



Stilllegung des ERA Morsleben

5. Zwischenbericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte)

– Bewertung P 212 –

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, 26.09.2011

Anmerkung:

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

- PD Dr.-Ing. habil. U. Düsterloh

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

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



ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Stilllegung des ERAM bestehen verschiedene Nachweiserfordernisse (NW), d. h. es sind verschiedene Sicherheitsnachweise zu erbringen. Die vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) dem Komplex „Standicherheit und Integrität“ zugeordneten Sicherheitsnachweise basieren auf 5 aufeinander aufbauenden Sicherheitselementen (SE):

1. Allgemeine Einschätzung (Befahrung).
2. Baugrunduntersuchungen (Wirtsgesteinsuntersuchungen¹).
3. Berechnungen und geotechnische Analyse².
4. Systematische Beobachtungen bzw. Messungen.
5. Vorsorgekonzept.

Die SE 4 und 5 sind nur für den Nachweis der Arbeitssicherheit während des Stilllegungsbetriebs vorgesehen. Sie kommen dann zur Anwendung, wenn für einen Bereich der Grube durch die ersten drei Sicherheitselemente kein „hinreichendes Maß an Sicherheit“ ausgewiesen werden kann [P 218].

Die Unterlage [P 212] beinhaltet die Auswahl von (2-dimensionalen) Schnitten durch die Grube und das umgebende Gebirge, mit denen die dem SE 3 zugeordneten Berechnungen bzw. Plausibilitätsabschätzungen durchgeführt werden sollen. Weiterhin wird in [P 212] eine „Verbruchtheorie“ (einschließlich „Betrachtungen zur Pfeilerschlankheit“) erläutert, aus der Anforderungen an die Hohlraumverfüllung und damit an das Verfüllkonzept [P 220] abgeleitet werden.

Gegenstand dieses Zwischenberichts ist die Bewertung der Unterlage [P 212].

In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts geben wir die von uns verwendeten Bewertungsmaßstäbe an. Da für die Stilllegung eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Salzgestein keine verbindlichen Vorgaben zum Nachweis der Standicherheit und Integrität bestehen, orientieren wir uns diesbezüglich am Stand von Wissenschaft und Technik, der sich aus der Deponieverordnung und den Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (DGEG) ableiten lässt.

In Kapitel 4 erläutern wir, wie die Unterlage [P 212] in das Nachweiskonzept des BfS einzuordnen ist.

In Kapitel 5 geben wir die Ausführungen zur Verbruchtheorie wieder und bewerten sie. Ein wesentlicher Aspekt in der Nachweisführung des BfS zum Nachweis der Barrierenintegrität des das ERAM umgebenden Gebirges ist die Verwendung von Abstandskriterien (Kriterien für den Abstand von Grubenbauen zum Salzspiegel bzw. zum Nebengestein), bei deren Einhaltung die Integrität der Salzgesteinsbarriere gegeben sei [P 67]. In [P 212] werden die Abstandskriterien gegenüber [P 67] insoweit verschärft, als dass sie für das unverbrochene Gebirge nach einem möglichen Verbruch der Grubenbaue gelten sollen. Die „Verbruchtheorie“ dient zur Abschätzung

¹ Den Baugrunduntersuchungen werden in [G 216] Abschnitt 2.1 die Labor- und In-situ-Untersuchungen [BGR 98a] und [BGR 98b] sowie die geomechanische Betriebsüberwachung zugeordnet.

² „Auf Basis der geotechnischen Analyse, die im ersten Schritt i. d. R. eine Berechnung beinhaltet, wird ein erstes quantitatives Maß zur Bewertung der Sicherheit bestimmt.“ [P 218] Kapitel 2



der Mächtigkeit des möglicherweise verbrechenden Gebirgsbereiches. Da wir die Verwendung von Abstandskriterien als für einen Nachweis der langfristigen Barrierenintegrität nicht geeignet ansehen, ist die Frage nach der Reichweite der Verbruchzone und damit der Belastbarkeit der Verbruchtheorie für die Nachweisführung nicht von Bedeutung. Da die Abstandskriterien in Verbindung mit der Bruchtheorie jedoch ggf. als zusätzliche stützende Argumente für die Barrierenintegrität verwendet werden können, weisen wir auf Schwächen in der Begründung der Bruchtheorie hin.

In Kapitel 6 geben wir die Ausführungen zur Pfeilerschlankheit wieder und bewerten sie. Diese Ausführungen dienen zur Begründung der im Verfüllplan [P 220] geforderten Einbettung von Pfeilern (Einbettung der Pfeiler auf mindestens 2/3 ihrer Höhe und resultierendes Verhältnis von freier Höhe zur Breite von $< 1/2$). Wir kommen zu dem Ergebnis, dass die Ausführungen zur Pfeilerschlankheit offensichtlich nicht Teil der Nachweisführung des BfS zur Erbringung der Nachweiserfordernisse zur Standsicherheit und Integrität sind, so dass eine Prüfung dieser Ausführungen für die Bewertung der Nachweisführung des BfS nicht erforderlich ist. Da vom BfS jedoch der Verfüllplan [P 220] u. A. mit den Ausführungen zur Pfeilerschlankheit begründet wird, weisen wir auf Schwächen in den Ausführungen hin.

