle 3-1 Spalte 3 aufgeführten NW zu erbringen, wobei die NW ((2)) und ((4)) als fakultativ angesehen werden. Die nicht vorhandene Notwendigkeit zur Erfüllung der NW ((2)) und ((4)) wird in [P 218] damit begründet, dass Zutritte in zutrittsgefährdeten Abbauen im Langzeitsicherheitsnachweis behandelt werden, bei Erfüllung der Kriterien jedoch die Wahrscheinlichkeit erhöhter Zutrittsraten in das Endlager abnimmt.

4.2. Bewertung

4.2.1. Bewertung auf Vollständigkeit

Aus [P 218] geht nicht hervor, weshalb nach Auffassung des BfS genau diese Nachweiserfordernisse bestehen. Es bleibt unklar, aus welchen Forderungen im gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk diese Nachweiserfordernisse vom BfS entnommen bzw. abgeleitet wurden und ob aus Sicht des BfS weitere Nachweiserfordernisse mit geotechnischem Hintergrund an die Stilllegung des ERAM bestehen, die es jedoch nicht dem in [P 218] behandelten Komplex „Standicherheit und Integrität“ zuordnet.

In Abschnitt 3.4.3 in [P 218] werden zum NW (7) („Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen“) Ausführungen zur Bewertung der Arbeitssicherheit gemacht, die über das genannte Nachweiserfordernis (Zustandsverbesserung) hinausgehen:

1. Es wird angegeben, dass die Arbeitssicherheit durch technisch-organisatorische Maßnahmen (Messprogramm, Vorsorgekonzepte) gewährleistet werden kann. Dies lässt den Schluss zu, dass nach Auffassung des BfS der Nachweis zu erbringen ist, dass die Arbeitssicherheit gewährleistet ist. Dieser Nachweis könne – müsse aber nicht – durch den Nachweis der Zustandsverbesserung erbracht werden.
2. Es werden neben einem Lastpfadkriterium zur Überprüfung der Zustandsverbesserungen auch andere Kriterien (für die Kurzzeitbruchfestigkeit, die Zugspannung, die Druckspannung, die Dilatanz und die Hauptverzerrung) zur Bewertung der Arbeitssicherheit aufgeführt (s. Abschnitt 6.7 in diesem Gutachten). Diese Kriterien erlauben zwar Aussagen zur Arbeitssicherheit zu dem Zeitpunkt, für den die Berechnung durchgeführt wird, nicht aber darüber, ob sich der Zustand des Salzes zu diesem Zeitpunkt verbessert oder verschlechtert.



Aus [P 218] geht nicht eindeutig hervor,

- ob unter NW (7) aus Sicht des BfS eigentlich (nur) der Nachweis für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit zu erbringen ist und das Nachweiserfordernis der Zustandsverbesserung lediglich ein hieraus abgeleitetes Nachweiserfordernis ist, das in manchen Fällen für den Nachweis der Gewährleistung der Arbeitssicherheit ausreichend ist, oder
- ob unter NW (7) aus Sicht des BfS der Nachweis für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit und der Nachweis der Verbesserung der Barriereneigenschaften des Gebirges zu erbringen ist und das Nachweiserfordernis der Zustandverbesserung ein aus beiden abgeleitetes Nachweiserfordernis ist⁵, oder
- ob unter NW (7) aus Sicht des BfS der Nachweis der Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen als ein eigenständiges Nachweiserfordernis zu erbringen ist.

Weiterhin bestehen zwischen den Angaben im Plan und in [P 218] Unterschiede bzgl. der zu erbringenden Nachweiserfordernisse:

- Laut Plan ist die Begrenzung der Senkungsrate an der Tagesoberfläche nachzuweisen, nach [P 218] gilt dies jedoch für die (integrale) Senkung und die Schiefstellung.
- Laut Plan ist die Barrierenintegrität der Einlagerungsbereiche nachzuweisen. Nach [P 218] ist jedoch
 - für die „nicht zutrittsgefährdeten“ Grubenräume eine ausreichend dicke Salzbarriere und
 - für die „zutrittsgefährdeten“ Grubenräume der Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität nachzuweisen.
- Im Plan werden die Nachweiserfordernisse „Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel“ und „Schutz der obersten Anhydritscholle“ nicht erwähnt.
- Im Plan werden zusätzliche Nachweiserfordernisse wie „Standsicherheit der Schächte auch bei Erdbeben“ und „Beherrschung von Schachtwasser- und Lösungszutritten“ aufgeführt, die in [P 218] nicht erwähnt werden.

Nach unserem Verständnis liegt dies darin begründet, dass in [P 218] nur ein Teil der im Rahmen der Stilllegung zu erbringenden Nachweiserfordernisse aufgeführt werden. Dies sollte in [P 218] klargestellt werden und es sollte angegeben werden, auf welchen Teil der Nachweiserfordernisse sich die Unterlage beschränkt. Wir weisen an dieser Stelle darauf hin, dass die Berücksichtigung der Auswirkungen eines Erdbebens u. E. kein eigenständiger geotechnischer Nachweis ist, sondern vielmehr ein Lastfall, der im Rahmen der Nachweise zur Standsicherheit zu berücksichtigen ist.

⁵ In [P 218] wird auf S. 21 in diesem Zusammenhang die „Standsicherheit der Barrieren“ erwähnt, s. Abschnitt 6.7.2 in diesem Gutachten.



Das NW (4) („NW einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume“) ist unklar formuliert:

Als *nicht zutrittsgefährdet* definiert das BfS Grubenbaue,

- die mehr als 130 m unter dem Salzspiegel liegen oder
- die mehr als 60 m vom Salzspiegel und mehr als 25 m von Anhydritschollen oder Kalilagern entfernt sind, die eine Verbindung zum Deckgebirge aufweisen.

Der Begriff „Salzbarriere“ wird in [P 218] jedoch nicht definiert:

- Sofern das BfS unter „Salzbarriere“ Salzgestein unabhängig von seinem Zustand (ungestört oder gestört) versteht, ist dieses NW per Definition stets erfüllt, so dass uns der Sinn dieses NW unklar ist. Andererseits fehlt dann jedoch ein Nachweis, dass für Grubenbaue, die diese geometrischen Bedingungen erfüllen, ein Lösungszutritt durch das Gebirge auch langfristig ausgeschlossen ist bzw. dass das diese Grubenbaue umgebende Gebirge eine dauerhafte Barrierenintegrität aufweist.
- Sofern das BfS unter „Salzbarriere“ ungestörtes Salzgestein versteht, müsste das NW entsprechend präzisiert werden.

Die Nachweisführungen in [P 214, P 215, P 224, P 234, P 243 und P 245] legen nahe, dass in [P 218] die erste (und für uns nicht einsichtige) Formulierung gemeint ist.

Wir empfehlen deshalb:

F 1: Vom BfS sollte eine Aufstellung aller Nachweiserfordernisse vorgelegt werden, die zur Erlangung einer Plangenehmigung für die Stilllegung des ERAM zu erfüllen sind.

F 2: Vom BfS sollte dargelegt werden, aus welchen Forderungen im gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk diese Nachweiserfordernisse entstammen bzw. wie sie aus diesen abgeleitet wurden.

Für die Umsetzung der Nachweiserfordernisse ist es erforderlich, dass diese klar formuliert sind. Dies möchten wir an drei Beispielen verdeutlichen:

- Die oben wiedergegebene Definition des Begriffs „Bauzustände“ ist unbestimmt. Sie lässt offen, ob mit „Bauvorgang“
 - lediglich die beantragten Stilllegungsarbeiten,
 - die Maßnahmen der bGZ und die beantragten Stilllegungsarbeiten oder
 - alle bergmännischen Tätigkeiten seit Beginn der Auffahrung der Gruben

gemeint sind. Weiterhin wäre bei Verwendung dieser Definition der Begriff *Bemessungssituation* für den vorliegenden Fall zu präzisieren. Nach unserem Verständnis sollten die Nachweise nicht für diskrete Zustände, sondern für klar definierte Zeiträume erbracht werden⁶.

⁶ Dies schließt nicht aus, dass der Nachweis für einen Zeitraum dadurch erfolgt, dass er für einen Zustand geführt wird, der für den Zeitraum konservativ abdeckend ist. Dies ist dann jedoch darzulegen.



- Aufgrund der langfristig ablaufenden Prozesse (hier insbesondere der Konvergenz und der Gasbildung) ist unklar, wie der „stabile Endzustand“ definiert ist.
- Als NW (3) wird in [P 218] für die „zutrittsgefährdeten“ Grubenräume das Nachweiserfordernis *Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität* erhoben. Um diese Nachweise führen zu können, müssen die Begriffe „(Barrieren-)Integrität“ und „Erhalt der (Barrieren-)Integrität“ eindeutig definiert sein.

Wir empfehlen deshalb:

F 3: Vom BfS sollten bei der Formulierung der aus dem Regelwerk abgeleiteten Nachweiserfordernisse unbestimmte Begriffe vermieden bzw. definiert werden.

4.2.2. Bewertung auf Plausibilität

NW zum Schutzziel „Schutz der Tagesoberfläche“

Die Forderung nach dem Schutz der Tagesoberfläche ist nicht strahlenschutzrechtlicher, sondern bergrechtlicher Natur (in Verbindung mit weiteren Fachrechten zum Schutz von Schutzgütern). Hierbei sind die Auswirkungen, die die Verformung der Erdoberfläche auf die verschiedenen Schutzgüter haben können, zu berücksichtigen (wie der Einfluss von Schiefstellungen und differenziellen Senkungen auf die mechanische Integrität von Kultur- und sonstigen Sachgütern, der Einfluss von Senkungen auf die chemische Integrität von Kultur- und sonstigen Sachgütern (durch Änderung des chemischen Milieus im Untergrund infolge von Grundwasserschwankungen) sowie auf den Boden (Vernässung) u. a.).

Es ist zweckmäßig, die Schutzgüter dadurch zu schützen, dass die sie potentiell schädigenden Verformungen der Erdoberfläche – absolute Senkungen, differenzielle Senkungen und Schiefstellungen – begrenzt werden. In wieweit aus § 1 Nr. 1 a UVP-V Bergbau abgeleitet werden kann, dass bzw. unter welchen Bedingungen differenzielle Senkungen und Schiefstellungen nicht berücksichtigt werden müssen, sollte durch die zuständige Bergbehörde bewertet werden. Wir möchten jedoch auf zwei Sachverhalte aufmerksam machen, die für uns nicht einsichtig sind:

- Das BfS hält für die Phase der Bauzustände eine Begrenzung von Senkung und Schiefstellung für geboten, für die Nachbetriebsphase aber nur eine Begrenzung von einem von beiden. Diese Ungleichbehandlung wird nicht begründet.

Die Begrenzung der Senkungen zielt auf mögliche Schäden oder Beeinträchtigungen durch das Grund- oder Oberflächenwasser, die Begrenzung der Schiefstellung zielt auf mögliche Schäden oder Beeinträchtigungen in Folge mechanischer Einwirkungen auf Bauwerke und Maschinen. Aus diesem Grund sind Senkung und Schiefstellung unabhängig voneinander zu betrachten und können sich nicht wechselseitig substituieren. Wir geben deshalb den Hinweis:

H 1: Senkungen und Schiefstellungen sollten auch in der Nachbetriebsphase als zwei unabhängig voneinander zu begrenzende Größen angesehen werden.

- Als Referenzzeitpunkt für die Berechnung der Schiefstellung wählt das BfS den Zeitpunkt des Beginns der Stilllegungsarbeiten. Wenn aber das Auftreten eines Gebäudeschadens vom Überschreiten einer (integralen) Schiefstellung seit Bestehen des Gebäudes abhängt und wenn



während und nach Abschluss der Stilllegung keine deutlichen bergbaubedingten Gebäudeschäden auftreten sollen, müsste als Referenzzeitpunkt der spätere der beiden Zeitpunkte „Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten“ und „Errichtung des betroffenen Gebäudes“ gewählt werden. Aus Praktikabilitätsgründen empfehlen wir, die Berechnungen für zwei Referenzzeitpunkte durchzuführen, nämlich den Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten und den vorgesehenen Beginn der Stilllegungsarbeiten (s. Hinweis H 3 in Abschnitt 6.2.2).

NW zum Schutzziel „Barrierenintegrität“

Gegenwärtig ist ungeklärt, ob und wenn ja welche Nachweiserfordernisse sich im Hinblick auf die Eigenschaften der das Endlager umgebenden Gesteinsschichten aus dem Atom- und Strahlenschutzrecht ergeben. Es ist offen, ob sich die Anforderungen an die das Endlager umgebenden Gesteinsschichten lediglich indirekt aus der Langzeitsicherheitsanalyse und den in diesem Rahmen erfolgten Abschätzungen der langfristigen potentiellen Strahlenexpositionen ergeben, oder ob aufgrund der fehlenden Prognoseeigenschaft dieser Dosisabschätzungen hiervon unabhängige Anforderungen an die Gesteinsschichten (wie z. B. „Barrierenintegrität“ der Salzgesteinsbarriere) gestellt werden.⁷

Bis zur Klärung der atom- und strahlenschutzrechtlichen Bewertungsmaßstäbe für die Stilllegung des ERAM gehen wir hilfsweise von den im Folgenden erläuterten Nachweiserfordernissen BI-1 bis BI-4 aus⁸. Hierbei verwenden wir die nachfolgend definierten Begriffe:

- Mit **Barrierenintegrität** bezeichnen wir den Ausschluss von Wegsamkeiten für Stoffströme in einem Gebirgsbereich. Für einen Grubenbau (oder ein Bergwerk) ist Barrierenintegrität dann gegeben, wenn es von einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich vollständig umschlossen wird, in dem Wegsamkeiten für Stoffströme ausgeschlossen sind. Diesen Zustand bezeichnen wir im Folgenden auch als „globale Barrierenintegrität“. Für Gestein (oder einen beliebigen Teilbereich des Gebirges), in dem Wegsamkeiten ausgeschlossen sind, verwenden wir den Begriff „lokale Barrierenintegrität“. Für ein Bergwerk ist somit die (globale) Barrierenintegrität dann gegeben, wenn es von einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich vollständig umschlossen wird, in dem die lokale Barrierenintegrität gegeben ist. Aufgrund ihrer für den Stoffaustrag aus dem ERAM geringen Bedeutung und zur Vereinfachung der Darstellung vernachlässigen wir im Folgenden den rein diffusiven Stofftransport und bezeichnen mit Barrierenintegrität den Ausschluss von Wegsamkeiten für Fluide.
- Mit **Barrierewirkung** bezeichnen wir das Maß, mit dem ein Gebirgsbereich die Ausbreitung von Stoffen behindert. Die Barrierewirkung des Gesteins resultiert aus seiner Eigenschaft, die Ausbreitung von Fluiden zu behindern, und seiner Eigenschaft, Stoffe zu retardieren (z. B. durch Sorption) und ihre Diffusion zu behindern.

Zunächst ist zu prüfen, ob bzw. für welche Grubenbaue eine Barrierenintegrität des umgebenden Gebirges für den gegenwärtigen Zustand nachgewiesen werden kann. Nach gegenwärtigem Stand

⁷ Bzgl. der Definition der von uns verwendeten Begriffe verweisen wir auf Kapitel 7.

⁸ BI steht für „Barrierenintegrität“.



von Wissenschaft und Technik kann dieser Nachweis der Barrierenintegrität für den gegenwärtigen Zeitpunkt nur durch die (Teil-)Nachweise erfolgen, dass

- (a) die Grubenbaue von einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich umschlossen werden, der im geogenen (prämontanen) Zustand keine Wegsamkeiten für Stoffströme aufwies,
- (b) es in diesem Gebirgsbereich einen ausreichend mächtigen Teilbereich gibt, der diese Eigenschaft aufgrund der bisherigen bergbaulichen Arbeiten noch nicht verloren haben kann (unter Berücksichtigung von bergbauinduzierten Spannungsverhältnissen, aber auch von Bohrungen), und
- (c) gegenwärtig der Grube keine Fluide zutreten, die in Verbindung mit einem Bereich außerhalb dieses intakten Gebirgsbereichs stehen.

Diese Teilnachweise fassen wir zusammen zum Erfordernis

⇒ Analyse des das ERAM umgebenden Gebirges bzgl. Barrierenintegrität im gegenwärtigen Zustand (**BI-1**).

Stand von Wissenschaft und Technik ist, die Analyse bzgl. Barrierenintegrität rechnerisch zu führen. Mittels eines numerischen geomechanischen Modells wird gezeigt, dass in der intakten Gebirgsbarriere⁹ in der Vergangenheit zu keiner Zeit Spannungs- und Verformungsverhältnisse geherrscht haben, die zu einer Verletzung der lokalen Barrierenintegrität geführt haben können.

Für Grubenbaue, für die der Nachweis der (globalen) Barrierenintegrität geführt werden kann, gehen wir von der Forderung aus, dass diese Barrierenintegrität erhalten bleibt. Die Barrierenintegrität des umgebenden Gebirges kann nur dann verloren gehen, wenn die intakte Gebirgsbarriere durch Auffahrungen (inkl. Bohrungen) oder/und durch die aktuellen und künftigen Spannungsverhältnisse im Gebirge entsprechend stark geschädigt wird¹⁰. Hieraus ergibt sich folgende Forderung an die Stilllegung:

- Auffahrungen (inkl. Bohrungen) im Rahmen der Stilllegung des ERAM sollen nach Möglichkeit nicht innerhalb der intakten Gebirgsbarriere erfolgen. Insbesondere dürfen sie die (globale) Barrierenintegrität nicht gefährden.

Weiterhin ergibt sich das folgende Nachweiserfordernis:

⇒ Für Grubenbaue, bei denen für den gegenwärtigen Zeitpunkt die Barrierenintegrität des sie umgebenden Gebirges nachgewiesen werden kann, ist der Nachweis des Erhalts der Barrierenintegrität für die Zeit der Stilllegung und für die Nachbetriebsphase zu erbringen. (**BI-2**)

Stand von Wissenschaft und Technik ist, diesen Nachweis rechnerisch zu führen. Mittels eines numerischen geomechanischen Modells wird gezeigt, dass in einem ausreichend mächtigen Teil der intakten Gebirgsbarriere künftig zu keiner Zeit Spannungs- und Verformungsverhältnisse herrschen werden, die zu einer Verletzung der lokalen Barrierenintegrität führen können.

⁹ Als **intakte Gebirgsbarriere** bezeichnen wir einen Gebirgsbereich, der bzgl. eines Grubenbaus oder eines Bergwerks die (globale) Barrierenintegrität gewährleistet.

¹⁰ Sonstige FEP (z. B. Subrosion) klammern wir im Rahmen dieses Gutachtens von der Betrachtung aus.



Sofern für das ERAM die globale Barrierenintegrität nicht nachgewiesen werden kann, ist durch die Verwahrung (u. A.) anzustreben, ein mögliches Volllaufen des ERAM so weit wie möglich zu verhindern bzw. zu verzögern. Es ist anzustreben, dass

- keine neuen Laugenzuflüsse entstehen,
- bestehende Laugenzuflüsse sich nicht verstärken und
- bestehende Laugenzuflüsse nach Möglichkeit schwächer werden oder sogar versiegen.

Für Grubenbaue, für die der Nachweis der (globalen) Barrierenintegrität nicht geführt werden kann, ist deshalb zu fordern, dass die Barrierewirkung des die Grubenbaue umgebenden Gebirges erhalten bleibt und sich so schnell und weitgehend wie möglich verbessert. Insbesondere ist zu vermeiden, dass die Gebirgsbarriere¹¹ durch Auffahrungen (inkl. Bohrungen) oder/und durch die aktuellen und künftigen Spannungsverhältnisse im Gebirge weiter geschwächt wird¹². Hieraus ergibt sich folgende Forderung an die Stilllegung:

- Auffahrungen (inkl. Bohrungen) im Rahmen der Stilllegung des ERAM sollen nach Möglichkeit nicht innerhalb der Gebirgsbarriere erfolgen. Insbesondere dürfen sie die Barrierewirkung des die Grubenbaue umgebenden Gebirges nicht beeinträchtigen.

Weiterhin ergibt sich das folgende Nachweiserfordernis:

- ⇒ Für Grubenbaue, bei denen für den gegenwärtigen Zeitpunkt die Barrierenintegrität des sie umgebenden Gebirges rechnerisch nicht nachgewiesen werden kann, ist der Nachweis zu erbringen, dass sich die Barrierewirkung des die Grubenbaue umgebenden Gebirges nicht verschlechtert. Wenn dieser Nachweis nicht erbracht werden kann, ist nachzuweisen, dass die vorgesehenen Stilllegungsmaßnahmen die Verschlechterung soweit wie mit verhältnismäßigen Mitteln erreichbar minimieren. **(BI-3)**
- ⇒ Für Grubenbaue, bei denen für den gegenwärtigen Zeitpunkt die Barrierenintegrität des sie umgebenden Gebirges rechnerisch nicht nachgewiesen werden kann, ist der Nachweis zu erbringen, dass sich die Barrierewirkung des die Grubenbaue umgebenden Gebirges so schnell und so weit wie mit verhältnismäßigen Mitteln erreichbar verbessert. **(BI-4)**

Entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik werden diese Nachweise rechnerisch geführt. Mittels eines numerischen geomechanischen Modells ist zu zeigen, dass sich die Bereiche, in denen die Spannungs- und Verformungsverhältnisse zu einer Verletzung der lokalen Barrierenintegrität (und damit zur Ausbildung neuer bzw. zur Verstärkung schon bestehender Wegsamkeiten) führen können, nicht weiter vergrößern, sondern so rasch und weitgehend wie möglich zurückgehen. Weiterhin sollten die sich einstellenden Spannungs- und Verformungsverhältnisse die Rückbildung einer Wegsamkeit begünstigen.

¹¹ Als **Gebirgsbarriere** bezeichnen wir einen Gebirgsbereich, der den Stofftransport zwischen der Biosphäre und einem Grubenbau oder einem Bergwerk behindert.

¹² Wir weisen darauf hin, dass die Entwicklung von Laugenzuflüssen über bestehende Wegsamkeiten nicht nur von den Spannungszuständen im Gebirge, sondern auch von anderen Einflussfaktoren wie Mehrphaseneffekten (bei Anwesenheit von Gas und Flüssigkeit in der Wegsamkeit) oder Lösungsprozessen abhängen. Auch wenn es künftig zu keiner geomechanisch bedingten Weitung von Wegsamkeiten kommen sollte, ist ein Ansteigen der Laugenzuflüsse möglich.



Nach unserer Auffassung sind die Nachweiserfordernisse (BI-2) bis (BI-4) auch für die Nachbetriebsphase obligatorisch zu erbringen. Das BfS sieht die NW „Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität“ und „Schutz der Anhydritscholle“ für den Zeitraum des „stabilen Endzustands“ lediglich als „wünschenswert“ an. Diese Differenz sollte im Ergebnis der Erfüllung der Forderungen F 1 und F 2 aufgeklärt werden.

Das NW (3) des BfS („Erhalts der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume“) gibt diese Anforderungen nur unvollständig wieder, da es

- „nicht zutrittsgefährdete“ Grubenbaue von der Nachweisführung ausschließt,
- nicht berücksichtigt, dass sich eine temporäre Verschlechterung der geologischen Barriere ggf. nicht ausschließen lässt und
- die Forderung des NW BI-4 nicht beinhaltet.

Der Inhalt des NW (4) des BfS („ausreichend dicke Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume“) ist uns unklar (s. o.).

Das NW (5) („Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel“) ist nach unserem Verständnis ein abgeleitetes NW. Primäres Ziel ist der Nachweis, dass durch die Versatarbeiten keine Beeinflussung der Deckgebirgswässer erfolgt, wobei die rechtliche Grundlage für das Erfordernis dieses primären Nachweises unklar bleibt. Weiterhin ist uns nicht ersichtlich,

- weshalb dieses NW dem Komplex „Standicherheit und Integrität“ zugeordnet ist,
- ob mit „Deckgebirgswässern“ auch die Grundwässer im Hutgestein gemeint sind und
- ob mit „Beeinflussung der Deckgebirgswässer“ ausschließlich die Beeinflussung ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften oder auch ihrer Fließwege und Fließgeschwindigkeiten gemeint sind.

Eine Erhöhung der Temperatur am Salzspiegel kann grundsätzlich verschiedene Konsequenzen haben:

- Sie kann aufgrund von thermischer Expansion – und untergeordnet auch aufgrund der Änderung der Kriechraten – zu Änderungen des Spannungszustands am Übergang der (sich unterschiedlich stark ausdehnenden) Gesteine des Hutgesteins und des Salzgebirges führen, ggf. begleitet von Änderungen in der Wasserwegsamkeit am Salzspiegel.
- Sie kann (in geringem Maß) zu Lösungsprozessen am Salzspiegel führen, sofern dort eine wässrige Lösung ansteht.
- Sie kann die Dichte und die Viskosität der im Hutgestein und insbesondere in der DGL anstehenden Lösungen ändern und dadurch Einfluss auf deren Strömungsfeld haben.

Weiterhin kann die Temperaturerhöhung am Salzspiegel als (qualitativer) Indikator für eine thermische Beeinflussung des Grundwasserflusses in den Gesteinen über dem Hutgestein und ggf. auch an der Flanke des Salzstocks dienen.

Eine Begrenzung des Temperaturanstiegs am Salzspiegel kann auch den Zweck haben, die Konsequenzen eines Temperaturanstiegs im Rahmen einer anderen Nachweisführung vernachläss-



sigen zu können. Bei der in F 1 und F 2 geforderten Ableitung und Formulierung der NW sollte klar erkennbar sein, zu welchen Zwecken das NW (5) aufgestellt wurde.

Das NW (6) („Schutz der obersten Anhydritscholle“) ist nach unserem Verständnis eine aus dem NW (3) abgeleitete Forderung, wobei gegenwärtig offen bleibt, weshalb sich das Schutzerfordernis auf die jeweils oberste Anhydritscholle beschränkt. Sofern die thermisch-mechanische Beanspruchung der obersten Anhydritschollen ein Faktor ist, der die Barrierenintegrität beeinflusst, muss sie bei der Nachweisführung zu NW (3) (bzw. zu (BI-2) bis (BI-4)) berücksichtigt werden. Diese Nachweisführung kann aber in verschiedene Teilnachweise (TNW) zerlegt werden:

TNW 1: Die Verbesserung der Barriereigenschaften ist gegeben unter der Bedingung, dass die oberste Anhydritscholle nicht zusätzlich thermomechanisch beansprucht wird.

TNW 2: Die oberste Anhydritscholle wird nicht zusätzlich thermomechanisch beansprucht.

Eine entsprechende Zerlegung der Nachweisführung wird in [P 218] aber nicht erläutert.

Sofern NW (3) unter Berücksichtigung aller relevanten thermomechanischen Effekte geführt wird, ist NW (6) nicht erforderlich. Der Nachweis des Schutzes der obersten Anhydritscholle würde in diesem Fall jedoch zusätzliche Sicherheit und zusätzliches Vertrauen in den gesamten Sicherheitsnachweis bringen (im Rahmen einer international empfohlenen mehrgleisigen Sicherheitsargumentation).

Zur Klärung solcher Zusammenhänge empfehlen wir:

F 4: Soweit das BfS „sekundäre“ Nachweiserfordernisse aufstellt, die nicht unmittelbar aus den Regelwerken abgeleitet werden sondern sich aus einer Aufspaltung einer Nachweisführung in Teilnachweise ergeben, sollte dies im Rahmen der in F 1 und F 2 geforderten Darlegung erläutert werden.

NW zum Schutzziel „Arbeitssicherheit“

Aus den Ausführungen in Abschnitt 3.4.3 in [P 218] schließen wir, dass das NW (7) („Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen“) ein abgeleitetes NW ist. Nach unserem Verständnis wird es vom BfS aus einem übergeordneten NW „Gewährleistung der Arbeitssicherheit“ abgeleitet:

- In Abschnitt 3.4.3 von [P 218] wird zunächst angegeben, dass zur Bewertung der Arbeitssicherheit während der Verfüllmaßnahmen verschiedene Kriterien herangezogen werden (bzgl. Kurzzeitbruchfestigkeit, Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Dilatanz des die Grubenräume umgebenden Steinsalzes und Verzerrung). Auf S. 21 wird dann angegeben, dass „*beim Fehlen von lokalen Bruchkörpern*“ der Nachweis der Zustandsverbesserung hinreichend für den (Arbeits-) Sicherheitsnachweis sei, da sich das ERAM „*derzeit [...] offensichtlich in einem sicheren Zustand befindet*“.¹³

¹³ Der Verweis auf den offensichtlich sicheren Zustand des ERAM ist hier unverständlich. Er würde nur dann Sinn machen, wenn der Einschub „*beim Fehlen von lokalen Bruchkörpern*“ ausdrücken soll, dass lokale Bruchkörper im ERAM fehlen und deshalb der Nachweis der Zustandsverbesserung ausreichend ist. Aus Abschnitt 3.4.3 in [P 218] geht aber hervor, dass es offensichtlich auch Bereiche gibt, in denen lokale Bruchkörper vorliegen können.



- Aus den Ausführungen in Abschnitt 3.5 entnehmen wir, dass im Rahmen der Bewertung des Arbeitsschutzes untersucht werden soll, ob lokale Bruchkörper ausgeschlossen werden können, und dass bei Bedarf geeignete zusätzliche Beobachtungen oder/und technisch-organisatorische Maßnahmen durchgeführt werden sollen.

Damit geht der Nachweis der Gewährleistung des Arbeitsschutzes deutlich über den Nachweis der Zustandsverbesserung hinaus.

Es bleibt unklar, weshalb in Abschnitt 3.2 in [P 218] lediglich das Nachweiserfordernis der Zustandsverbesserung aufgeführt wird. Vom BfS sollte dies im Rahmen der Erfüllung von F 1 und F 2 dargelegt werden. Hierbei sollte sprachlich klar zwischen

- **der Sicherheit, dass ein Bruchereignis (Löserfall, Schwebenbruch, Pfeilerbruch) nicht erfolgen kann, und**
- **der Sicherheit, dass durch ein (mögliches) Bruchereignis kein Personenschaden erfolgen kann,**

differenziert werden. Es sollte klar dargestellt werden, welche Sicherheit nachzuweisen ist.

Sonstige NW:

Mögliche andere NW im Zusammenhang mit dem Komplex „Standicherheit und Integrität“ sind:

- Ausschluss eines nicht beherrschbaren Wasserzutritts zur Grube (B-2)
- Schutz von Bodenschätzen (SG 1)
- Schutz von anderen Bergwerken (SG 2)
- Schutz vor schädlichen Oberflächenwasserveränderungen (in Folge von Senkungen)¹⁴ (W-5)

Aus dem Plan zur Stilllegung [A 281] geht hervor, dass auch nach Auffassung des BfS weitere NW zu erfüllen sind. Dass die oben aufgelisteten sonstigen NW nicht in [P 218] erwähnt werden, führen wir darauf zurück, dass diese vom BfS nicht dem Komplex „Standicherheit und Integrität“ zugeordnet werden. Da der Plan keine systematische und übersichtliche Aufstellung aller erforderlichen NW enthält, sollten vom BfS an einer anderen Stelle alle NW-Erfordernisse systematisch abgeleitet und zusammengestellt werden. Dort wäre auch darzulegen, welche dieser NW vom BfS dem Komplex „Standicherheit und Integrität“ zugeordnet werden und welche anderen Komplexen. Aus diesem Grund beschränken sich die von uns empfohlenen F 1 und F 2 nicht auf den Komplex „Standicherheit und Integrität“.

¹⁴ ggf. abgedeckt durch „Schutz der Tagesoberfläche“



5. NACHWEISMETHODIK

5.1. Angaben in [P 218]

Nachweis der Sicherheit der Bauzustände

Der Nachweis der Sicherheit für den Zeitraum der „Bauzustände“, der nach unserem Verständnis von [P 218] die 7 in der zweiten Spalte von Tabelle 3-1 aufgeführten NW umfasst, soll „*unter Einbeziehung*“ von fünf „*Sicherheitselementen*“ erfolgen. Die fünf Sicherheitselemente sind:

1. Allgemeine Einschätzung (Befahrung)
2. Baugrunduntersuchungen (Wirtsgesteinsuntersuchungen)
3. Berechnungen (hierunter werden nach [P 218] (S. 13) auch Plausibilitätsbetrachtungen verstanden) und geotechnische Analyse
4. Systematische Beobachtungen bzw. Messungen
5. Vorsorgekonzept

Zunächst werden die ersten drei Sicherheitselemente umgesetzt. Lässt sich auf dieser Basis kein hinreichendes Sicherheitsniveau nachweisen, kann auf die beiden folgenden Sicherheitselemente zurückgegriffen werden.

Nachweis des stabilen Endzustands

Der „Nachweis des stabilen Endzustands“ besteht nach [P 218] aus den in der letzten Spalte der Tabelle 3-1 aufgeführten (teils erforderlichen, teils fakultativen) Nachweisen. Diese Nachweise sind nach [P 218] mittels numerischer Berechnungsverfahren zu führen. Sie werden sowohl für das trockene als auch für das vollgelaufene Endlager geführt.

5.2. Bewertung

5.2.1. Bewertungsmaßstab

Es bestehen keine verbindlichen Vorschriften, wie die Nachweiserfordernisse für die Stilllegung des ERAM durchzuführen sind. Als Maßstab für eine Nachweisführung zu den Nachweiserfordernissen mit geomechanischem Hintergrund entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik verwenden wir

- die DIN ENV EN 1997-1 zur Bewertung der vorgesehenen Verwendung von 5 Sicherheitselementen bei einer schrittweisen Nachweisführung und
- die Deponieverordnung [DepV 09] in Verbindung mit den Empfehlungen der DGEG [DGEG 93] zur Bewertung der Ausgestaltung der Nachweisführung.



5.2.1.1. DIN ENV EN 1997-1

Die DIN ENV EN 1997-1 schreibt für Vorhaben der geotechnischen Kategorie 3 (sehr große und ungewöhnliche Bauwerke sowie Bauwerke mit ungewöhnlichen Risiken) vor, dass für jede geotechnische Bemessungssituation¹⁵ nachzuweisen ist, dass kein Grenzzustand¹⁶ erreicht wird. Der Nachweis kann mittels

- geotechnischer Berechnungen,
- konstruktiver Maßnahmen,
- Modellversuchen oder
- der Beobachtungsmethode

sowie Kombinationen von diesen durchgeführt werden.