In Kapitel 7 geben wir die Ausführungen zur Auswahl der Berechnungsschnitte wieder, identifizieren die hierbei implizit getroffenen Annahmen und bewerten die der Schnittauswahl zugrunde liegenden Kriterien. Von einer Bewertung der ausgewählten Berechnungsschnitte sehen wir ab, da diese zweckmäßigerweise erst nach einer Klärung der noch offenen Punkte erfolgt, die in [BS 11a], [BS 11b] und in diesem Gutachten festgestellt wurden, und zu denen wir Forderungen abgeleitet haben.

Im Ergebnis der Prüfungen leiten wir 8 Forderungen (F) bzw. Hinweise (H) ab, bzgl. deren Begründung wir auf Kapitel 7 verweisen:

- F1: Vom BfS sollte dargelegt und begründet werden, weshalb die Nachweise zu den bestehenden Nachweiserfordernissen anhand von (2-dimensionalen) Schnitten geführt werden können.
- H 2: Bei der Führung der Einzelnachweise sollte im Ergebnis der numerischen Berechnungen bzw. Plausibilitätsbetrachtungen nachgewiesen werden, dass die Beschränkung auf 2-dimensionale Schnitte zulässig ist. Hierzu kann beispielsweise dargelegt werden, dass sich ein durch die Reduzierung auf 2 Dimensionen überschätzter Effekt ungünstig hinsichtlich eines Kriteriums auswirkt, oder dass die berechneten Größen so weit unterhalb der zulässigen Kriterien liegen, dass die Reduzierung auf 2 Dimensionen im Hinblick auf die Erfüllung des NW irrelevant ist.
- F 3: Vom BfS sollten die Kriterien für die Auswahl der Sonderschnitte unter Beachtung der in Abschnitt 4.2.3 gemachten Anmerkungen begründet werden.
- F 4: Vom BfS sollte die Vorgehensweise bei der Auswahl der Sonderschnitte dargelegt und die Vollständigkeit der Sonderschnitte unter Berücksichtigung aller Nachweiserfordernisse begründet werden.
- H 5: Bei der Führung der Einzelnachweise sollte im Ergebnis der numerischen Berechnungen nachgewiesen werden, dass die Auswahl der Sonder- und Berechnungsschnitte vollständig bzw. abdeckend im Sinne der zu führenden Nachweise durchgeführt wurde.



- F 6: Die Kriterien für die Auswahl der Berechnungsschnitte sollten begründet werden. Dies schließt insbesondere eine Begründung ein, weshalb hierbei lediglich die Nachweiserfordernisse (3) (Barrierenintegrität) und (7) (Arbeitsschutz) explizit berücksichtigt werden.
- F 7: Die Inkonsistenzen zwischen den Unterlagen [P 218], [G 216] und [P 212] im Hinblick auf die Methodik der Nachweisführung zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit sollten beseitigt werden und es sollte ein widerspruchsfreies Nachweiskonzept vorgelegt werden.
- H 8: Bei der Führung der Einzelnachweise sollte dargelegt werden,
- ob und wenn ja wie die in den Berechnungsschnitten nicht definierten Bereiche bei der Nachweisführung berücksichtigt werden und
 - wie dies begründet ist.

Kapitel 8 enthält das Literaturverzeichnis.



INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG	1
2. BERICHTSAUFBAU.....	3
3. BEWERTUNGSMABSTÄBE	4
4. EINORDNUNG DER UNTERLAGE IN DIE SICHERHEITSNACHWEISE DES BFS	5
5. VERBRUCHTHEORIE	8
5.1. Angaben in [P 212].....	8
5.2. Bewertung.....	9
6. PFEILERSCHLANKHEIT	11
6.1. Angaben in [P 212].....	11
6.2. Bewertung.....	11
7. AUSWAHL DER SCHNITTE.....	14
7.1. Angaben in [P 212].....	14
7.2. Bewertung.....	18
7.2.1. Verwendung 2-dimensionaler Schnitte.....	18
7.2.2. Identifizierung der Feldesteile, für die Schnitte zu erstellen sind	21
7.2.3. Kriterien für die Sonderschnitte	21
7.2.4. Festlegung der Sonderschnitte	22
7.2.5. Kriterien für die Auswahl der Berechnungsschnitte.....	24
7.2.6. Auswahl der Berechnungsschnitte	25
8. LITERATUR.....	26



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.

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 5. Zwischenbericht beinhaltet die Bewertung der Prüfunterlage [P 212] im Rahmen der Arbeiten zu AP 3.