Um Unwägbarkeiten bei den Materialeigenschaften und der Bauausführung Rechnung zu tragen, ist bei den geotechnischen Berechnungen die Einhaltung von Teilsicherheitsbeiwerten nachzuweisen. Diese im Bereich des Erd- und Grundbaus üblicherweise verwendete Methodik der Teilsicherheitsfaktoren in den für den Nachweis herangezogenen Grenzzustandsgleichungen (Gegenüberstellung vorhandener und ertragbarer Beanspruchungen) verfolgt das Ziel, die Quellen der Unsicherheiten aufzuzeigen bzw. zu dokumentieren. Im Bereich des Untertagebaus ist diese Vorgehensweise angesichts der Einzigartigkeit der einzelnen Bauwerke nur eingeschränkt realisierbar, da hier häufig die für eine hinreichend realistische Einschätzung des Streubreitenbandes einzelner Elemente der Grenzzustandsgleichung erforderlichen Datenkollektive fehlen. Die Verwendung von Teilsicherheitsbeiwerten bei der Nachweisführung für die Stilllegung des ERAM sollte jedoch in den Teilbereichen angewendet werden, für die die Datenlage dies zulässt. In den übrigen Teilbereichen ist die erforderliche Sicherheit gegenüber Imponderabilien aus geologischen Unwägbarkeiten, Idealisierungen und Berechnungsverfahren auf andere Art zu gewährleisten. Die hierzu gewählte Vorgehensweise ist bei der Nachweisführung darzulegen.

Der Nachweis ausschließlich mittels konstruktiver Maßnahmen ist nur zulässig, wenn vergleichbare Erfahrungen Bemessungsberechnungen unnötig machen.

Bei der Nachweisführung mittels Modellversuchen ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich Baugrundverhältnissen, Zeitdauer und Maßstab sicherzustellen.

Bei der Beobachtungsmethode wird der Bauwerksentwurf auf der Basis von baubegleitenden Messungen während der Bauausführung angepasst. Diese Methode kommt zur Anwendung, wenn das Verhalten des Bauwerks bzw. des Untergrunds nicht sicher vorhergesagt werden kann. Folgende Forderungen müssen vor Beginn der Baumaßnahme erfüllt sein:

- Für das Bauwerkverhalten müssen zulässige Grenzwerte festgelegt werden.

¹⁵ Bedingungen, für die das Bauwerk ausgelegt („bemessen“) ist.

¹⁶ Es gibt den Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dessen Eintreten das Bauwerk versagt, und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, bei dem der Gebrauch des Bauwerks nicht mehr oder nicht mehr vollständig möglich ist.



- Die Bandbreite des möglichen Verhaltens muss bewertet werden und es muss gezeigt werden, dass das Bauwerksverhalten mit annehmbarer Wahrscheinlichkeit innerhalb dieser Grenzen liegen.
- Ein Konzept für die Messungen muss geplant werden, mit denen erkannt werden kann, ob das wirkliche Verhalten innerhalb der Grenzen liegt. Die Reaktionszeiten der Messgeber und die Verfahren zur Ergebnisauswertung müssen ausreichend kurz im Vergleich zu möglichen Systemänderungen sein.
- Die Reaktionszeiten der Messgeräte und die Zeit für die erforderliche Auswertung müssen so kurz sein, dass ausreichende Zeit für Gegenmaßnahmen bleibt.
- Es muss ein Konzept mit den Gegenmaßnahmen geplant werden, die zur Anwendung kommen, wenn das Bauwerkverhalten außerhalb der Toleranzgrenzen liegt.

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Beobachtungsmethode in der DIN ENV EN 1997-1 für den Sonderfall vorgesehen ist, dass „*die Vorhersage des geotechnischen Verhaltens schwierig ist*“ bzw. „*eine Vorhersage des Baugrundverhaltens allein aufgrund von vorab durchgeführten Baugrunduntersuchungen und von rechnerischen Nachweisen nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit möglich ist*“ (Hervorhebung durch uns). Explizit nicht aufgeführt ist der im ERAM vorliegende Fall, dass eine Vorhersage des geotechnischen Verhaltens und des Baugrunds möglich ist und es als „nicht standsicher“ zu bewerten ist (weil nämlich bei der Gegenüberstellung der rechnerisch ermittelten Beanspruchungen mit den auf der Grundlage von Laborversuchen für zulässig eingeschätzten Beanspruchungen keine hinreichende Sicherheit ausgewiesen wird). Die im ERAM vorliegende Situation einer aus Gründen der Standsicherheit, der Langzeitsicherheit und der Barrierenintegrität nachgewiesenermaßen notwendigen und unverzichtbaren bautechnischen Maßnahme unter der Randbedingung eines teilweise als rechnerisch nicht standsicher eingeschätzten Tragverhaltens und einer durch Messungen (Radarmessungen) und in situ Beobachtungen (Firstfall) lokal belegten Überschreitung der Standfestigkeit ist ein durch die Beobachtungsmethode in der DIN ENV EN 1997-1 nicht erfasster Sonderfall.

5.2.1.2. Deponieverordnung und Empfehlungen der DGEG

In Anhang 2 der Deponieverordnung (für Deponien der Klasse IV, d. h. untertägige Deponien im Salzgestein) sind zur Führung des geotechnischen Sicherheitsnachweises 11 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;*
2. *Analyse der bergbaulichen Situation anhand von Betriebserfahrungen (soweit vorhanden), insbesondere zur Dimensionierung der untertägigen Grubenbaue und zur Bewertung der Standsicherheit;*
3. *Analyse des Gebirgsverhaltens auf der Basis von Messungen über Tage und unter Tage, von Ergebnissen geotechnischer Laborversuche sowie auf Grund markscheiderischer Prognosen*



und gebirgsmechanischer Bewertungen. Vorhandene Ergebnisse und Datenbestände eines Bergwerksbetriebes können genutzt werden;

4. *Ableitung der Darlegung eventueller gebirgsmechanischer Gefährdungssituationen auf der Basis der durchgeführten Analysen;*
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 zu Grunde 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);*
7. *Durchführung von Laborversuchen zur Ermittlung der gesteinsmechanischen Eigenschaften (Festigkeits- und Verformungseigenschaften) der anstehenden Salzgesteine, ggf. auch der einzubringenden Abfälle;*
8. *Insitu-Messungen zur Bewertung des Beanspruchungszustandes (Verformungs- und Spannungszustand) der Lagerstätte infolge des durchgeführten Bergbaus; in kritischen Bereichen auch in-situ-Messungen zur Permeabilität;*
9. *Rechnerische gebirgsmechanische Modellierung zur Simulation des Beanspruchungszustandes des Gebirges und des Langzeitverhaltens des Einlagerungsbereiches und des Grubengebäudes unter Berücksichtigung der langfristigen Konvergenz, der stabilisierenden Wirkung der Abfälle sowie seismologisch bedingter dynamischer Wirkungen;*
10. *Bewertung von gebirgsmechanischen Gegebenheiten:*
 - a. *Standsicherheit (Einschätzung der Möglichkeit eines Festigkeits-Verformungsversagens, seismische Systemstabilität),*
 - b. *Konvergenz des Grubengebäudes und Oberflächenabsenkungen und*
 - c. *langfristige Wirksamkeit der geologischen Barrieren;*
11. *Erarbeitung der aus gebirgsmechanischer Sicht erforderlichen Maßnahmen während des Einlagerungsbetriebes und zum Betriebsabschluss durch:*
 - a. *betriebsbegleitende geotechnische Messungen und*
 - b. *gebirgsmechanische Grundsätze für die Verwahrung und für Abschlussbauwerke.*

In den Empfehlungen der DGEG werden diese Aufgabenstellungen konkretisiert. Bspw. sollte der unter 5. genannte Sicherheitsplan die folgenden Angaben enthalten:



- Beschreibung möglicher Risiken und Definition der zu beachtenden Gefährdungsmöglichkeiten. Die Gefährdungsmöglichkeiten definieren die Grenzsituationen, die zu vermeiden sind. Als Beispiele werden genannt
 - lokale Bruchvorgänge,
 - Versagen von Pfeilern und Schweben,
 - Gebirgsschlag,
 - Gebirgsauflockerungen infolge großer Hohlraumkonvergenzen, die zur Gefährdung der Barrierewirkung des Gebirges führen, und
 - Verlust der Funktionalität von Verschlussbauwerken.
- Zusammenstellung der Gefährdungssituationen und möglichen Störfälle, für die Maßnahmen und/oder Nachweise erforderlich sind.
- Darlegung der Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung von Risiken.
- Darlegung möglicher Eingriffe aufgrund von Überwachungs- und Warnsystemen.
- Darlegung der Grenzen der übernehmbaren Restrisiken.
- Bewertung
 - des Systemversagens von Tragstrukturen,
 - der Langzeitintegrität der Barrierewirkung von Salzgebirge und Abschlussbauwerken,
 - der Dichtungsfunktion von Abschlussbauwerkenauf der Basis von Messungen und/oder Berechnungen.

5.2.2. Bewertung der Angaben in [P 218]

5.2.2.1. Bewertung der Sicherheitselemente

Nachweis der Sicherheit für den Zeitraum der „Bauzustände“

Die Nachweisführung zu den in [P 218] aufgeführten 7 Nachweiserfordernissen soll nach unserem Verständnis der Sicherheitselemente 1 bis 3 grundsätzlich rechnerisch unter Einsatz numerischer Modelle und unter Verwendung von durch standortspezifische Beobachtungen und Messungen abgesicherten Modellannahmen und Materialparametern erfolgen. Eine Nachweisführung mittels konstruktiver Maßnahmen oder Modellversuche ohne eine begleitende rechnerische Nachweisführung ist nicht vorgesehen, so dass die in der DIN diesbezüglich genannten Einschränkungen hier nicht relevant sind.

Die im Rahmen des Sicherheitselements 3 berechneten Zustandsgrößen (Spannungen, Verformungen, Temperaturen) sollen mit Kriterien (formuliert als Grenzzustandsgleichungen) für diese Größen verglichen werden. Zusätzlich sollen die Modellergebnisse auf der Basis von allgemeinen Einschätzungen und Befahrungen auf Plausibilität geprüft werden.



Diesem Vorgehen stimmen wir zu. Es setzt jedoch voraus, dass

- die Berechnungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt werden¹⁷,
- die Modellannahmen (inkl. der gewählten Modellparameter) zutreffend bzw. „konservativ“ (im Hinblick auf ein ungünstigeres Ergebnis für die berechneten Zustandsgrößen) sind und
- die verwendeten Kriterien im jeweiligen Sachzusammenhang geeignet sind und ein hinreichendes Sicherheitsniveau aufweisen¹⁸.

Der Nachweis der Einhaltung dieser Bedingungen ist Teil der Nachweisführung zu den Nachweiserfordernissen.

Nach [P 218] ist es auch zulässig, dass an Stelle der numerischen Berechnungen Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt werden. Es bleibt offen, ob durch die Plausibilitätsbetrachtung die Einhaltung der in [P 218] aufgeführten numerischen Kriterien für die Zustandsgrößen nachgewiesen werden soll, oder ob dann andere Kriterien für die Erfüllung der sieben Nachweiserfordernisse herangezogen werden sollen. Aus den Unterlagen [P 214], [P 224] und [P 245] geht jedoch hervor, dass bei den Plausibilitätsbetrachtungen die gleichen numerischen Kriterien zum Nachweis herangezogen werden. Allerdings werden die durch die Kriterien begrenzten Zustandsgrößen nicht numerisch berechnet, sondern auf der Basis anderer Berechnungen oder sonstige Plausibilitätsüberlegungen abdeckend abgeschätzt.

Diese Art der Plausibilitätsbetrachtung ist – soweit sie im Detail ausreichend begründet wird – zulässig. Wir weisen jedoch ausdrücklich darauf hin, dass sich diese Bewertung nicht auf andersartige Plausibilitätsbetrachtungen bezieht. Sie gilt insbesondere nicht für den Ansatz, Grubenbaue aufgrund ihres Abstands zur potentiell wasserwegsamem Gebirgsbereichen als „nicht zutrittsgefährdet“ einzuordnen („Abstandskriterien“). Abstandskriterien können nur für eine überschlägige Kategorisierung einer Zuflussgefährdung akzeptiert werden. Sie können mechanisch-hydraulische Kriterien für den Nachweis der Barrierenintegrität nicht ersetzen, da sie keinen Vergleich der erwarteten mit den vom Gebirge ertragbaren Beanspruchungen ermöglichen. Auch berücksichtigen sie weder den potentiellen Verbrauch einzelner Tragelemente noch die infolge Versatzeinbringung induzierten Thermospannungen. Es bleibt daher die Forderung bestehen, dass auch für die vom BfS als „nicht zuflussgefährdet“ bezeichneten Grubenbaue mechanisch-hydraulische Kriterien zum Nachweis der Barrierenintegrität verwendet werden. Stand von Wissenschaft und Technik ist, den Nachweis der Integrität rechnerisch auf der Grundlage des Dilatanz- und des Fluidkriteriums zu führen (s. Kapitel 6).

¹⁷ Dies bedeutet nicht, dass zu den Berechnungen aufwendige Modellierwerkzeuge eingesetzt werden müssen. Es bedeutet vielmehr, dass nach dem Stand von Wissenschaft und Technik davon ausgegangen werden kann, dass die Berechnungen die relevanten Einflussgrößen „abdecken“ und die so berechneten Werte der Zustandsgrößen nicht günstiger als ihre wahren Werte sind.

¹⁸ Hierunter verstehen wir, dass ein hinreichender Sicherheitsabstand zwischen den berechneten Zustandsgrößen und den auf der Grundlage von Labor- und Felduntersuchungen für zulässig erachteten Zustandsgrößen eingehalten wird.



In [P 218] bleibt unklar, ob und wenn ja wie die Sicherheitselemente 4 (Systematische Beobachtungen bzw. Messungen) und 5 (Vorsorgekonzept) bei den in [P 218] aufgeführten 7 Nachweiserfordernissen zur Anwendung kommen sollen. Aufgrund der Ausführungen in Abschnitt 3.5 von [P 218] sowie in [G 216] gehen wir davon aus, dass diese Sicherheitselemente nur für den Nachweis der Gewährleistung der Arbeitssicherheit herangezogen werden sollen. In [P 218] keine weiteren Angaben zu den Sicherheitselementen 4 und 5 enthalten. In Abschnitt 3.5 von [P 218] wird diesbezüglich auf ein „Konzept von Vorsorgemaßnahmen“ [G 216] verwiesen. Eine Bewertung der Sicherheitselemente 4 und 5 erfolgt deshalb im Rahmen der Prüfung der Unterlage [G 216]. **Wir möchten jedoch schon an dieser Stelle darauf hinweisen, dass in [G 216] keine Angaben zu Art und Umfang der Beobachtungen und Messungen des Sicherheitselements 4 enthalten sind. Der Nachweis zu NW (7) ist damit unvollständig.**

Nachweis der Sicherheit für den Zeitraum des „stabilen Endzustands“

Die Nachweisführung zu den in [P 218] aufgeführten 4 Nachweiserfordernissen (zwei davon optional) soll mittels der Sicherheitselemente 1 bis 3, d. h. mittels numerischer Berechnungen auf der Grundlage standortspezifischer Beobachtungen und Wirtsgesteinuntersuchungen erfolgen (s. [P 218] Abschnitte 2.2 und 4.3)¹⁹. Diesem Vorgehen stimmen wir unter der Voraussetzung zu, dass

- die Berechnungen entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt werden¹⁷,
- die Modellannahmen (inkl. der gewählten Modellparameter) zutreffend bzw. „konservativ“ (im Hinblick auf ein ungünstigeres Ergebnis für die berechneten Zustandsgrößen) sind und
- die verwendeten Kriterien im jeweiligen Sachzusammenhang geeignet sind.

Der Nachweis dieser Bedingungen ist Teil der Nachweisführung zu den Nachweiserfordernissen.

Wir weisen jedoch darauf hin, dass in den Unterlagen [P 214], [P 224] und [P 245] der Nachweis des stabilen Endzustands abweichend von den Angaben in [P 218] nicht rechnerisch, sondern auf der Basis von Plausibilitätsargumenten geführt wird.

Sofern das BfS auch für den von ihm als „stabilen Endzustand“ bezeichneten Zeitraum die Verwendung von Plausibilitätsbetrachtungen anstelle von Berechnungen vorsieht, sollte dies in [P 218] klargestellt werden. Es gelten dann unsere für den Zeitraum der „Bauzustände“ gegebenen Bewertungen.

5.2.2.2. Bewertung der Nachweismethode

Die Darstellung der „Nachweismethode“ kann in unterschiedlichem Detaillierungsgrad erfolgen. Als minimalistische Variante kann hierunter die Angabe der oben bewerteten 5 Sicherheitselemente verstanden werden. Sie kann jedoch auch in einer detaillierteren Form erfolgen, so wie dies in der Deponieverordnung und in den Empfehlungen der DGEG der Fall ist. Zur Nachweismethodik können jedoch auch

¹⁹ Plausibilitätsbetrachtungen anstelle von Berechnungen sind nach [P 218] nur für die Bauzustände vorgesehen.



- die Angabe der Mess- und Auswertemethoden für die Baugrunduntersuchungen (für das jeweilige Sicherheitselement 2) und für die systematischen Beobachtungen bzw. Messungen (für das jeweilige Sicherheitselement 4),
- die Angabe der Berechnungsmethoden (für das jeweilige Sicherheitselement 3) oder
- das methodische Vorgehen bei der Verifizierung und Validierung der zur Berechnung verwendeten Modelle, der Durchführung von Vereinfachungen (wie z. B. die Zusammenfassung von Materialklassen) und der Festlegung des Modellgebiets

gerechnet werden.