Im 3. Zwischenbericht erfolgte die Bewertung der Unterlage [P 218], in der

- die aus Sicht des BfS erforderlichen Sicherheitsnachweise („Nachweiserfordernisse“) im Hinblick auf Standsicherheit und Integrität aufgeführt,
- die Methoden bei der Führung dieser Sicherheitsnachweise beschrieben und



- Sicherheitsnachweiskriterien³ zusammengestellt

werden. Entsprechend der in [P 218] beschriebenen Methode sollen die erforderlichen Nachweise „unter Einbeziehung“ von fünf Sicherheitselementen erfolgen. Die fünf Sicherheitselemente (SE) sind

1. allgemeine Einschätzung (Befahrung),
2. Baugrunduntersuchungen (Wirtsgesteinuntersuchungen),
3. Berechnungen (hierunter werden nach [P 218] S. 13 auch Plausibilitätsbetrachtungen verstanden) und geotechnische Analyse,
4. systematische Beobachtungen bzw. Messungen sowie
5. Vorsorgekonzept.

Wird für einen Bereich der Grube durch die ersten drei Sicherheitselemente ein „hinreichendes Maß an Sicherheit“ ausgewiesen, gilt das Nachweiserfordernis dort als erfüllt. Weisen die Berechnungen und Analysen jedoch kein ausreichendes Sicherheitsniveau aus, soll die Sicherheit durch die Durchführung systematischer Beobachtungen und Messungen (SE 4) und die Durchführung von Vorsorgemaßnahmen, die in einem Vorsorgekonzept beschrieben und festgelegt sind (SE 5), gewährleistet werden.⁴

Gegenstand der Unterlage [P 212] ist die Auswahl von (2-dimensionalen) Schnitten durch die Grube und das umgebende Gebirge, für die die unter 3. aufgeführten Berechnungen bzw. Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt werden sollen.

Im Ergebnis der Prüfung dieser Unterlage formulieren wir Forderungen (F) und Hinweise (H):

- Forderungen betreffen Kritikpunkte, die nach unserer Einschätzung einer Überarbeitung bzw. Ergänzung der vorliegenden Verfahrensunterlagen durch das BfS bedürfen. Wir empfehlen der Genehmigungsbehörde, diese Forderungen dem BfS gegenüber zu erheben.
- Hinweise richten sich in diesem Gutachten an das BfS und an das MLU. Sie betreffen Forderungen, die im Rahmen der Einzelnachweise zu erfüllen sind. Da wir die Einzelnachweise gegenwärtig noch nicht geprüft haben, können wir nicht angeben, ob dort diese Forderungen erfüllt werden oder nicht bzw. ob bei den Einzelnachweisen ein diesbezüglicher Ergänzungsbedarf besteht oder nicht. Aus diesem Grund haben wir sie als Hinweise gekennzeichnet.

³ 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).

⁴ In [P 218] bleibt unklar, ob die Sicherheitselemente 4 (Systematische Beobachtungen bzw. Messungen) und 5 (Vorsorgekonzept) bei allen in [P 218] aufgeführten Nachweiserfordernissen zur Anwendung kommen sollen oder nur bei den Nachweiserfordernissen zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit. Für die Prüfungen in diesem Zwischenbericht ist diese Unklarheit jedoch nicht von Belang.



2. BERICHTSAUFBAU

In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts geben wir die von uns verwendeten Bewertungsmaßstäbe an. Da für die Stilllegung eines Endlagers für radioaktive Abfälle im Salzgestein keine verbindlichen Vorgaben zum Nachweis der Standsicherheit und Barrierenintegrität bestehen, orientieren wir uns diesbezüglich am Stand von Wissenschaft und Technik, der sich aus der Deponieverordnung und den Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V. (DGEG) ableiten lässt.

In Kapitel 4 wird angegeben, wie die Unterlage [P 212] in die geotechnische Nachweisführung⁵ des BfS eingeordnet ist.

In [P 212] Kapitel 2 wird eine „Verbruchtheorie“ (einschließlich „Betrachtungen zur Pfeilerschlankheit“) erläutert, aus der Anforderungen an die Hohlraumverfüllung und damit an das Verfüllkonzept [P 220] abgeleitet werden. In den Kapiteln 5 und 6 dieses Berichts werden die Angaben in [P 212] zur Verbruchtheorie und zur Pfeilerschlankheit wiedergegeben und bewertet.

In [P 212] Kapitel 3 erfolgt eine Auswahl von Berechnungsschnitten für die Nachweisführungen zu den vom BfS dem Komplex „Standsicherheit und Integrität“ zugeordneten Nachweiserfordernissen. In Kapitel 7 dieses Berichts werden diese Angaben wiedergegeben, die hierbei implizit getroffenen Annahmen identifiziert und die der Schnittausswahl zugrunde liegenden Kriterien bewertet.

Kapitel 8 enthält das Literaturverzeichnis.

⁵ Unter geotechnischer Nachweisführung verstehen wir die Führung der für die Planfeststellung der Stilllegung des ERAM erforderlichen Nachweise mit geotechnischem Hintergrund.



3. BEWERTUNGSMAßSTÄBE

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

Der in [P 218] beschriebene Nachweis der Standsicherheit und Integrität entspricht aufgrund des gleichen Wirtsgesteins (Salz) und der gleichartigen Schutzziele (Schutz der Biosphäre vor dem Eintrag schädlicher Stoffe; Schutz von Mensch, Umwelt und Sachgütern im Hinblick auf Senkungen; Schutz der Beschäftigten) dem geotechnischen Standsicherheitsnachweis für Untertage-deponien im Salzgestein. Deshalb kann die dort angewendete Vorgehensweise zur Ermittlung des Stands von Wissenschaft und Technik herangezogen werden. In Anhang 2 der Deponieverordnung [DepV 09] sind die Anforderungen an den geotechnischen Standsicherheitsnachweis für Untertage-deponien im Salzgestein zusammengestellt. Weitere Angaben zur Durchführung eines geotechnischen Sicherheitsnachweises enthalten die Empfehlungen des Arbeitskreises Salzmechanik der DGEG – Ablagerungen in Bergwerken – (hier insbesondere Kapitel 4) [DGEG 93].

In diesen Unterlagen wird u. A. gefordert, dass die Bewertung der Standsicherheit und der Barrierenintegrität auf der Basis einer rechnerischen gebirgsmechanischen Modellierung erfolgen soll. Die in diesen Unterlagen enthaltenen Anforderungen an die Führung des geotechnischen Standsicherheitsnachweises sind der Maßstab bei der Bewertung der Verbruchtheorie (einschließlich den Ausführungen zur Pfeilerschlankheit) und der Auswahl der Berechnungsschnitte.



4. EINORDNUNG DER UNTERLAGE IN DIE SICHERHEITSNACHWEISE DES BFS

Nach [P 218] (Seite 11 f.) sind im Hinblick auf die Standsicherheit und Integrität des ERAM die in Tabelle 4-1 aufgeführten Nachweiserfordernisse (NW) zu erbringen.

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

	Sicherheit der Bauzustände	stabile Endzustände²⁾
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 Arbeitssicherheit ⁴⁾	(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) zugelaufenes Endlager

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

⁴⁾ In [P 218] wird das NW als „Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen“ bezeichnet. In [BS 11a] kamen wir jedoch zu dem Ergebnis, dass das in [P 218] eigentlich gemeinte NW hierüber hinausgeht: Aufgrund der Ausführungen in [P 218] Abschnitt 3.4.3 gehen wir davon aus, dass das NW (7) tatsächlich den Nachweis der Arbeitssicherheit im Hinblick auf die Standsicherheit umfassen soll. Die Zustandsverbesserung des Salzes in den Konturbereichen der Grubenräume und in den Tragelementen (Schweben und Pfeiler) ist nur ein Kriterium unter mehreren, aus denen das BFS die Arbeitssicherheit im Hinblick auf die Standsicherheit ableitet.



Der Nachweis der Sicherheit der Bauzustände beinhaltet nach [G 216] und [P 218] die 5 „Sicherheitselemente“ (SE)

1. allgemeine Einschätzung (Befahrung),
2. Baugrunduntersuchungen (Wirtsgesteinsuntersuchungen⁶),
3. Berechnungen und geotechnische Analyse,
4. systematische Beobachtungen bzw. Messungen und
5. Vorsorgekonzept.

Nach [P 218] (S. 13) werden bei SE 3 unter „Berechnungen“ auch Plausibilitätsbetrachtungen verstanden⁷. Aus [P 218] Abschnitt 3.5 geht hervor, dass die SE 4 und 5 nur bei NW (7) zur Anwendung kommen sollen.

Ein wesentlicher Gegenstand der Unterlage [P 212] (Kapitel 3) ist die Auswahl von (2-dimensionalen) Schnitten durch die Grube und das umgebende Gebirge, mit denen die Nachweise für die Standsicherheit und Integrität des ERAM erbracht werden sollen. Es wird festgelegt, für welche Schnitte im Rahmen des SE 3 numerische Berechnungen durchgeführt werden sollen.

Zusätzlich enthält [P 212] (Kapitel 2) Plausibilitätsbetrachtungen, die als „Verbruchtheorie“ und „Betrachtungen zur Pfeilerschlankheit“ bezeichnet werden. Es wird angegeben, dass aus diesen Plausibilitätsbetrachtungen die im Verfüllplan [P 220] angegebenen Verfüllgrade für die verschiedenen Abbaue abgeleitet wurden.