Die Angaben, die in [P 218] zur Nachweismethodik enthalten sind, stehen nicht im Widerspruch zu den Anforderungen der Deponieverordnung und den Empfehlungen der DGEG. Sie sind jedoch so allgemein gehalten, dass sie nicht daraufhin überprüft werden können, ob die Nachweismethodik die Forderungen der Deponieverordnung und die Empfehlungen der DGEG erfüllt bzw. ob sie sachgerecht ist und dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Da die Angaben zur Nachweismethode auf verschiedene Unterlagen verteilt sind ([P 212], [G 216], [P 218], [P 214], [P 215], [P 224], [P 234], [P 243], [P 245], ...), kann die Nachweismethodik erst nach Prüfung dieser Unterlagen abschließend bewertet werden.

Allerdings möchten wir schon hier darauf hinweisen, dass in [P 218] nicht angegeben wird, wie den Unsicherheiten bei der Modellierung aufgrund der gewählten Berechnungsverfahren und Idealisierungen Rechnung getragen wird (z. B. mittels Verwendung von Sicherheitsbeiwert o. Ä.). Dies sollte vom BfS dargelegt werden. Wir empfehlen deshalb:

F 5: Vom BfS sollte dargelegt werden, wie den Unsicherheiten bei der Modellierung aufgrund der gewählten Berechnungsverfahren und Idealisierungen Rechnung getragen wird (z. B. mittels Verwendung von Sicherheitsbeiwert o. Ä.).



6. NACHWEISKRITERIEN

Ein wesentliches Element der Nachweisführung zu den verschiedenen Nachweiserfordernissen ist der Vergleich eines bestehenden bzw. prognostizierten Zustands mit sogenannten Nachweiskriterien. Diese haben die Form von Ungleichungen für bestimmte den Zustand charakterisierende Größen (wie mechanische Spannungen, Verformungen oder die Temperatur). In diesem Kapitel werden die in [P 218] aufgeführten Nachweiskriterien wiedergeben und bewertet. Grundsätzlich ist eine Bewertung der Nachweiskriterien erst dann zweckmäßig, wenn die zugrunde liegenden Nachweiserfordernisse feststehen. Dies setzt die Erfüllung der in Kapitel 4 abgeleiteten Forderungen F 1 bis F 4 voraus.

Da einige der vom BfS aufgeführten Nachweiserfordernisse unstrittig sind und bei anderen absehbar ist, dass sie zumindest in ähnlicher Form zu erbringen sind, prüfen wir im Folgenden die in [P 218] angegebenen Nachweiskriterien. Im Ergebnis der weiteren Prüfung der Nachweiserfordernisse kann es jedoch durchaus sein, dass einzelne Nachweiskriterien entfallen oder modifiziert werden müssen und dass andere hinzukommen. Die folgenden Bewertungen stehen unter diesem Vorbehalt.

6.1. Begrenzung der Senkung der Tagesoberfläche

6.1.1. Angaben in [P 218]

Als Kriterium für die zulässige Senkung der Tagesoberfläche wird eine maximale integrale Senkung von 1 m, gerechnet ab dem Beginn der Stilllegungsmaßnahmen, gewählt. Als Begründungen für diesen Wert werden angegeben:

- Der Schutz der Tagesoberfläche ist abdeckend gewährleistet, wenn der Schutz der Salzbarriere gesichert ist.
- Nach UVP-V ist für diesen Wert keine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich.

Das Kriterium wird sowohl für die Phase der Bauzustände als auch zur Beurteilung des stabilen Endzustands verwendet.

6.1.2. Bewertung

Der Verweis auf den Schutz der Salzbarriere ist aus den folgenden Gründen nicht schlüssig:

- Aufgrund der Zuläufe zum Lager H kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Barrierenintegrität des dortigen Salzgesteins gegeben ist.
- Es liegt kein Nachweis für die Behauptung vor, dass bei einem Schutz der Salzbarriere auch die Tagesoberfläche geschützt ist. Auch im Fall eines dilatanzfreien Kriechens des Salzes sind übertägige Senkungen nicht von vorneherein ausgeschlossen bzw. irrelevant.



- Das Kriterium gilt auch für den „stabilen Endzustand“ des vollgelaufenen Endlagers. In diesem Fall kann es zu beträchtlichen Lösungsprozessen kommen, die auch am Salzspiegel, also oberhalb der (dann nicht mehr geschützten) „Salzbarriere“ erfolgen.

Nach § 1 Nr. 1 a UVP-V bedürfen betriebsplanpflichtige Vorhaben zur Gewinnung von Steinkohle, Braunkohle, bituminösen Gesteinen, Erzen und sonstigen nichtenergetischen Bodenschätzen im Tiefbau einer Umweltverträglichkeitsprüfung, falls sie

- mit Senkungen der Oberfläche von mindestens 3 m verbunden sind oder
- mit Senkungen der Oberfläche von mindestens 1 m verbunden sind und erhebliche Beeinträchtigungen im Hinblick auf Vorflut, Grundwasser, Böden, geschützte Kulturgüter oder vergleichbare Schutzgüter zu erwarten sind.

Hieraus könnte im Umkehrschluss abgeleitet werden, dass Senkungen unterhalb von 1 m bei der im vorliegenden Fall durchzuführenden UVP unbeachtlich sind. Andererseits wird in der Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (EinwirkungsBergV) von 1982 als Maßstab für eine mögliche bergbauliche Einwirkung eine Bodenabsenkung von 10 cm festgelegt²⁰. In § 5 Abs. 1 EinwirkungsBergV wird sogar eine mögliche Beeinträchtigung von Anlagen und Einrichtungen unterhalb dieser Schwelle angesprochen.

Die zur Bewertung der künftigen Senkungen zugrunde zu legenden Kriterien sollten genauso wie die in Abschnitt 4.2.2 bewerteten Nachweiserfordernisse zum Schutz der Tagesoberfläche durch die zuständige Bergbehörde bewertet werden. Wir geben hierzu die Hinweise:

- H 2: Sofern die prognostizierten künftigen Senkungen mehr als 10 cm betragen, sollte vom BfS eine topographische Karte mit Eintragung der möglichen künftigen Senkungen vorgelegt werden.**
- H 3: Die Zulässigkeit dieser Senkungen sollte dann in Abhängigkeit von den übertägigen Verhältnissen (Wohnbebauung, Gewerbebebauung, Vorfluter, ...) bewertet werden.**

6.2. Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden

6.2.1. Angaben in [P 218]

Als Kriterium für die zulässige Schiefstellung von Gebäuden wird eine Schiefstellung von 1/300 in einem Zeitraum von 100 Jahren verwendet. Als Begründungen für diesen Wert werden angegeben:

- Nach [Sch 94] stellt der Wert 1/300 die Grenze für erste Risse in tragenden Wänden dar.
- Dieser Grenzwert wird „im Regelfall“ verwendet.
- Der Zeitraum von 100 Jahren als Nachweiszeitraum für Gebäude deckt die Anforderungen der DIN 1055-100 als gültiges Regelwerk ab.

²⁰ Liegt ein geschädigtes Objekt innerhalb dieses Einwirkungsbereichs, dann kehrt sich die Beweislast für einen Schadensersatz wegen Bergschaden zu Lasten des Bergbaubetreibenden um.



Das Kriterium wird sowohl für die Phase der „Bauzustände“ als auch zur Beurteilung des „stabilen Endzustands“ verwendet.

6.2.2. Bewertung

Die in [P 218] unter Verweis auf [Sch 94] dargestellten Grenzwerte für Verformungen bei Ausbildung einer Setzungsmulde stimmen mit DIN V 4019-100 (von April 1996) überein. Allerdings beziehen sich diese Angaben auf die sogenannte Winkelverdrehung, d. h. die kleinräumige Bodenneigung unterhalb eines Bauwerks (s. dort Kapitel 14). Die vom BfS ermittelte Schiefstellung entspricht der Größe „Verkantung“ in der DIN. Für diese gibt die DIN keinen Vergleichsmaßstab vor. In [Fis 09] und [Wit 09] wird berichtet, dass in der Literatur die Werte

1:250 bzw.

1:250 · b/h mit der Gründungsbreite b und der Gebäudehöhe h

empfohlen werden.

Der Begriff „im Regelfall“ sollte präzisiert werden und die aus Sicht des BfS erforderlichen bzw. zulässigen Ausnahmen sollten angegeben werden.

In Abschnitt 4.2.2 empfehlen wir, die Berechnungen für zwei Referenzzeitpunkte durchzuführen, nämlich den Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten und den vorgesehenen Beginn der Stilllegungsarbeiten. Da für einzelne Gebäude und insbesondere schützenswerte Gebäude wie Denkmäler oder Kirchen u. ä. auch eine höhere Lebensdauer als 100 Jahre zu unterstellen ist, sollten die prognostizierten Schiefstellungen auch für einen längeren Zeitraum als 100 Jahre dargestellt werden.

Die zur Bewertung der künftigen Schiefstellungen zugrunde zu legenden Kriterien sollten genauso wie die in Abschnitt 4.2.2 bewerteten Nachweiserfordernisse zum Schutz der Tagesoberfläche durch die zuständige Bergbehörde bewertet werden. Wir geben hierzu die Hinweise:

H 4: Die Berechnung der maximalen Schiefstellungen sollte sowohl ausgehend vom Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten als auch ausgehend vom vorgesehenen Beginn der Stilllegungsarbeiten erfolgen. Die Schiefstellungen sollten sowohl für einen Zeitpunkt nach 100 Jahren als auch für einen Zeitpunkt nach 1.000 Jahren dargestellt werden.

H 5: Sofern die maximalen Schiefstellungen ein noch festzulegendes Mindestmaß überschreiten, sollte vom BfS topographische Karten mit Eintragung der maximalen Schiefstellungen vorgelegt werden.

6.3. Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume

6.3.1. Angaben in [P 218]

Als *zutrittsgefährdet* definiert das BfS Grubenbaue,

- die weniger als 60 m unter dem Salzspiegel liegen oder



- die weniger als 130 m vom Salzspiegel und weniger als 25 m von Anhydritschollen oder Kalilagern entfernt sind, die eine Verbindung zum Deckgebirge aufweisen.

Das NW „Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität“ wird dann als erfüllt angesehen, wenn

1. es zu keiner nennenswerten Aufweitung der Zone kommt, in der das Dilatanzkriterium verletzt ist, oder es zu keiner nennenswerten Aufweitung der Zone kommt, in der das Fluidkriterium verletzt ist,²¹

und

2. die Vergleichsverzerrung in der Salzbarriere nicht mehr als 1 % beträgt.

Die Aufweitung der Zone, in der das jeweilige Kriterium verletzt wird („gestörte Zone“), ist dann „nicht nennenswert“, wenn sie nicht größer ist als eine Referenzzone. Diese Referenzzone ist die gestörte Zone zu einem Referenzzeitpunkt und für den Fall, dass keine Stilllegungsmaßnahmen durchgeführt werden. Als Referenzzeitpunkt dient der Zeitpunkt, an dem die geplanten Stilllegungsmaßnahmen abgeschlossen würden.

Das Dilatanzkriterium lautet:

$$\frac{\tau}{\sigma^*} \leq 0,8996 \frac{\sigma}{\sigma^*} - 0,01697 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^2 \quad \text{mit } \sigma^* = 1 \text{ MPa}$$

mit $\sigma = -\frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ (= negative mittlere Spannung²²)

$$\tau = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (= \text{Oktaederspannung})$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Hauptspannungen (Eigenwerte des Spannungstensors)

Zur Begründung des Dilatanzkriteriums wird auf [Cri 98] verwiesen.

Das Fluidkriterium²³ lautet:

$$\min(-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3) > p_{fl}$$

mit p_{fl} = hydrostatischer Druck einer potentiell anstehenden Lauge

²¹ Die Beschreibungen in [P 218], wann das NW „Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität“ erfüllt ist, weichen für den Zeitraum der „Bauzustände“ und für den Zeitraum des „stabilen Endzustands“ voneinander ab. Wir haben hier die Formulierung für den Zeitraum des „stabilen Endzustands“ wiedergegeben ([P 218], S. 25).

Für den Zeitraum der „Bauzustände“ wird in [P 218] lediglich gefordert, dass „gegenüber dem Salzspiegel und den potentiellen Zutrittspfaden im Anhydrit oder Kalilager keine nennenswerte Aufweitung der dilatanten Zone erfolgen“ darf. Der alternative Ausschluss einer nennenswerten Aufweitung der Zone, in der das Fluidkriterium verletzt ist, wird hier nicht aufgeführt, da „in der Regel das Dilatanzkriterium ... zum Tragen kommt“ ([P 218], S. 15).

²² In [P 218] wird σ mit umgekehrtem Vorzeichen definiert. Wir verwenden hier die übliche Vorzeichenkonvention, nach der Zugspannungen ein positives und Drücke ein negatives Vorzeichen haben.

²³ In [P 218] wird das Fluidkriterium mit einem umgekehrten Vorzeichen definiert. Wir verwenden hier die übliche Vorzeichenkonvention, nach der Zugspannungen ein positives und Drücke ein negatives Vorzeichen haben.



$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = Hauptspannungen (Eigenwerte des Spannungstensors)

Als Begründung für die Begrenzung der Vergleichsverzerrung wird angegeben, dass dieses in Anlehnung an ein „Aversin-Kriterium“ aus [Sto 83] formuliert wurde.

Dieser Bewertungsmaßstab wird sowohl für die Phase der Bauzustände als auch zur Beurteilung des stabilen Endzustands verwendet.

6.3.2. Bewertung

Im Folgenden bewerten wir,

- ob die vom BfS gewählten Kriterien zum Nachweis der Barrierenintegrität alle relevanten Einflussgrößen adressieren und unter diesem Aspekt vollständig sind (Abschnitt 6.3.2.1),
- ob die vom BfS gewählten Kriterien zum Nachweis der Barrierenintegrität sachgerecht kombiniert werden (Abschnitt 6.3.2.2) und
- ob die vom BfS gewählten numerischen Formulierungen für die gewählten Kriterien sachgerecht sind (Abschnitt 6.3.2.3 bis 6.3.2.5).

6.3.2.1. Vollständigkeit der Kriterien für die Barrierenintegrität

Barrierenintegrität bezeichnet den Ausschluss von Wegsamkeiten für Fluide in einem Gebirgsbereich. Für ein Bergwerk ist Barrierenintegrität dann gegeben, wenn es von einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich vollständig umschlossen wird, in dem Wegsamkeiten ausgeschlossen sind. Diesen Zustand bezeichnen wir als „globale Barrierenintegrität“ (vgl. Abschnitt 4.2.2). Für einen Teilbereich, in dem Wegsamkeiten ausgeschlossen sind, verwenden wir den Begriff „lokale Barrierenintegrität“. Für ein Bergwerk ist somit die globale Barrierenintegrität dann gegeben, wenn es von einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich vollständig umschlossen wird, in dem die lokale Barrierenintegrität gegeben ist.

Kriterien für die globale Barrierenintegrität müssen deshalb

- Kriterien für die lokale Barrierenintegrität und
- Kriterien für die Mächtigkeit des das Bergwerk vollständig umgebenden Gebirgsbereichs mit lokaler Barrierenintegrität

enthalten.

In Abschnitt 4.2.2 weisen wir darauf hin, dass die Nachweisführung der lokalen Barrierenintegrität indirekt erfolgt: Es wird nachgewiesen, dass keine Verhältnisse bestanden haben konnten (bzw. künftig auftreten können), die zur Ausbildung einer Wegsamkeit geführt haben (bzw. führen) können. Ausgangspunkt für die Ableitung von Kriterien für die lokale Barrierenintegrität sind die Einflussgrößen²⁴, die zur Ausbildung von Wegsamkeiten im Gebirge führen können. Wegsamkeiten können sich infolge von

²⁴ In der Literatur zur Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Stoffe werden diese Einflussgrößen häufig nach Eigenschaften, („features“), Ereignissen („events“) und Prozessen („processes“) differenziert.



1. durch die Gebirgsspannung verursachten Kriechbewegungen („dilatantes Kriechen“),
2. Aufreißen bzw. Öffnen des Gefüges aufgrund der Gebirgsspannung,
3. Aufreißen bzw. Öffnen des Gefüges aufgrund lokal herrschender Fluiddrücke und
4. Lösungs- und Umlösungsprozessen

bilden. Diese Mechanismen können sich überlagern. Dilatantes Kriechen tritt schon bei niedrigeren mechanischen Spannungen auf als ein Aufreißen des Gefüges. Weiterhin beschränken wir uns auf den Fall, dass Lösungs- und Umlösungsprozesse nicht auftreten, so dass im Folgenden nur die Mechanismen 1. und 3. berücksichtigt werden.

Nicht jede Kriechbewegung führt zur Ausbildung von Wegsamkeiten. Grundsätzlich kann unterschieden werden zwischen Kriechbewegungen,

- die mit einer Volumenzunahme des Gesteins (und damit einer Ausbildung von Wegsamkeiten) verbunden sind,
- die mit einer volumenneutralen Gefügestörung im Gestein verbunden sind und damit Schwäche-zonen erzeugen oder
- die das Gesteinsgefüge nicht beeinträchtigen.