Nach unserem Verständnis dienen die Ausführungen zur Verbruchtheorie dem folgenden Zweck: Ein wesentlicher Bestandteil der Nachweisführung des BfS zur Barrierenintegrität der verschiedenen Grubenfelder ist die Differenzierung von Grubenbauen in „zutrittsgefährdete“ und „nicht zutrittsgefährdete“. Nach Auffassung des BfS bedarf es nur bei den zutrittsgefährdeten Grubenbauen eines rechnerischen Nachweises (des Bestehens und des künftigen Erhalts) der Barrierenintegrität. Bei den nicht zutrittsgefährdeten Grubenbauen sei die gegenwärtige und künftige Barrierenintegrität per Definition gegeben. Grubenbaue werden als „nicht zutrittsgefährdet“ eingestuft, wenn sie die in [P 67] formulierten Abstandskriterien einhalten. Da in [P 67] der Verbruch von Grubenbauen nicht explizit angesprochen wurde, soll nach unserem Verständnis in [P 212] abgeleitet und begründet werden, wie die Einstufung von Grubenbauen als „nicht zutrittsgefährdet“ auch bei Berücksichtigung von Verbruch erfolgt.

In den Ausführungen zur Pfeilerschlankheit wird abgeleitet und begründet, dass bei einem gewissen Verfüllgrad in benachbarten Grubenbauen eine Resttragfähigkeit des zwischen ihnen liegenden Pfeilers erreicht werden kann, die „dem Fortschreiten dilatanter Zonen entgegenwirkt“. Dies wäre bei der Aufstellung des Verfüllplans [P 220] berücksichtigt worden. In [P 220] (S. 35) wird

⁶ Den Baugrunduntersuchungen werden in [G 216] Abschnitt 2.1 die Labor- und In-situ-Untersuchungen [BGR 98a] und [BGR 98b] sowie die geomechanische Betriebsüberwachung zugeordnet.

⁷ In [P 218] (S. 13) ist die Zulässigkeit von Plausibilitätsbetrachtungen an der Stelle von Berechnungen auf den Zeitraum der „Bauzustände“ beschränkt. Aus den Ausführungen in den Einzelnachweisen und im Rahmen von Fachgesprächen geht jedoch hervor, dass das BfS Plausibilitätsbetrachtungen anstelle von Berechnungen auch für den Zeitraum der „stabilen Endzustände“ für zulässig ansieht.



Brenk Systemplanung

Ingenieurgesellschaft für wissenschaftlich
technischen Umweltschutz

angegeben, dass durch diese Verfüllung der Verlust der Standsicherheit infolge geringer Pfeilerstärken vermieden werden kann. In den uns vorliegenden Unterlagen des BfS wird nicht angegeben, ob und wenn ja an welcher Stelle die Ausführungen zur Pfeilerschlankheit in die Nachweisführung zur Erfüllung der Nachweiserfordernisse einfließt.



5. VERBRUCHTHEORIE

5.1. Angaben in [P 212]

Nach [P 212] kann es bei einer Überschreitung der Dilatanzgrenze und insbesondere der Kurzzeitbruchfestigkeit zu Bruchvorgängen in dem die Grubenbaue umgebenden Gebirge kommen. Aufgrund der Bildung mikroskopischer und makroskopischer Hohlräume weist das Bruchmaterial ein größeres Volumen als das ursprüngliche Gestein auf. Das Volumen des Grubenbaus vergrößert sich um das herausgebrochene Gebirgsvolumen, allerdings füllt sich ein Teil des Grubenbaus mit dem Bruchmaterial („Selbstversatz“). Unterstellt man ein stetiges Fortschreiten der Bruchvorgänge, dann wird schließlich ein Zustand erreicht, in dem der Grubenbau ein maximales Volumen aufweist und vollständig mit Bruchmaterial verfüllt ist. Der Bruch hat sich „totgelaufen“.

Als Kriterium für nicht zutrittsgefährdete Grubenbaue wird in [P 212] auf Seite 12 angegeben:

„Verbleibt nach Totlaufen des Bruches eine geologische Barriere, die die erforderlichen Abmessungen nach /9/ aufweist, d. h. deren Dicke bis zum Salzspiegel noch 60 m bzw. 130 m (wenn der betrachtete Abbau weniger als 25 m vom Anhydrit oder Kalilager entfernt liegt und eine Verbindung des Anhydrits und/oder des Kalilagers zum Deckgebirge besteht) beträgt, so ist die Integrität der geologischen Barriere trotz lokaler Bruchvorgänge weiterhin gegeben.“⁸

Zur Ermittlung der maximalen Reichweite des Bruchs wird unterstellt,

- dass sich der Bruch senkrecht nach oben fortpflanzt (dass sich der Bruch also nicht trichterförmig ausbildet) und
- dass das Bruchmaterial im Abbau eine Porosität von 23 % (entsprechend einer Porenzahl von 0,3 bzw. einem Auflockerungsfaktor von 1,3) aufweist.⁹

Die Porenzahl von 0,3 wird damit begründet,

- dass sie in [SPA 57] und [MOH 63] für Bruchmaterial genannt wird,
- dass sie unter der Porenzahl von im ERAM eingebrachtem Salzgruß (0,455 – 0,529) liegt und
- dass Bruchmaterial mit dieser Porenzahl einen ausreichend hohen Stützdruck aufweist, so dass weitere schnell ablaufende Bruchvorgänge vermieden werden.