Die Bildung einer Wegsamkeit für Fluide in einem vormals intakten Gestein setzt eine – wenn auch nur geringe – Volumenzunahme des Gesteins voraus. Bei einer vollständig volumenneutralen Gefügestörung im vormals intakten Gestein bildet sich (zunächst) keine hydraulisch wirksame Wegsamkeit, es erhöht sich jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund weiterer Prozesse zu einem Aufreißen bzw. Öffnen dieser Gefügestörung und damit zur Ausbildung von Wegsamkeiten kommt. Nach heutigem Kenntnisstand bestimmt der Spannungszustand im Gestein, welcher Art die Kriechbewegung ist, also ob sie z. B. mit einer Volumenzunahme verbunden ist oder nicht. Ein Kriterium für die lokale Barrierenintegrität muss deshalb zum Gegenstand haben, dass der Spannungszustand im Gebirge keine Kriechbewegungen ermöglicht, die mit einer Ausbildung von Wegsamkeiten verbunden ist.

Für den Fall, dass im Gebirge keine weiteren Mechanismen wirken, die zu einem Aufreißen bzw. Öffnen des Gefüges führen können, ist dies gleichbedeutend mit der Forderung, dass der Spannungszustand im Gebirge keine Kriechbewegungen ermöglicht, die mit einer Volumenzunahme verbunden sind. Ein solches Kriterium bezeichnen wir als „**enges Dilatanzkriterium**“.

Für den Fall, dass im Gebirge zusätzlich Mechanismen wirken, die zu einem Aufreißen bzw. Öffnen des Gefüges führen können, ist dagegen sicherzustellen, dass der Spannungszustand im Gebirge keine das Gefüge schädigenden Kriechbewegungen verursacht, die den zusätzlichen Mechanismen das Aufreißen bzw. Öffnen des Gefüges ermöglichen. Ein Kriterium, das dieses zum Gegenstand hat, geht über das zuvor genannte hinaus. Um dies zu verdeutlichen, bezeichnen wir es als „**erweitertes Dilatanzkriterium**“. Ist das erweiterte Dilatanzkriterium eingehalten, so gilt dies in jedem Fall auch für das enge Dilatanzkriterium.

Weiterhin muss das Gestein vor Beginn der hier betrachteten Kriechbewegung intakt gewesen sein. Hieraus ergibt sich für den Nachweis der Barrierenintegrität:



- Wegsamkeiten (und damit eine Verletzung der Barrierenintegrität) können (lokal) dann ausgeschlossen werden, wenn an dieser Stelle
 - im prämontanen Zustand keine Wegsamkeiten vorhanden waren und
 - im Fall der Abwesenheit zusätzlicher Schädigungsmechanismen seit Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten keine Kriechbewegungen aufgetreten sind, die das enge Dilatanzkriterium verletzt haben, und
 - im Fall der Anwesenheit zusätzlich Schädigungsmechanismen seit Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten keine Kriechbewegungen aufgetreten sind, die das erweiterte Dilatanzkriterium verletzt haben.
- Die Tatsache, dass das Dilatanzkriterium zu einem bestimmten Zeitpunkt erfüllt ist, bedeutet nicht, dass zu diesem Zeitpunkt auch die lokale Barrierenintegrität nachgewiesen ist. Für den Nachweis der lokalen Barrierenintegrität ist es erforderlich, dass das Dilatanzkriterium bis zu diesem Zeitpunkt stets erfüllt wurde. Von dieser Bedingung kann nur dann abgewichen werden, wenn eine „Verheilung“ der Wegsamkeiten nachgewiesen werden kann.
- Bei einer Verletzung des Dilatanzkriteriums muss nicht zwangsläufig eine Wegsamkeit entstanden sein, es kann nur nicht ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist deshalb anzustreben, das Dilatanzkriterium künftig auch dort einzuhalten, wo es in der Vergangenheit verletzt war, da es ja durchaus möglich ist, dass die lokale Barrierenintegrität noch gegeben ist.

Als zusätzlicher Mechanismus, der neben der Gebirgsspannung auf das Salzgefüge einwirken kann, ist der Druck von (lokal anwesenden) Fluiden zu berücksichtigen. Ein Aufreißen bzw. Öffnen des Gesteingefüges aufgrund lokal herrschender Fluiddrücke kann nur erfolgen, wenn der Fluiddruck p_{fl} um ein gewisses Maß höher ist als die im Gestein herrschenden Drücke (ausgedrückt als negative Spannungen $-\sigma_j$):

$$p_{fl} \geq \min(-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3) + p_0$$

p_0 steht für den zusätzlichen Beitrag, der erforderlich ist, um nach Ausgleich der im Gestein herrschenden Drücke das Gefüge aufzureißen bzw. zu öffnen. Er ist abhängig vom Gefügestand des Gesteins. Weiterhin kann er abhängig vom Spannungszustand im Gestein sein.

Ein Kriterium für die lokale Barrierenintegrität muss deshalb zum Gegenstand haben, dass der Druck eines potentiell anwesenden Fluids und die lokale Gebirgsspannung in einem Verhältnis zueinander stehen, das ein Aufreißen bzw. Öffnen des Gesteinsgefüges ausschließt. Dieses Kriterium wird als Fluidkriterium bezeichnet. Für die weitere Analyse ist es hilfreich, neben dem allgemeinen Fall auch den Spezialfall zu betrachten, bei dem die Gefügeschädigung so weit fortgeschritten ist, dass der zusätzliche Beitrag p_0 vernachlässigt werden kann (z. B. bei Vorliegen eines geschlossenen, aber nicht verheilten Risses). In diesem Fall kann das Fluidkriterium näherungsweise durch den Ausdruck

$$p_{fl} < \min(-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3)$$

beschrieben werden. Um diesen Spezialfall sprachlich vom allgemeinen Fall zu differenzieren, nennen wir das Fluidkriterium für den Fall $p_0 = 0$ **erweitertes Fluidkriterium** und den allgemeinen



Fall $p_0 > 0$ **enges Fluidkriterium**. Wie beim Dilatanzkriterium ist auch hier das erweiterte Kriterium strenger als das enge: Wird das erweiterte Fluidkriterium eingehalten, ist auch das enge Fluidkriterium eingehalten.

Ob das enge oder das erweiterte Fluidkriterium zu erfüllen ist, hängt vom Schädigungszustand des Gefüges und damit von der Vorgeschichte seiner Belastung ab. Hieraus ergeben sich die folgenden Konsequenzen:

- Das enge Fluidkriterium kann nur dann an die Stelle des (strengeren) erweiterten Fluidkriteriums treten, wenn
 - entweder seit Beginn der bergbaulichen Tätigkeiten nachweislich keine deutliche Gefügeschädigung (durch Kriechbewegungen, Fluiddrücke und Verzerrungen) aufgetreten sein kann oder
 - die Gefügeschädigung nachweislich wieder weitgehend verheilt ist.

In älteren Unterlagen wird für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere über einem Bergwerk zusätzlich ein Dehnungskriterium formuliert, das die maximal zulässige Dehnung am Salzspiegel begrenzte²⁵. Nach dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik ist ein solches Kriterium nicht mehr erforderlich, da durch die Einhaltung des Dilatanz- und des Fluidkriteriums die beiden relevanten Schadensmechanismen ausgeschlossen werden, so dass es zu keiner verformungsbedingten Barrierschädigung kommen kann²⁶. Ein Kriterium zur Begrenzung der Verzerrung wie in [P 218] vorgesehen ist zum Schutz der Barrierenintegrität nicht erforderlich, kann aber als zusätzliches stützendes Argument herangezogen werden.

Bezüglich der Vollständigkeit der Kriterien zur Bewertung der Barrierenintegrität kommen wir deshalb zu dem Ergebnis, dass die vom BfS gewählten Kriterien für die Dilatanz und den Fluiddruck die für die lokale Barrierenintegrität relevanten Schädigungsprozesse adressieren und unter diesem Aspekt vollständig sind. Es fehlt jedoch ein Kriterium für die Mächtigkeit des das Bergwerk vollständig umgebenden Gebirgsbereichs mit lokaler Barrierenintegrität. Dieses Kriterium bezeichnen wir als **Mächtigkeitskriterium**.

F 6: Vom BfS sollte ein Kriterium für die erforderliche Mächtigkeit des das Bergwerk vollständig umgebenden Gebirgsbereichs mit lokaler Barrierenintegrität angegeben werden.

6.3.2.2. Kombination der Kriterien für die Barrierenintegrität

Die Angaben in [P 218] weisen bezüglich der Kombination der Kriterien die folgenden Mängel auf:

- (1) In [P 218] wird von der impliziten Annahme ausgegangen, dass eine Wasserwegsamkeit nur entstehen kann, wenn an dieser Stelle das Dilatanzkriterium und das Fluidkriterium gleichzeitig verletzt sind. Tatsächlich kann es jedoch ausreichen, wenn nur eines von beiden verletzt ist.

²⁵ Das in [Sto 83] erwähnte Aversin-Kriterium entspricht einem solchen Kriterium.

²⁶ Dilatanzfreie Verformungen können per Definition nicht zu einem Versagen der geologischen Barriere führen, unabhängig von dem Ausmaß der Verformung.



- (2) Selbst wenn die implizite Annahme des BfS zutreffend wäre, wären die in [P 218] für den NW „Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität“ aufgeführten Bedingungen nicht sachgerecht.
- (3) Das BfS gibt nicht an, wo im Gebirge das Kriterium für die Vergleichsverzerrung erfüllt sein muss. Aus [P 218] geht nicht eindeutig hervor, ob dieses Kriterium überall in der Salzbarriere eingehalten werden muss oder nur in einem ausreichend mächtigen Gebirgsbereich, in dem auch gleichzeitig das Dilatanzkriterium oder/und das Fluidkriterium eingehalten werden und der die Grube vollständig umgibt.

Im Folgenden werden diese Punkte erläutert.

zu (1):

Nach Auffassung des BfS liegt eine Verletzung der Barrierenintegrität nur dann vor, wenn sowohl das Dilatanzkriterium als auch das Fluidkriterium verletzt sind²⁷. Nach unserem Verständnis geht das BfS dabei von folgenden grundlegenden Annahmen aus²⁸:

- Ein Fluid kann bei einer Verletzung des Fluidkriteriums nur schon bestehende Risse im Gebirge öffnen (und keine neuen verursachen). Die Verletzung des Fluidkriteriums alleine kann deshalb keine Wegsamkeiten schaffen.
- Risse, die aufgrund dilatanter Kriechbewegungen entstanden sind, sind zunächst einmal hydraulisch unwirksam. Sie werden erst dann hydraulisch wirksam, wenn ein Fluid ansteht und diese Risse weitet. Das Weiten der Risse ist nur dann möglich, wenn das Fluidkriterium verletzt ist. Die Verletzung des Dilatanzkriteriums alleine kann deshalb keine hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten schaffen.

Diese Annahmen weisen u. E. jedoch die folgenden Schwächen auf:

- Ein Fluid kann sehr wohl neue Wegsamkeiten verursachen. Offen ist nur, welcher zusätzliche, den Gebirgsdruck übersteigende Druckbeitrag p_0 hierzu erforderlich ist. Dieser hängt i. A. vom Grad der Gefügeschäden im Gestein, dem Spannungs- und Verzerrungszustand, den Gesteinseigenschaften und der zeitlichen Entwicklung des Fluiddrucks ab²⁹. Eine Überschreitung des engen Fluidkriteriums kann auch ohne Verletzung des Dilatanzkriteriums zur Ausbildung von Wegsamkeiten führen.
- Sofern eine Kriechbewegung mit einer Zunahme des Gesteinsvolumens verbunden ist, entstehen zusätzliche Hohlräume, die bei Vernetzung einen Fließweg bilden können. Offen ist nur seine Wirksamkeit („Leitfähigkeit“). Ein Fluidfluss kann auch ohne einen Mindest-Fluiddruck erfolgen, wobei ein höherer Fluiddruck die Leitfähigkeit des Wasserwegs jedoch erhöhen kann. Ein Überschreiten des engen Dilatanzkriteriums kann auch ohne Verletzung des Fluidkriteriums zur Ausbildung von Wegsamkeiten führen.

²⁷ Zur Vereinfachung der Darstellung und weil wir es nicht für erforderlich ansehen klammern wir das Verzerrungskriterium an dieser Stelle aus.

²⁸ Diese Annahmen und Argumentationen sind in [P 218] nicht enthalten. Unser Verständnis, dass sie die Sicht des BfS darstellen, beruht auf verschiedenen Ausführungen des BfS im Rahmen von Fachgesprächen.

²⁹ Untersuchungen im Labor haben ergeben, dass der Druckbeitrag p_0 nicht groß sein muss, s. u.



Bei der Bewertung von Salzgestein wird nicht zwischen engen und erweiterten Kriterien unterschieden, sondern es werden ein Dilatanzkriterium (entsprechend dem o. g. erweiterten Dilatanzkriterium) und ein Fluidkriterium (entsprechend dem o. g. erweiterten Fluidkriterium) verwendet. Da Dilatanz- und Fluidkriterium unterschiedliche Schädigungsmechanismen beschreiben, müssen sie gleichzeitig eingehalten werden³⁰. Zusätzlich gelten die o. g. Bedingungen, dass das Dilatanz- und das Fluidkriterium an der jeweiligen Stelle auch in der Vergangenheit nicht verletzt worden sind.

Nach Auffassung des BfS ist die Barrierenintegrität dagegen auch dann gegeben, wenn nur eins der beiden Kriterien eingehalten wird. Weiterhin gilt das Dilatanzkriterium dann als erfüllt, wenn der aktuelle Spannungszustand kein dilatantes Kriechen zulässt (unabhängig von den Spannungs- und Kriechverhältnissen in der Vergangenheit).

Dies halten wir für den Nachweis der lokalen Barrierenintegrität als nicht ausreichend.

Neben der oben dargelegten Analyse wird unsere Einschätzung auch durch folgende Sachverhalte gestützt:

- Nach den in [P 215], [P 234] und [P 243] dokumentierten Berechnungen der DBE ist der Gebirgsbereich, in dem das (dort gewählte) Fluidkriterium verletzt ist, stets deutlich größer als der Gebirgsbereich, in dem das (dort gewählte) Dilatanzkriterium verletzt ist. Der Unterschied in der Kombination der Kriterien kommt danach dort zum Tragen, wo das Dilatanzkriterium eingehalten wird und das Fluidkriterium verletzt ist. Nach Auffassung des BfS kann hier eine Wegsamkeit ausgeschlossen werden, nach unserer Einschätzung ist dies dagegen nicht der Fall.

Zur Klärung dieses strittigen Punkts erfolgten am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal umfangreiche Laboruntersuchungen, bei denen die mechanischen Beanspruchungen in grober Annäherung den Beanspruchungszuständen im Salzspiegelbereich folgend mit $\sigma_1 = 4$ MPa und $\sigma_2 = \sigma_3 = 2$ MPa deutlich unterhalb der Dilatanzfestigkeit angesetzt wurden, sodass die Ausbildung von Rissen bzw. Wegsamkeiten aufgrund mechanisch induzierter Schädigungsprozesse ausgeschlossen werden kann (Einhaltung des Dilatanzkriteriums aus [P 218]). Zeitgleich mit dieser mechanischen Beanspruchung wurden die Prüfkörper in axialer Richtung mit einem Fluiddruck von $p_{fl} = 2,5$ MPa bis $p_{fl} = 3,0$ MPa beaufschlagt (entsprechend $p_0 = 0,5$ MPa bis 1,0 MPa). Im Ergebnis der Versuche konnte beobachtet werden, dass auch ohne eine dilatante Beanspruchung der Prüfkörper eine Fluidmigration im und durch die Prüfkörper erfolgte³¹. Damit ist nachgewiesen, dass sowohl ein Dilatanz- als auch ein Fluidkriterium für den Nachweis der Integrität erfüllt sein müssen.

³⁰ Die Forderung nach einem gleichzeitigen Einhalten des erweiterten Dilatanzkriteriums und des erweiterten Fluidkriteriums stellt eine Konservativität dar. Diese lässt sich jedoch nicht vermeiden, solange nicht zwischen engen und erweiterten Kriterien unterschieden wird bzw. solange nicht zulässige Gebirgsspannungen und Fluiddrücke durch gekoppelte Kriterien beschrieben werden.

³¹ Düsterloh, U. Lux, K.-H. (2009): Durchführung von Arbeiten zur Klärung von potentiellen Eintrittspfaden von Lösungen in das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) im Bereich des Abbaus 1a des Zentralteils



- In den vom BMU mit Datum vom 30. Sep. 2010 herausgegebenen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle [BMU 10] wird unter Abschnitt 7.2.1 ebenfalls die Einhaltung beider Kriterien gefordert:

Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:

- *Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeit der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszone nicht überschreiten.*
- *Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluidbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.*
- *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.*

zu (2):

Für den Zeitraum des „stabilen Endzustands“ wird in [P 218] gefordert, dass entweder keine nennenswerte Aufweitung der dilatanten Zone erfolgt oder dass sich die Zonen, in denen das Fluidkriterium nicht erfüllt ist, nicht vergrößern. Diese Forderung entspricht nicht der unter (1) angegebenen: Falls sich die Zone, in der das Dilatanzkriterium verletzt ist, vergrößert und die Zone, in der das Fluidkriterium verletzt ist, unverändert bleibt, dann ist der in [P 218] formulierte Nachweis erbracht. Trotzdem kommt es in dem geschilderten Fall zu einer Vergrößerung der Zone, in der sowohl das Dilatanz- als auch das Fluidkriterium verletzt sind (und die deshalb nach dem Maßstab des BfS als gestört anzusehen ist).

Unabhängig hiervon sehen wir es zur Vermeidung einer Verschlechterung der Barrierewirkung nicht als ausreichend an, lediglich zu fordern, dass sich die Zonen mit einer Verletzung der Kriterien nicht vergrößern. In den Zonen, in denen die Kriterien verletzt sind, kann es zu einer weiteren Verschlechterung der Barrierenwirkung kommen. Aus einer geringfügigen Gefügeschädigung kann sich eine Wegsamkeit bilden, was dem Verschlechterungsgebot für die Barrierewirkung (BI-3) widerspricht. Es ist deshalb eine möglichst schnelle und weitgehende Verringerung der Zone zu fordern, in der die Kriterien verletzt sind.

zu (3):

Aus den Angaben in [P 218] geht nicht hervor, welcher Teil des Salzgebirges der „Salzbarriere“ zugeordnet wird bzw. in welchen Teilen des Salzgebirges das Kriterium für die Vergleichsverzerrung eingehalten werden muss. Wir gehen davon aus, dass nach Auffassung des BfS eine lokale Verletzung z. B. innerhalb von dilatanten Bereichen zulässig ist und dass vom BfS folgender Bewertungsmaßstab beabsichtigt ist:

Der Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität gilt dann als gegeben, wenn es zu keiner nennenswerten Aufweitung der „gestörten Zone“ kommt. Die gestörte Zone umfasst die Bereiche des Salzgebirges,



1. in denen entweder das Dilatanzkriterium und das Fluidkriterium verletzt sind
oder
2. in der die Vergleichsverzerrung mehr als 1 % beträgt.

Für die folgende Bewertung ist dies nicht von Belang, da wir das Verzerrungskriterium als nicht erforderlich ansehen. Da es jedoch vom BfS eingeführt wurde und zudem als stützendes Argument verwendet werden kann, sollte es im Hinblick auf den räumlichen Anwendungsbereich konkretisiert werden (siehe unten F 7).

Im Ergebnis der Diskussion in diesem Abschnitt kommen wir zu folgenden Einschätzungen:

- E 1: Der Nachweis der (lokalen) Barrierenintegrität ist nur dann erbracht, wenn das Dilatanzkriterium und das Fluidkriterium eingehalten werden.**
- E 2: Für Grubenbaue, bei denen für den gegenwärtigen Zeitpunkt die Barrierenintegrität des sie umgebenden Gebirges rechnerisch nicht nachgewiesen werden kann, ist zur Erfüllung der NW (BI-3) und (BI-4) zu zeigen, dass sich die Zonen, in denen das Dilatanzkriterium oder das Fluidkriterium verletzt sind, so schnell und so weitgehend wie mit vertretbarem Aufwand erreichbar zurückbilden.**

6.3.2.3. Dilatanzkriterium

Eine Voraussetzung für die (lokale) Integrität der geologischen Barriere ist, dass der herrschende Beanspruchungszustand nicht geeignet ist, dilatante Verformungen in den anstehenden Gesteinen zu erzeugen. Dabei wird von der allgemein akzeptierten Vorstellung ausgegangen, dass eine dilatante Verformung nur dann auftritt, wenn das Gebirge oberhalb seiner Dilatanzfestigkeit beansprucht wird. Die Dilatanzfestigkeit ist eine Materialeigenschaft, die von den inneren Bindungskräften und damit auch von der Gefügestruktur des Festkörpers abhängt. Da die mechanische Beanspruchung des Gebirges nicht durch eine Zahl, sondern durch einen mehrkomponentigen (Spannungs-)Tensor beschrieben werden muss, lässt sich auch die Dilatanzfestigkeit nicht durch einen einfachen Zahlenwert ausdrücken. Sie kann jedoch als eine Ungleichung für die Komponenten des Spannungstensors formuliert werden. Erfüllen die einen bestimmten Spannungszustand beschreibenden Tensorelemente die (i. A. materialabhängige) Ungleichung, dann ist die Dilatanzfestigkeit des Materials nicht überschritten.

Aufgrund der inneren Komplexität des Salzgesteins ist es nicht möglich, die Dilatanzfestigkeit aus einem mikroskopischen Modell abzuleiten. Stattdessen wird sie in Laborversuchen für verschiedene Spannungszustände experimentell ermittelt. Aus den experimentell bestimmten (Grenz-)Spannungszuständen, bei denen das Material gerade noch kein dilatantes Kriechen aufweist, wird eine empirische Gleichung abgeleitet, die von den Grenzspannungszuständen erfüllt wird. Diese Gleichung stellt die Grenze der Dilatanzfestigkeit dar.

Da die Herleitung der Gleichung für die Dilatanzfestigkeit nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik empirisch erfolgt, gibt es keine verbindlichen Vorgaben zur Form dieser Gleichung. In [P 218] wird die Gleichung als Zusammenhang zwischen der Oktaederspannung τ und der



(negativen) mittleren Spannung σ beschrieben³² (vgl. Abschnitt 6.3.1 im vorliegenden Gutachten). Von der TUC wird die Dilatanzgrenze dagegen als Zusammenhang zwischen der Vergleichsspannung τ und der niedrigsten Hauptspannung σ_{\min} beschrieben³³. Beide Beschreibungsweisen sind nach dem heutigen Kenntnisstand zulässig, sofern sie in ausreichender Form experimentell abgesichert sind.

Die in [P 218] als Begründung des Dilatanzkriteriums (als Zusammenhang zwischen τ und σ) dargestellte Abbildung 3.4-2 entstammt [Cri 98] (dort Abbildung 4.26). Die dieser Abbildung zugrunde liegenden Versuche werden dort nicht weiter erläutert, sie scheinen an Proben aus dem Salzstock Gorleben durchgeführt worden zu sein. In Kapitel 2.1 von [Cri 98] wird angegeben, dass die Dilatanzgrenze praktisch unabhängig von der Deformationsrate, der Geometrie der Belastung und der Fazies des Salzgesteins sei.

Untersuchungen zur Dilatanzfestigkeit an Salzgesteinsproben aus dem ERAM enthalten die Berichte

- Bleich, W.; Schnier, H. (1998): Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen – Darstellung der Einzelergebnisse – BGR-Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 31.04.1998, I-063), Archiv-Nr. 117221, Hannover.

und

- Hunsche, U.; Plischke, I.; Schulze, O. (1998): ERA Morsleben – Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ – Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. – BGR-Bericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 31.05.1998, I-062), Archiv-Nr. 117213, Hannover.

Diese weisen folgende wesentlichen Defizite auf:

- Die Festlegung der Dilatanzfestigkeit der im Bereich des ERAM anstehenden Salzgesteine erfolgt nicht faziesbezogen.
- Für die Einschätzung der Dilatanzfestigkeit der im Bereich des ERAM anstehenden Salzgesteine werden lediglich 4 Versuche dokumentiert.

Diese Untersuchungen sind als Beleg des verwendeten Dilatanzkriteriums nicht ausreichend. Weiterhin liegen keine Belege für die vom BfS unterstellte Temperaturunabhängigkeit des Dilatanzkriteriums vor. Um den vom BfS verwendeten Ansatz für die Dilatanzgrenze dennoch bewerten zu können, werden gegenwärtig durch den Gutachter TUC entsprechende Laboruntersuchungen an Salzproben aus dem ERAM durchgeführt. Die gegenwärtig vorliegenden Ergebnisse lassen erwarten, dass die (faziesabhängigen) Dilatanzfestigkeiten größer sind, als die vom BfS angesetzte. Eine Bewertung des vom BfS verwendeten Dilatanzkriteriums erfolgt nach Abschluss der Untersuchungen an der TUC.

³² $\sigma = -1/3 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ mit $\sigma_j =$ Hauptspannungen ($< 0 \Rightarrow$ Spannung, $> 0 \Rightarrow$ Druck)

³³ $\sigma_{\min} = \min (-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3)$ mit $\sigma_j =$ Hauptspannungen ($< 0 \Rightarrow$ Spannung, $> 0 \Rightarrow$ Druck)



6.3.2.4. Fluidkriterium

Die vorliegenden laborativen Untersuchungen zur druckgetriebenen Infiltration haben belegt, dass der aus dem Bereich des hydraulischen Fracens bekannte und für die Initiierung der Fluidinfiltration erforderliche Aufreißdruck, der größer ist als die minimale Hauptspannung im Gebirge, bei einer quasistationären Fluidruckbelastung nicht angesetzt werden kann. Vielmehr zeigen die Laboruntersuchungen, dass bei quasistationärer Fluidruckbelastung eine Infiltration bereits im Niveau von $p_{fl} \approx \min(-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3)$ erfolgt.

Wir bewerten deshalb das Fluidkriterium in der in [P 218] angegebenen Form als geeignet.

6.3.2.5. Kriterium für die Vergleichsverzerrung

In den Unterlagen des BfS wird das Kriterium für die Vergleichsverzerrung nicht in Form einer Gleichung angegeben. Die Unterlage [P 218] ist diesbezüglich zu ergänzen (s. Forderung F 7).

Als Begründung für dieses Kriterium gibt das BfS unter Verweis auf eine Dissertation von 1983 [Sto 83] an, dass es sich an ein „Aversin-Kriterium“ anlehne. In [Sto 83] wird kein „Aversin-Kriterium“ definiert³⁴. Allerdings schlägt der Autor in [Sto 83] vor, dass für den Kalibergbau in der DDR die zulässige horizontale Dehnung an der Oberfläche der Salinarschutzschicht (aus Steinsalz) 10 mm/m betragen sollte. Er begründet dies i. W. damit, dass

- in einer englischen Vorschrift aus dem Jahr 1968 dieser Wert als Maximalwert für Verzerrungen in der Sandsteinbarriere bei Kohleabbau unter dem Meer angegeben wird,
- (nicht näher spezifizierte) Laborversuche ergeben hätten, dass Salzgestein oberhalb einer Verzerrung von 1,2 % durchlässig wird und
- Bergwerke, bei denen die nach Aversin berechnete maximale horizontale Dehnung unter 10 mm/m liegt, trocken geblieben sind.

Diese Begründung entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Weiterhin weisen wir darauf hin, dass die in [Sto 83] empfohlene Begrenzung der horizontalen Dehnung eher einem Kriterium für die Hauptverzerrung als für die Vergleichsverzerrung entspricht.

Wir empfehlen deshalb:

F 7: Vom BfS sollte das von ihm gewählte Kriterium für die Vergleichsverzerrung in der Salzbarriere

- **als Formel formuliert,**
 - **im Hinblick auf den räumlichen Anwendungsbereich konkretisiert und**
 - **begründet**
- werden.**

³⁴ Es wird unter Verweis auf eine Arbeit von S. G. Aversin (1971) eine Gleichung zur Ermittlung der maximalen horizontalen Dehnung ε_{\max} an der Oberfläche von Schutzschichten aus anderen geometrischen Größen für Strebruchbau angegeben. (*Diese Arbeit liegt uns nicht vor.*)



6.4. Ausreichend dicke Salzbarriere für „nicht zutrittsgefährdete“ Grubenräume

6.4.1. Angaben in [P 218]

Als *nicht zutrittsgefährdet* definiert das BfS Grubenbaue,

- die mehr als 130 m unter dem Salzspiegel liegen oder
- die mehr als 60 m vom Salzspiegel und mehr als 25 m von Anhydritschollen oder Kalilagern entfernt sind, die eine Verbindung zum Deckgebirge aufweisen.

Unter Verweis auf [P 67] wird auf S. 16 angegeben, dass die Sicherheit nicht zutrittsgefährdeter Abbaue „*automatisch durch die Einhaltung der oben [...] aufgeführten Sicherheitsabstände gewährleistet*“ wird.

6.4.2. Bewertung

Da die „nicht zutrittsgefährdeten“ Grubenbaue durch die genannten Abstandskriterien definiert sind, ist der Nachweis, dass diese eingehalten sind, trivial und aus der Definition heraus schon gegeben. Oben wiesen wir darauf hin, dass dieses NW wenig sinnvoll ist, und empfahlen, dass das BfS die Nachweiserfordernisse präzisiert und aus dem Regelwerk ableitet.

Mögliche sinnvolle NW sind:

- Nachweis, dass bei Einhaltung dieser Abstandskriterien zwischen Grubenbau und Salzspiegel bzw. Anhydritscholle ein Laugenzutritt dauerhaft ausgeschlossen ist.
- Nachweis, dass wenn das nach den Kriterien des Abschnitts 6.3 ungestörte Salzgebirge die genannten Mächtigkeiten aufweist, ein Laugenzutritt durch diese Salzbarriere auch bei Berücksichtigung geologisch bedingter Unsicherheiten dauerhaft ausgeschlossen ist.

Dieser Nachweis wäre dann zu kombinieren mit dem Nachweis, dass die „nicht zutrittsgefährdeten“ Grubenbaue dauerhaft von einer entsprechend mächtigen Barriere aus ungestörtem Salzgestein umgeben sind.

Nach unserem Verständnis geht das BfS davon aus, dass der erstgenannte Nachweis durch den Verweis auf [P 67] erbracht wurde. In [P 67] werden die Sicherheitsabstände vorgeschlagen und auf S. 65 wie folgt begründet:

- „Die „Schutzmächtigkeit“ der Salzbarriere gegen „Standwässer“ des Deckgebirges wird in der bergbaulichen Praxis üblicherweise mit 60 bis 80 m festgelegt. Beim Salzlösungszutritt im Lager H wurde sie erheblich unterschritten und beträgt noch ca. 40 m. Andere Hochbaue im Grubenfeld Marie mit ähnlichen Restmächtigkeiten der Salzscheibe gegen die Hutgesteinsbasis blieben zuflußfrei. [...] Es erscheint den Verhältnissen im ERAM angemessen, alle Grubenhohlräume im Stein- und Kalisalz, die weniger als 60 m vom Salzspiegel entfernt sind, als grundsätzlich zuflußgefährdet infolge nicht ausschließbarer geogener Durchlässigkeiten des Salzes aufzufassen.“ Im Umkehrschluss werden alle Grubenbaue, die mehr als 60 m vom Salzrand (inkl. Salzspiegel) entfernt sind, als nicht zuflussgefährdet aufgefasst.



- „Die bergamtlich verfügbaren Sicherheitsabstände um Tiefbohrungen im Salz betragen für die Gruben Bartensleben und Marie ca. 15 bis 30 m, meistens 25 m.“ Dieser typische Abstand wird im Folgenden in [P 67] als ausreichender Sicherheitsabstand zu potentiell Lösung führenden Anhydritschollen angewandt.
- Nach [P 67] können Anhydritschollen Wasserwegsamkeiten darstellen, wobei sich die Wasserwegsamkeit auf die einzelne Anhydritscholle beschränkt. Wasserwegsamkeiten zwischen Anhydritschollen werden ausgeschlossen. „Die Tiefenreichweite der an der Hutgesteinsbasis anstehenden einzelnen Anhydritschollen ist im geologischen Lagerstättenmodell mit durchschnittlich 90 bis 110 m dargestellt [...], wobei nach Ansicht der Bearbeiter die Zerstückelung tatsächlich noch größer ist.“ In [P 67] wird deshalb im Folgenden angesetzt, dass Grubenbaue, die mehr als 130 m unter dem Salzspiegel liegen, auch unter Berücksichtigung möglicher Wasserwegsamkeiten in Anhydritschollen nicht zuflussgefährdet sind. Auf Kalilager geht [P 67] in diesem Zusammenhang nicht ein.

Die Argumentation in [P 67] ist nicht ausreichend, da die praktischen Erfahrungen, auf die sich die BGR hier beruft, nur für die Betriebszeit der Gruben vorliegen können. Damit können sie für die Bewertung der betrieblichen Sicherheit in der Phase der „Bauzustände“ herangezogen werden, nicht aber für die Bewertung der Langzeitsicherheit.

Wir kommen deshalb zu den folgenden Ergebnissen:

- E 3: Die vom BfS als „nicht zutrittsgefährdet“ bezeichneten Grubenbaue sind hinsichtlich der Barrierenintegrität mit den gleichen Methoden und Kriterien zu bewerten wie die „zutrittsgefährdeten Grubenbaue“. Die Abstandskriterien des BfS können lediglich als zusätzliche stützende Argumente herangezogen werden.**
- F 8: Vom BfS sollten für die als „nicht zutrittsgefährdet“ bezeichneten Grubenbaue die gleichen Nachweise wie für die „zutrittsgefährdeten Grubenbaue“ vorgelegt werden.**

6.5. Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel

6.5.1. Angaben in [P 218]

Als Kriterium für die Geringfügigkeit wird eine Temperaturerhöhung am Salzspiegel von 1 K zugelassen. Als Begründungen für diesen Wert werden angegeben:

- Der Wert liegt in der Größenordnung natürlicher Temperaturschwankungen z. B. aufgrund von Rekristallisationsprozessen.
- Der Wert liegt in der Größenordnung der durch die bisherigen Auffahrung und Nutzung des ERAM hervorgerufenen Temperaturschwankungen.
- In Grundwasserneubildungsgebieten haben geringfügige Temperaturschwankungen keine signifikanten Auswirkungen auf den Grundwasserstrom.

Das NW besteht nur für die Phase der Bauzustände. Im stabilen Endzustand ist die Temperaturerhöhung durch den Eintrag der Hydratationswärme definitionsgemäß wieder abgeklungen.