Das o. g. Kriterium für nicht zutrittsgefährdete Grubenbaue wird in [P 212] wie folgt begründet: Wenn der Bruch totgelaufen ist, ist der betroffene Grubenbau vollständig mit Bruchmaterial gefüllt und es kommt zu keinen weiteren Verbrüchen. Weitere dilatante Verformungen können dagegen nicht ausgeschlossen werden, da die Stützwirkung des Bruchmaterials stark von der Kompaktionsgeschwindigkeit abhängt und bei konvergenten Bewegungen nur gering ist. Da das Bruchmaterial jedoch auch bei langsamen Bewegungen eine gewisse stützende Wirkung aufweist, sind die geomechanischen Verhältnisse im Bereich des mit Bruchmaterial gefüllten Grubenbaus

⁸ Die Literaturstelle /9/ ist die Unterlage [P 67].

⁹ Als maximale Reichweite eines Verbrauchs ergibt sich damit das 3,33-fache der Höhe des unverfüllten Grubenbaus.



hinsichtlich der Barrierenintegrität günstiger als bei einem offenen Hohlraum gleichen Volumens. Wenn die Abstandskriterien aus [P 67] für die Einhaltung der Barrierenintegrität um einen offenen Grubenbau ausreichend sind, dann gilt dies erst recht für einen vollständig mit Bruchmaterial ausgefüllten Grubenbau.

5.2. Bewertung

Die o. g. Abstandskriterien beruhen auf empirischen Erfahrungen und können deshalb nur für Aussagen auf einer Zeitskala von einigen Jahrzehnten verwendet werden. Über langfristige Beeinträchtigungen der Barrierenintegrität durch dilatante Verformungen oder anstehende Fluiddrücke können sie keine Aussagen treffen. Es ist nicht belegt und vermutlich auch nicht belegbar, dass kein Fall existiert, indem ungeachtet der Einhaltung der Abstandskriterien ein Barriereversagen eingetreten ist. Auch wenn der vorstehend skizzierte Beleg erbracht werden sollte oder könnte ist nicht auszuschließen, dass in der Zukunft ein entsprechendes Ereignis, d. h. ein Barriereversagen trotz Einhaltung der Abstandskriterien beobachtet wird. Der vorliegende bzw. beobachtete Erfahrungsumfang besitzt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da im Grundsatz die Summe der Erfahrungen mit der Beobachtungszeit und der Anzahl der Projekte zunimmt. Des Weiteren bleibt festzustellen, dass Abstandskriterien keine naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeit definieren. Im Unterschied zu Zustandsgrößen wie beispielsweise Verformungen, Verzerrungen, Spannungen und Temperaturen etc., die als Parameter von Stoffgleichungen bzw. Stoffmodellen das Trag- und Dichtigkeitsverhalten einer Struktur in Raum und Zeit auf der Grundlage physikalischer Gesetzmäßigkeiten abbilden, sind Abstandskriterien nicht Bestandteil der Gleichungssysteme zur quantitativen Abbildung der physikalischen Prozesse. Abstandskriterien sind damit weder im Rahmen der rechnerischen Analyse des vergangenen noch im Rahmen der Prognose des zukünftigen Tragverhaltens Bestandteil der Grenzzustandsgleichungen zur Abgrenzung von zulässigen bzw. unzulässigen Beanspruchungen des Tragsystems. Wir erneuern deshalb die schon in [AG 08] (dort S. 76 ff.) getroffenen Einschätzungen und kommen zu folgender Bewertung:

- Eine dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende Nachweisführung zur Standsicherheit und Barrierenintegrität erfolgt auf rechnerischer Grundlage (vgl. Kapitel 3).¹⁰
- Stand von Wissenschaft und Technik im Bereich der rechnerischen Nachweisführung ist der Einsatz numerischer Berechnungsverfahren. Dies gilt insbesondere bei so komplexen geologischen und bergbaulichen Verhältnissen wie beim ERAM. Bezüglich der hierbei anzusetzenden Kriterien für die Bewertung der Barrierenintegrität (Dilatanzkriterium, Fluidkriterium, Kriterium für die Mächtigkeit des ungestörten Gebirges) verweisen wir auf [BS 11a] (dort Abschnitt 6.3.2).
- Die Abstandskriterien eignen sich nicht als Nachweis der langfristigen Standsicherheit und Barrierenintegrität. Als zusätzliche stützende Argumente können sie jedoch hinzugezogen werden.

¹⁰ Dies bedeutet nicht, dass für jeden Grubenbereich zwingend eine eigenständige Modellierung durchgeführt werden muss. Es können auch die Ergebnisse der Modellierung anderer Grubenbereiche übertragen werden, sofern der Nachweis geführt wird, dass diese Ergebnisse für den hier betrachteten Grubenbereich abdeckend sind.



Da wir die Abstandskriterien als für einen Nachweis nicht geeignet ansehen, ist die Frage nach der Reichweite der Verbruchzone und damit der Belastbarkeit der vom BfS hier unterstellten Verbruchform¹¹ (Silobruch) und Porenzahl von 0,3 für die Nachweisführung nicht von Bedeutung. Grundsätzlich sind die Abschätzungen zur maximalen Reichweite der Verbruchzone plausibel und entsprechen dem Vorgehen bei der Abschätzung zur Gefahr von Tagesbrüchen durch bergbauliche Altlasten.

Wir weisen jedoch darauf hin, dass wir [SPA 57] und [MOH 63] keine Angaben zur Porenzahl von Bruchmaterial entnehmen können. In [SPA 57] wird auf S. 309 als typischer Wert für den Schüttungskoeffizient von Versatz im Kalibergbau ein Wert von 1,3 angegeben. Auf S. 327 werden für Spülversatz eine Porosität von 10 % und für (trocken eingebrachten) Handversatz 30 bis 40 % angegeben. In [MOH 63] finden wir keine Angaben zur Porosität von Bruchhaufwerk oder Versatz. **Wir weisen deshalb auf die Notwendigkeit präziser Literaturverweise hin.** Dies betrifft sowohl die eindeutige Benennung des Sachverhalts, der durch den Literaturverweis belegt werden soll, als auch bei umfangreichen Quellen (wie z. B. [SPA 57] mit 598 Seiten und [MOH 63] mit 392 Seiten) die Angabe, wo in der Unterlage sich der Beleg für den behaupteten Zusammenhang oder Zahlenwert befindet. Im Übrigen stellen diese Unterlagen aufgrund ihres Alters nicht den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar.

¹¹ In der Literatur finden sich auch ungünstigere Ansätze (elipsenförmiger Hochbruch, siehe z. B. [MEI 07]).



6. PFEILERSCHLANKHEIT

6.1. Angaben in [P 212]

In [P 212] wird in Abschnitt 2.5 unter Verweis auf [GIM 68] angegeben, dass ein Pfeiler (zwischen zwei Grubenbauen) auch nach einem Bruch noch ca. 50 % seiner Tragfähigkeit besitzt, sofern er ein Verhältnis von freier Höhe H zu Breite B von $< 1:2$ aufweist.

Weiterhin wird unter Verweis auf [GIM 68], [SUL 88] sowie eine uns nicht vorliegende Literaturstelle¹² angegeben, dass sich bei einer Einbindung eines Pfeilers in ein stützendes Medium mindestens auf $2/3$ seiner Höhe der „Versagensmodus“ ändert, was in einer erhöhten Lastaufnahmefähigkeit des Pfeilers resultiert. Dieses Maß wurde bei der Verfüllplanung berücksichtigt.

6.2. Bewertung

In Kapitel 4 wiesen wir darauf hin, dass die Ausführungen zur Pfeilerschlankheit offensichtlich nicht Teil der Nachweisführung des BfS zur Erbringung der Nachweiserfordernisse sind. Damit ist eine Bewertung dieser Ausführungen für eine Bewertung der Nachweise des BfS zur Standsicherheit und Integrität nicht erforderlich. Da vom BfS jedoch der Verfüllplan [P 220] u. A. mit den Ausführungen zur Pfeilerschlankheit begründet wird, weisen wir auf Schwächen in den Ausführungen hin.

Wir vermuten, dass das BfS durch die Ausführungen zur Pfeilerstabilität begründen will, dass es nach der Umsetzung des Verfüllplans nicht zu einem Verbruch von Pfeilern kommen kann. Sofern dies beabsichtigt ist, möchten wir auf die folgenden Sachverhalte hinweisen:

- Die (aus [GIM 68] S. 171 entnommene) Abbildung 2.5-3 in [P 212] Abschnitt 2.5 zeigt Ergebnisse, die an quaderförmigen Versuchskörpern mit einer Grundfläche von 10 cm x 10 cm durchgeführt wurden. In wieweit die Ergebnisse quantitativ auf Pfeiler im ERAM übertragen werden können, bleibt offen. Vorstehende Aussage gilt umso mehr, als die Modellversuche phänomenologisch das Tragverhalten großräumiger Kammer-Pfeiler-Abbausysteme der flachen Lagerung charakterisieren. Die im ERAM anstehende Abbaukonfiguration ist hiermit nicht vergleichbar.
- Selbst wenn diese Ergebnisse aus [GIM 68] auf das ERAM übertragen werden könnten, so ließe sich nach unserem Verständnis hieraus lediglich ein erforderliches Höhe-Breite-Verhältnis für die Pfeiler nicht vollständig verfüllter Grubenbaue ableiten, nicht aber ein (von der Pfeilmächtigkeit unabhängiger) Verfüllgrad von $2/3$.
- Abbildung 2.5-2 in [P 212] wurde [GIM 68] (dort S. 229) entnommen. Die dort beschriebenen Druckversuche wurden im Rahmen einer Dissertation von 1965 [MIC 66] durchgeführt. Die in der Dissertation verwendeten zylinderförmigen Steinsalzprobekörper wiesen