Es wird darauf hingewiesen, dass sich bei Einhaltung dieses 1 K-Kriteriums „auch die Subrosionsraten [...] nicht nennenswert ändern“ dürften ([P 218] S. 16).³⁵

6.5.2 Bewertung

Die drei Begründungen für den Zahlenwert des Temperaturkriteriums sind für uns nicht nachvollziehbar:

- Es fehlt ein Beleg für die Behauptung, dass es in der Natur aufgrund von Rekristallisationsprozessen zu Temperaturschwankungen von der Größenordnung 1 K kommt. Die in der Natur vorkommenden Rekristallisationsprozesse laufen typischerweise sehr langsam ab. Uns sind keine Fälle bekannt, in denen die angegebenen Temperaturschwankungen beobachtet wurden.
- Bezüglich des zweiten Arguments ist zu präzisieren, wo die hier erwähnten „hervorgerufenen Temperaturschwankungen“ aufgetreten sind (vermutlich ist hier der Salzspiegel gemeint) und wie dies ermittelt wurde. Weiterhin wäre zu klären, woher die (hier implizit vorausgesetzte) Erkenntnis stammt, dass die bisherigen bergbaulichen Arbeiten zu keiner Beeinflussung der Deckgebirgswässer geführt haben.
- Da unklar ist, zu welchem genauen Zweck das Temperaturkriterium aufgestellt wurde, kann nicht beurteilt werden, ob sich die Verhältnisse in Grundwasserneubildungsgebieten auf die vorliegende Situation übertragen lassen und welche Beweiskraft dieser Verweis enthält.

Unabhängig hiervon stimmen wir den Ausführungen in [P 218] in soweit zu, dass es aufgrund der bekannten Temperaturabhängigkeit von Dichte, Viskosität und Salzlösevermögen des Wassers auch ohne einen gegenständlichen Nachweis plausibel erscheint, dass eine Temperaturerhöhung am Salzspiegel um ca. 1 K keine signifikanten Auswirkungen auf den Grundwasserfluss und die Subrosionsrate hat.

Eine Bewertung des Temperaturkriteriums kann jedoch erst nach Klarstellung des zugrunde liegenden Nachweiserfordernisses erfolgen (siehe F 1 bis F 4).

6.6. Schutz der obersten Anhydritschollen

6.6.1. Angaben in [P 218]

Für die Phase der Bauzustände und die Phase des stabilen Endzustands werden in [P 218] unterschiedliche Kriterien angesetzt.

- Während der Phase der Bauzustände gilt das NW als erfüllt, wenn (mindestens) eines der beiden folgenden Kriterien erfüllt ist:
 - (i) Die Temperaturerhöhung in der obersten Anhydritscholle beträgt weniger als 2 K.

³⁵ Wir gehen davon aus, dass hiermit die Subrosionsraten an den Begrenzungen des Salzstocks (Salzspiegel, Flanken des Salzstockes) gemeint sind. Die Löslichkeit von Salz im Wasser steigt mit der Temperatur an und ein Wärmeeintrag kann grundsätzlich zu thermischen Konvektionen führen. Solche Effekte sollen ausgeschlossen werden.



- (ii) Die Spannungszustände in der obersten Anhydritscholle
 - unterschreiten eine vorgegebene Bruchgrenze oder – sofern sie diese Bruchgrenze überschreiten –
 - weisen eine Verbesserung auf.
- Während der Phase des stabilen Endzustands wird nur das Kriterium (ii) herangezogen, wobei das Nachweiserfordernis nun „wünschenswert“, aber nicht mehr zwingend ist (vgl. Kapitel 4.1).

Die Bruchgrenze wird in [P 218] durch ein Drucker-Prager-Kriterium festgelegt:

$$0,415 \cdot J_1 + \sqrt{J_2^D} = 0$$

mit $J_1 = 1$. Invariante des Spannungstensors

$J_2^D = 2$. Invariante des Spannungsdeviators

Eine Verbesserung eines Spannungszustands (im Hinblick auf die Bruchgrenze) liegt nach [P 218] dann vor, wenn er sich („von oben“) an die Bruchgrenze annähert³⁶.

Als Begründung für das Temperaturkriterium wird angegeben:

- Die Wettertemperaturen im ERAM weisen im Jahresverlauf Schwankungen im Bereich von 2 K (im Westfeld auch bis 6 K) auf, ohne dass dies erkennbar die aufgeschlossenen Anhydritpartien beeinflusst (z. B. hinsichtlich einer erhöhten Abschaltung).
- Die festigkeitsmechanischen Versuche der BGR am Anhydrit werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Diese ist als Temperaturbereich von 20 °C bis 25 °C festgelegt. Eine Temperaturschwankung von 5 K hat offensichtlich keinen relevanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

Die Verwendung einer Bruchgrenze als Spannungskriterium wird damit begründet, dass im Fall des Anhydrits Bruch- und Dilatanzgrenze zusammenfallen. Weiterhin wird angegeben, dass die Parameter 0,415 und 0 dem „*derzeitigen Kenntnisstand*“ entsprechen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Feststellung der Zustandsverbesserung unabhängig von der konkreten Bruchgrenze ist.

6.6.2. Bewertung

Da sich die mechanischen Spannungen in der obersten Anhydritscholle auch dann ändern können, wenn die Temperatur dort gleich bleibt, ist unklar, weshalb in der Phase der Bauzustände das Temperaturkriterium als ausreichend für Schutz der obersten Anhydritscholle angesehen wird. Dies sollte vom BfS dargelegt werden.

Weiterhin sind die Begründungen für das Temperaturkriterium nicht schlüssig bzw. unvollständig:

- Beim Verweis auf die schwankenden Wettertemperaturen im ERAM ist darzulegen, welche systematischen Beobachtungen bzw. Untersuchungen an den dort aufgeschlossenen Anhydritpartien zur Ermittlung möglicher Beeinflussung durchgeführt wurden. Auch ist zu erläutern,

³⁶ Diese Ausdrucksweise ist etwas vereinfachend. Tatsächlich ist die Bruchgrenze eine konvexe Oberfläche im Spannungsraum. Ein Spannungszustand liegt „unter“ der Bruchgrenze, wenn er sich im Inneren der konvexen Fläche befindet. Er liegt „oberhalb“ der Bruchgrenze, wenn er sich im Inneren der konvexen Fläche befindet.



weshalb aus dem Fehlen einer erhöhten Abschalung geschlossen werden kann, dass im Inneren des Anhydrits keine zusätzlichen Wegsamkeiten entstanden sind.³⁷

- Der im Labor zulässige Temperaturbereich kann nicht ohne weitere Begründung auf ein Bergwerk übertragen werden. Aufgrund der größeren Abmessungen und Materialinhomogenitäten können Temperaturschwankungen im Gebirge größere Spannungsunterschiede bewirken als im Labor.

Grundsätzlich sollte u. E. ein rechnerische Nachweis geführt werden, dass die Spannungszustände in der Anhydritscholle unter Berücksichtigung relevanter thermischer Effekte zu keiner Rissbildung führen können. Wir empfehlen deshalb:

F 9: Vom BfS sollte im Rahmen der Nachweise zur Barrierenintegrität bzw. Barrierewirkung ein rechnerischer Nachweis geführt werden, dass die Spannungszustände in den relevanten Anhydritschollen unter Berücksichtigung thermischer Effekte zu keiner Rissbildung führen können.

Bei Verwendung der üblichen Vorzeichenkonvention, nach der Zugspannungen ein positives und Drücke ein negatives Vorzeichen haben, lautet das Drucker-Prager-Kriterium mit den vom BfS verwendeten Parametern 0,415 und 0 MPa

$$\sqrt{J_2^D} = 0,415 \cdot J_1$$

In der Darstellungsweise, die das BfS für das Dilatanzkriterium verwendet (Formulierung als Relation sowie Verwendung der Oktaederspannung τ und der negativen effektiven Spannung σ ; s. Abschnitt 6.3.1), lautet das Kriterium

$$\tau \leq 0,415 \cdot \sqrt{6} \cdot \sigma = 1,0165 \cdot \sigma$$

Bei der Festlegung der Materialparameter (und damit der Faktoren in den angegebenen Gleichungen) ist zu beachten, dass für geklüftetes Festgestein nicht die Bruchfestigkeit des Gesteins, sondern vielmehr die Bruchfestigkeit des Gebirges (Gestein und Trennflächen) maßgeblich ist. Eine Einschätzung zur Gebirgsfestigkeit des Anhydrits fehlt jedoch. Weiterhin fehlen Belege für

- die behauptete Gleichheit von Dilatanz- und Bruchfestigkeit des Anhydrits und
- die implizierte Temperaturunabhängigkeit des Bruchkriteriums.

Bei den Kriterien zum Schutz des Anhydrits wird die Zugspannung als ein weiterer potentiell schädigender Faktor nicht berücksichtigt.

Wir empfehlen deshalb:

F 10: Vom BfS sollte dargelegt werden, dass bei der Parametrisierung des Bruchkriteriums die Bruchfestigkeit des Gebirges (Gestein und Trennflächen) zugrunde gelegt wurde.

F 11: Vom BfS sollte die in [P 218] behauptete Gleichheit von Dilatanz- und Bruchfestigkeit des Anhydrits belegt werden. Sofern dieser Beleg nicht vorgelegt wird, sollte auch für

³⁷ Sofern das Ausbilden von Abschalungen ein langsamer Prozess ist, reagiert er nicht unmittelbar auf vergleichsweise kurzzeitige Temperaturschwankungen, sondern zeigt ein zeitlich gemitteltes Verhalten.



den Anhydrit ein Dilatanzkriterium formuliert werden, das auf der Grundlage standortspezifischer Daten belegt ist.

F 12: Vom BfS sollte die in [P 218] implizit unterstellte Temperaturunabhängigkeit des Bruchkriteriums für den hier relevanten Temperaturbereich belegt werden.

F 13: Vom BfS sollte dargelegt werden, weshalb für die Bewertung des Schutzes von Anhydritschollen auf ein Kriterium für die Bewertung von Zugspannungen verzichtet werden kann bzw. es sollte ein solches Kriterium festgelegt werden.

In wieweit der Nachweis einer Zustandsverbesserung an die Stelle des Nachweises der Bruchfreiheit treten kann, ist im Ergebnis der Ableitung der Nachweiserfordernisse zu klären (s. F 1 bis F 4). Hierbei ist zu festlegen, ob diese Forderung lokal, d. h. für alle Punkte im Modellgitter und für alle Zeitschritte, einzuhalten ist, oder ob und wenn ja welche Ausnahmen bzw. Mittelungen zulässig sind.

Allerdings weisen wir darauf hin, dass aus einer Verbesserung des Spannungszustands nicht geschlossen werden kann, dass sich auch der Gebirgszustand hinsichtlich Verformungen und Wegsamkeiten verbessert. Diesbezügliche Verschlechterungen können auch bei einem verbesserten Spannungszustand auftreten, solange das Bruchkriterium und ein entsprechendes Zugspannungskriterium nicht erfüllt werden.

6.7. Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen

6.7.1. Angaben in [P 218]

In Abschnitt 3.4.3 von [P 218] werden zur Bewertung der Arbeitssicherheit die folgenden Kriterien benannt:

- Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium für Steinsalz³⁸

$$\frac{\tau}{\sigma^*} \leq 1,998 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^{0,65}$$

mit $\sigma^* = 1 \text{ MPa}$,

τ = Oktaederspannung

σ = negative effektive Spannung

³⁸ In [P 218] wird angegeben: $\frac{\tau}{\sigma^*} \leq b \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^p \cdot \frac{2 \cdot k}{(1+k) + (1-k) \cdot J_m}$ mit $J_m = \frac{m \cdot (9 - m^2)}{(3 + m^2)^{3/2}}$

und $b = 2,7$; $p = 0,65$; $k = 0,74$; $m = 1$ ($\Rightarrow J_m = 1$). Eine Begründung oder ein Literaturverweis für Gleichung und Parameter werden nicht gegeben.



- (Kriterium für die) Spaltzugfestigkeit für Steinsalz

$$\max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \leq 1 \text{ MPa}^{39}$$

Der Wert 1 MPa wird in [P 218] wie folgt begründet: Von der TUC wird in [Due 99] 1,3 MPa als charakteristischer Wert der Spaltzugfestigkeit aus Kurzzeitversuchen unabhängig von der stratigrafischen Einheit angegeben. Dieser Wert wird entsprechend DIN 1054 durch einen Sicherheitsbeiwert von 1,25 dividiert. Hieraus ergibt sich ein Bemessungswert von 1 MPa.

- (Kriterium für die) einaxiale Druckfestigkeit für Steinsalz

$$\max(-\sigma_1, -\sigma_2, -\sigma_3) \leq 15 \text{ MPa}^{40} \text{ (Bedingung gilt nur im Bereich von Tragelementen)}$$

Der Wert 15 MPa wird in [P 218] wie folgt begründet: Aus „*altem Datenmaterial*“ lässt sich 20,5 MPa als charakteristischer Wert der einaxialen Druckfestigkeit aus Kurzzeitversuchen unabhängig von der stratigrafischen Einheit ermitteln. Dieser Wert wird entsprechend DIN EN 1997-1 durch einen Sicherheitsbeiwert von 1,4 dividiert. Untersuchungen der BGR [BGR 98] zeigten, dass für die einaxiale Druckfestigkeit auch ein Wert von größer 15 MPa „*in Betracht gezogen werden kann*“.

- Dilatanzkriterium für Steinsalz

(s. Abschnitt 6.3.1)

- (Kriterium für die) rechnerische Hauptverzerrung

Dieses Kriterium wird nicht in der Übersicht auf S. 18 in [P 218] aufgeführt, aber auf S. 20 in Zusammenhang mit dem Dilatanzkriterium erwähnt. Danach sind die Bedingungen für den Kriechbruch „*insbesondere bei gleichzeitiger Existenz einer rechnerischen Hauptverzerrung von mehr als 2 – 3 % in durchgehenden Bereichen*“ gegeben. Eine Gleichung sowie eine Begründung oder ein Literaturverweis für dieses Kriterium werden in [P 218] nicht angegeben.

- Lastpfadkriterium zur Überprüfung der Zustandsverbesserung

Hinsichtlich der Arbeitssicherheit liegt nach [P 218] eine Zustandverbesserung dann vor, wenn sich der Spannungszustand in den konturnahen Bereichen sowie in den Tragelementen Schweben und Pfeilern („von oben“) an die Dilatanzgrenze annähert.

Zur Anwendung bzw. Interpretation der Kriterien im Rahmen der Nachweisführung (zum Nachweis der Arbeitssicherheit) werden in [P 218] die folgenden Angaben gemacht:

- Bereiche mit rechnerischer Überschreitung des Kurzzeitbruchfestigkeitskriteriums werden als nicht tragfähig angesehen und daraufhin überprüft, „*ob sich rechnerisch ausgedehnte Zonen der*

³⁹ [P 218] enthält keinen Formelausdruck für dieses Kriterium. Die von uns hier angegebene Formel bedeutet, dass die zulässigen Spannungen diese Relation erfüllen müssen; andernfalls liegt eine (Makro-)Rissgefährdung vor. Zugspannungen weisen ein positives Vorzeichen auf.

⁴⁰ [P 218] enthält keinen Formelausdruck für dieses Kriterium. Die von uns hier angegebene Formel bedeutet, dass die zulässigen Spannungen diese Relation erfüllen müssen; andernfalls ist der Bereich bruchgefährdet. Drücke weisen ein negatives Vorzeichen auf.



Überschreitung und aus diesen frei bewegliche, kinematisch verschiebliche Bruchkörper ausbilden“.

Im Fall der Ausbildung von Bruchkörpern sind zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes weitere Einzelfallbetrachtungen notwendig.

- Bereiche mit einer Zugspannungskomponente von mehr als 1 MPa werden als durch Makrorisse rissgefährdet angesehen und daraufhin überprüft, *„ob sich rechnerisch ausgedehnte Zonen der Überschreitung und aus diesen frei bewegliche, kinematisch verschiebliche Bruchkörper ausbilden“.*

Im Fall der Ausbildung von Bruchkörpern sind zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes weitere Einzelfallbetrachtungen notwendig.

- Bereiche in Tragelementen (Schweben und Pfeiler) mit einer Druckspannungskomponente von mehr als 15 MPa werden als bruchgefährdet angesehen und daraufhin überprüft, *„ob rechnerisch ausgedehnte Zonen der Überschreitung vorhanden sind, so dass kinematisch verschiebliche Teilsysteme entstehen können“.*

In diesem Fall sind zur Gewährleistung des Arbeitsschutzes weitere Einzelfallbetrachtungen notwendig.

- Wird das Dilatanzkriterium überschritten, sind die Bedingungen für Kriechbruch gegeben. *„Dies gilt insbesondere bei gleichzeitiger Existenz einer rechnerischen Hauptverzerrung von mehr als 2 – 3 % in durchgehenden Bereichen.“*

„In diesem Fall“ sind weitere Einzelfallbetrachtungen notwendig.

- Beim Fehlen von lokalen Bruchkörpern ist der Nachweis der Zustandsverbesserung in den konturnahen Bereichen und in den Tragelementen (Schweben oder Pfeiler) für den Sicherheitsnachweis hinreichend. Der Nachweis der Zustandsverbesserung erfolgt mittels des o. g. Lastpfadkriteriums, wonach sich der Spannungszustand (von „oben“) an die Dilatanzgrenze (oder eine lineare Approximation der Dilatanzgrenze) annähern muss.

Der Nachweis der Zustandsverbesserung braucht nur für den Zeitraum geführt werden, für den das Tragelement (Schwebe oder Pfeiler) entweder aus Gründen der Standsicherheit des gesamten Hohlraumsystems bzw. der Barrieren oder aus der Notwendigkeit des Arbeitsschutzes erforderlich ist.

Bei Versatzmaterialien, die keine Hydratationswärme entwickeln, wird die Kontur durch den Versatz eingespannt, was „automatisch“ zu einer Zustandsverbesserung für die Tragelemente Schweben und Pfeiler führt. Ein numerischer Nachweis ist i. d. R. hier nicht erforderlich.

Für den Fall, dass die Arbeitssicherheit auf Basis der allgemeinen Einschätzung, der Wirtsgesteinsuntersuchungen und der Berechnungsergebnisse nicht gewährleistet werden kann, werden die Berechnungsergebnisse gemäß [P 218] in Zusammenhang mit In-situ-Befunden (Vorhandensein von statisch relevanten Trennflächen und -systemen) im Hinblick auf den Arbeitsschutz erneut bewertet: *„In Abhängigkeit des ausgewiesenen Sicherheitsniveaus für Tragfähigkeit und der arbeitssicherheitslichen Anforderungen werden abgestuft geeignete zusätzliche Sicherheitselemente bestimmt, die auf der Beobachtungsmethode (Verweis auf die DIN 1054) sowie technisch-*



organisatorischen Maßnahmen beruhen. Die technisch-organisatorischen Maßnahmen sind im Rahmen eines Konzepts von Vorsorgemaßnahmen beschrieben und es ist systematisch gezeigt, dass durch die zusätzlichen Sicherheitselemente eine angemessene Arbeitssicherheit gewährleistet ist.“ (Verweis auf Unterlage /6/ = [G 216])

6.7.2. Bewertung

Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium

Es wird lediglich ein Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium für Steinsalz angegeben. Weiterhin wird das Kriterium nicht begründet. Wir empfehlen deshalb:

F 14: Vom BfS sollte das von ihm verwendete Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium auf der Grundlage standortbezogener Versuche zum Festigkeitsverhalten der anstehenden Gesteine begründet werden.

E 4: Das Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium sollte standort- und faziesbezogene Materialeigenschaften berücksichtigen und einen rheologischen Teilsicherheitsbeiwert (Abminderung der Festigkeit aufgrund der Standzeit) und einen Teilsicherheitsbeiwert für Imponderabilien aus Berechnungsverfahren und Idealisierungen aufweisen.

Kriterium für die Druckfestigkeit

Das Kriterium für die Druckfestigkeit kann sich als überflüssig erweisen, da die angesetzte einaxiale Druckfestigkeit von 15 MPa grundsätzlich höher ist als die für einaxiale Beanspruchungszustände mit dem oben angegebenen Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium berechnete Festigkeit und dies vermutlich auch für ein entsprechend E 4 und F 14 überarbeitetes Kurzzeitbruchfestigkeitskriterium gelten wird.

Kriterium für die Zugfestigkeit

Die in der Begründung für das Kriterium für die Zugfestigkeit verwendeten Bezeichnungen „charakteristischer Wert“, „Sicherheitsbeiwert“ und „Bemessungswert“ sind dem Eurocode 7 entnommen und wie folgt festgelegt:

- „Der charakteristische Wert eines Boden- bzw. Felsparameters muss als vorsichtiger Schätzwert des Kennwertes festgelegt werden, der das Auftreten des Grenzzustandes auslöst.“
- „Die Bemessungswerte für Baugrundkennwerte X_d werden entweder aus den charakteristischen Werten X_k nach der Gleichung $X_d = X_k / \gamma_m$ abgeleitet, wobei der Teilsicherheitsbeiwert für den entsprechenden Bodenkennwert ist oder direkt festgestellt wird.“

Der in [P 218] dokumentierte Verzicht auf eine faziesbezogene Festlegung der zulässigen Zugspannungen ist u. E. nicht vereinbar mit der Forderung des Eurocode 7, den charakteristischen Wert (der Zugfestigkeit) als vorsichtigen Schätzwert des Kennwertes festzulegen, der das Auftreten des Grenzzustandes (Zugriss oder Trennbruch) auslöst. Die in [Due 98] erhaltenen Versuchsergebnisse zeigen signifikante Unterschiede in den Spaltzugfestigkeiten unterschiedlicher stratigraphischer Einheiten des ERAM. Wir halten es nicht für sachgerecht, dass die Ableitung der für zulässig erachteten Zugspannungen nicht nach Fazies getrennt erfolgt und auch lokationsbezogene Besonder-



heiten wie z. B. die Lage der Zugspannungen zu Schichtgrenzen nicht berücksichtigt werden. Wir empfehlen deshalb:

E 5: Bei der Festlegung des Zugspannungskriteriums sollten die Fazies und die beanspruchungsbezogenen Randbedingungen berücksichtigt werden.

Dilatanzkriterium

Wir verweisen auf unsere Bewertung in Abschnitt 6.3.2, wonach das Kriterium für die Dilatanz auf der Grundlage von Laborversuchen lokationsbezogen (d. h. standortspezifisch) begründet werden sollte.

Kriterium für die Hauptverzerrung

Das Kriterium für die Hauptverzerrungen⁴¹ wird nicht als Formel angegeben und nicht begründet. Wir empfehlen deshalb:

F 15: Das Kriterium für die Hauptverzerrung sollte in [P 218] als Formel angegeben und begründet werden.

Lastpfadkriterium

Das Lastpfadkriterium dient zur Überprüfung, ob sich der Spannungszustand in einem betrachteten Gebirgsbereich verbessert. Da es jedoch auch bei einem sich verbessernden Spannungszustand zu einer weiteren Verschlechterung der Standsicherheitsverhältnisse in dem betrachteten Gebirgsbereich kommen kann (sofern auch der verbesserte Spannungszustand das Bruch- oder Dilatanzkriterium nicht erfüllt), halten wir dieses Kriterium nicht für geeignet, um die Arbeitssicherheit nachzuweisen. Wir kommen deshalb zu der Einschätzung:

E 6: Der Nachweis der Zustandsverbesserung ist nicht geeignet, um die Arbeitssicherheit nachzuweisen.

Anwendung und Interpretation der Kriterien

Die Angaben zur Anwendung bzw. Interpretation der Kriterien im Rahmen der Nachweisführung zur Arbeitssicherheit sind z. T. nicht eindeutig formuliert. Es bestehen folgende Unklarheiten:

- (1) Die Kriterien, ab wann die rechnerisch ermittelten Zonen der Überschreitung (des Kurzzeitbruchfestigkeitskriteriums, des Zugspannungskriteriums oder das Druckspannungskriteriums) als „*ausgedehnt*“ eingestuft werden, werden nicht angegeben.
- (2) Es wird nicht angegeben, wie die Überprüfung, ob sich aus rechnerisch ausgedehnten Zonen der Überschreitung dieser Kriterien „*frei bewegliche, kinematisch verschiebliche Bruchkörper*“ bzw. „*kinematisch verschiebliche Teilsysteme*“ ausbilden, erfolgen soll. Wird das Vorliegen von rechnerisch ausgedehnten Zonen der Überschreitung dieser Kriterien mit der Ausbildung kinematisch verschieblicher Bruchkörper bzw. Teilsysteme gleichgesetzt? Oder

⁴¹ Als Hauptverzerrungen werden die Verzerrungen ε_j in Richtung der Hauptachsen j des Verzerrungstensors bezeichnet.



werden zur Feststellung der Ausbildung kinematisch verschieblicher Bruchkörper bzw. Teilsysteme zusätzliche Berechnungen oder Untersuchungen durchgeführt? Insbesondere bleibt unklar, welche Arbeiten den Sicherheitselementen 1 bis 3 und welche dem Sicherheitselement 4 zugeordnet werden.

- (3) Es ist unklar, ob die Überprüfung auf Dilatanz und Hauptverzerrung immer erfolgen soll oder nur dann, wenn zuvor eine Verletzung des Kurzzeitbruchfestigkeitskriteriums, des Zugspannungskriteriums oder des Druckspannungskriteriums festgestellt wurde.
- (4) Es ist unklar, ob sich die Formulierung „*in diesem Fall*“ (und damit das Einleiten von Einzelfallbetrachtungen) auf die gleichzeitige Verletzung von Dilatanz- und Hauptverzerrungskriterium oder auf die Verletzung (nur) des Dilatanzkriteriums bezieht.
- (5) Die Kriterien, ab wann Bereiche mit Verletzung des Hauptverzerrungskriterium als „durchgehend“ eingestuft werden, werden nicht angegeben.
- (6) Es sollte klar gestellt werden, dass (bzw. ob) bei der Erläuterung des Nachweises der Zustandsverbesserung mit dem Begriff „*lokale Bruchkörper*“ die zuvor erwähnten „*frei beweglichen, kinematisch verschieblichen Bruchkörper*“ oder/und die „*kinematisch verschieblichen Teilsysteme*“ gemeint sind.
- (7) Es sollte klar gestellt werden, dass (bzw. ob) bei der Erläuterung des Nachweises der Zustandsverbesserung mit dem Begriff „*Sicherheitsnachweis*“ der Nachweis der Gewährleistung der Arbeitssicherheit gemeint ist.
- (8) Es sollte klar formuliert werden, ob die Zustandsverbesserung lokal, d. h. für alle Punkte im Modellgitter und für alle Zeitschritte, einzuhalten ist, oder ob und wenn ja welche Ausnahmen bzw. Mittelungen zulässig sind.
- (9) Es ist unklar, was im Rahmen des Nachweises der Arbeitssicherheit unter „Standssicherheit der Barrieren“ zu verstehen ist ([P 218] S. 21 Zeile 7).
- (10) Es ist unklar, wie im Rahmen des Nachweises der Zustandsverbesserung (bzw. der Arbeitssicherheit) ermittelt und festgelegt wird, für welchen Zeitraum ein Tragelement aus Gründen der Standssicherheit des gesamten Hohlraumssystems bzw. der Barrieren erforderlich ist.
- (11) Es fehlt eine Begründung, weshalb das Einbringen von Versatzmaterialien, die keine Hydrationswärme entwickeln, „automatisch“ zu einer Zustandsverbesserung in den Schweben auch der darunter liegenden Abbaue führt (die ja auch Tragelemente sind) bzw. weshalb diese nicht berücksichtigt werden müssen. Da im Rahmen der Stilllegung jedoch fast ausschließlich Salzbeton als Verfüllmaterial eingesetzt werden soll, ist dieser Punkt nur von geringer praktischer Bedeutung.

In [G 216] sind ebenfalls Angaben zur Anwendung bzw. Interpretation der Kriterien im Rahmen der Nachweisführung zur Arbeitssicherheit enthalten. Auch hier sind die Angaben teilweise nicht eindeutig formuliert. Zudem bestehen Abweichungen zu den Angaben in [P 218]. Hierauf gehen wir im Rahmen der Prüfung der Unterlage [G 216] ein.

Wir empfehlen jedoch schon jetzt:



F 16: Die Anwendung bzw. die Interpretation der Kriterien im Rahmen der Nachweisführung zur Arbeitssicherheit sollten präzisiert werden.

Die Angaben zu den Sicherheitselementen 4 und 5 werden ebenfalls im Rahmen der Prüfung der Unterlage [G 216] bewertet.



7. GLOSSAR

Barrierewirkung:	Maß für die Behinderung des Schadstoffflusses aus dem ERAM in den vom Menschen potentiell genutzten Teil der Biosphäre
Barrierenintegrität (global):	<p>Klassifikation des umgebenden Gebirges im Hinblick auf seine Barrierewirkung. Globale Barrierenintegrität liegt vor, wenn ein Schadstofffluss zwischen ERAM und dem vom Menschen potentiell genutzten Teil der Biosphäre nicht möglich ist.</p> <p>Die Klassifikation ist nicht nur von den Eigenschaften des Gebirges, sondern auch von den Eigenschaften des Fluids (insbes. seinem Druck und seinen chemischen Eigenschaften) abhängig.</p>
Barrierenintegrität (lokal):	<p>Klassifikation des Gebirges im Hinblick auf seine Schadstoffdurchlässigkeit. Lokale Barrierenintegrität liegt vor, wenn ein Schadstofffluss durch das Gebirge an dieser Stelle nicht möglich ist.</p> <p>Die Klassifikation ist nicht nur von den Eigenschaften des Gebirges, sondern auch von den Eigenschaften des Fluids (insbes. seinem Druck und seinen chemischen Eigenschaften) abhängig.</p>
Bemessungssituation:	Bedingungen, für die ein Bauwerk ausgelegt („bemessen“) ist.
Gebirgsbarriere:	Gebirgsbereich, der den Stofftransport zwischen der Biosphäre und einem Grubenbau oder einem Bergwerk behindert.
geologische Barriere:	Das das ERAM umgebende Gebirge mit seinen den Schadstofffluss aus dem ERAM in den vom Menschen potentiell genutzten Teil der Biosphäre be- oder verhindernden Eigenschaften.
Grenzzustand:	Es gibt den Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dessen Eintreten ein Bauwerk versagt, und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, bei dem der Gebrauch eines Bauwerks nicht mehr oder nicht mehr vollständig möglich ist.
intakte Gebirgsbarriere:	Gebirgsbereich, der bzgl. eines Grubenbaus oder eines Bergwerks die (globale) Barrierenintegrität gewährleistet.
umgebender Gebirgsbereich:	Ein Teil des umgebenden Gebirges
umgebendes Gebirge:	Der Teil des Gebirges, der das ERAM oder einen Teil des ERAM von der Biosphäre trennt.



8. LITERATUR

- [A 281] BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Plan zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben
(einschließlich der Endlagerung bereits zwischengelagerter radioaktiver Abfälle und
noch anfallender betrieblicher radioaktiver Abfälle)
Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, 15. September 2009
- [BGR 98] BGR
ERA Morsleben, Untertägige Temperaturmessungen im Rahmen der
geowissenschaftlichen Standorterkundung des Endlagers für radioaktive Abfälle in
Morsleben, Archiv-Nr. 116704, Tgb.-Nr. 10506/98, 1998
- [BMU 10] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver
Abfälle
Bonn, 30.09.2010
- [CRI 98] CRISTESCU N. D., HUNSCHE U.
Time Effects in Rock Mechanics
Wiley Series in Materials, Modelling and Computation
John Wiley & Sons, 1998
- [DEPV 09] VERORDNUNG ÜBER DEPONIEEN UND LANGZEITLAGER (DEPONIEVERORDNUNG – DEPV)
(zuletzt geändert am 26.11.2010)
Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 22, Bonn, 29.04.2009
- [DGEG 93] DGEG
Empfehlungen des Arbeitskreises „Salzmechanik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd-
und Grundbau e. V. zur Geotechnik der Untertagedeponierung von besonders über-
wachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken
Ernst & Sohn, Bautechnik 70 (1993), Heft 12
- [DUE 99] DÜSTERLOH U.
Bericht der sachverständigen Prüfung auf dem Gebiet der Gebirgsmechanik im
Auftrag des Bergamtes Staßfurt (Az. 34560/Abbau 1a), Anlagenband, Endlager für
radioaktive Abfälle (ERAM), Gebirgsmechanische Beurteilung zur Standsicherheit
von Abbau 1a im Zentralfeld des ERA Morsleben, Professur für Deponietechnik und
Geomechanik, TU Clausthal, 1999



- [Fis 09] FISCHER D.
Interaktion zwischen Baugrund und Bauwerk – Zulässige Setzungsdifferenzen sowie Beanspruchungen von Bauwerken und Gründungen
Dissertation, Freiberg, 1983
Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 21, Oktober 2009
- [G 216] MÜLLER-HOEPPE, N.
Konzept von Vorsorgemaßnahmen für die Stilllegung
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 67] KÄBEL, H., GERARDI, J., KELLER, S.
Projekt ERA Morsleben. Szenarienanalyse. Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen.
BGR, Hannover, Juli 1999
- [P 212] MÜLLER-HOEPPE, N., KREIENMEYER, M.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis – Kriterien zur Auswahl von Berechnungsschnitten
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 214] KREIENMEYER, M.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Westfeld
DBE, Peine, 31.10.2005
- [P 215] LERCH, C.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Südfeld
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 218] MÜLLER-HOEPPE, N.
Sicherheitsnachweismethoden und Sicherheitsnachweiskriterien für die Maßnahmen der Stilllegung (Stand sicherheit und Integrität)
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 224] KREIENMEYER, M.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Marie
DBE, Peine, 01.03.2006



- [P 234] LERCH, C.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Nordfeld
DBE, Peine, 31.01.2006
- [P 243] KREIENMEYER, M.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Zentralteil Bartensleben
DBE, Peine, 24.02.2006
- [P 245] KREIENMEYER, M.
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Ost- und Südostfeld
DBE, Peine, 15.12.2005
- [SCH 94] SCHNEIDER K.-J.
Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften
Werner Verlag, 11. Auflage, 1994
- [STO 83] STOCKMANN N.
Beitrag zur Untersuchung geomechanischer Probleme bei der Einführung verlustarmer
Abbauverfahren im Südharz-Kalirevier der DDR
Freiberg, 21.03.1983
(Dissertation an der Bergakademie Freiberg)
- [WIT 09] WITT K. J. (HERAUSGEBER)
Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gründungen und geotechnische Bauwerke
(7. Auflage)
Ernst & Sohn, Berlin, 2009