¹² Minkley W.: „Untersuchungen (Stoffgesetz-Entwicklung, Modellierung) zum Sprödbbruchverhalten von Carnallit und seine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von UTD“ in: Untertägige Entsorgung, Viertes Statusgespräch auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen am 14. und 15. September 1999 im CUTEC-Institut in Clausthal-Zellerfeld, Hrsg. FZK, Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 6, Dezember 1999



eine Länge von 10 cm und einen Durchmesser von 7 cm auf. Die Versuche ergaben, dass bei Einbettung der Versuchskörper in einen Heißlöserückstand ihre Druckfestigkeit zunahm. Bei einem Einbettungsgrad von $2/3$ (entsprechend einer freien Versuchskörperhöhe von 3,3 cm) erhöhte sich die Druckfestigkeit der Prüfkörper um den Faktor 2,6 und entsprach der Druckfestigkeit nicht eingebetteter Versuchskörper der Höhe 3,3 cm. Weshalb in [P 212] angegeben wird, dass diese Versuche einen „veränderten Versagensmodus“ anzeigen, ist unklar. In [GIM 68] ist diese Folgerung jedenfalls nicht enthalten. Es wird nicht erläutert, um welche Versagensmodi es sich hierbei handelt bzw. wie sie sich voneinander unterscheiden und welchen Vorteil der veränderte Versagensmodus aufweist. Weiterhin bleibt unklar, weshalb aus [GIM 68] oder dem behaupteten Eintreten eines veränderten Versagensmodus ein erforderlicher (Mindest-)Verfüllgrad von $2/3$ für die Grubenbaue des ERAM abgeleitet werden kann, unabhängig vom Höhe-Breite-Verhältnis der Pfeiler.

- Da uns die Arbeit [SUL 88] (ein Preprint) nicht zugänglich ist, legen wir der Bewertung die Arbeit [SUL 90] derselben Autoren zugrunde, die den gleichen Titel aufweist. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Versagensmodell werden für Sandsteinproben Berechnungen durchgeführt und mit Laborexperimenten verglichen. Die Berechnungen ergeben,
 - dass die Druckfestigkeit eines zylindrischen Körpers unterhalb eines Höhe/Durchmesser-Verhältnisses H/D von etwa 2 mit abnehmender Schlankheit zunimmt, darüber aber nahezu unabhängig vom Verhältnis H/D ist und
 - dass größere Probenkörper (bei gleichem H/D -Verhältnis) weniger stabil sind als kleinere.

Was das BfS aus diesem Sachverhalt ableitet und zu welchem Zweck in [P 212] auf [SUL 88] verwiesen wird, bleibt unklar.

- Die zitierten Unterlagen stellen aufgrund ihres Alters nicht mehr den Stand von Wissenschaft und Technik dar. Stand von Wissenschaft und Technik für die Bewertung der Standsicherheit von Pfeilern ist ihre Modellierung mittels numerischer Berechnungsverfahren.

Vorstehende Einschätzung gilt umso mehr, als die Ableitung des Pfeilertragvermögens auf Grundlage der dokumentierten Modellversuche Teil eines auf den Abbauzuschnitt flach gelagerter Kammer-Pfeiler-Abbausysteme zugeschnittenen und insgesamt empirisch geprägten Nachweiskonzeptes ist. Dabei zu berücksichtigen ist, dass die Pfeilertragfähigkeit innerhalb dieses Nachweiskonzeptes durch sehr vielfältige Faktoren bestimmt wird. Dies können insbesondere sein

- die Gesteins- und Gebirgsfestigkeit,
- die Schlankheit der Pfeiler bzw. das Verhältnis von Pfeilerhöhe zu Pfeilerbreite,
- Trennflächen in unterschiedlicher Ausbildung, Raumlage und Intensität,
- die geometrische Form der Pfeiler (quadratisch, rechteckig, unregelmäßig, etc.),
- die Anordnung von Nischen, Querhieben und Wetterlöchern zwischen und innerhalb der Pfeiler,



- die Beanspruchungsart (einaxial, mehraxial, Spannungsgeometrie),
- die Einspannungsverhältnisse im Hangenden und Liegenden (Gesteinsverbund, ausgeprägte Schichtflächen),
- die Dauer der Lasteinwirkung,
- die Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, Erschütterungen),
- technische Stützmittel (Versatz, Anker) und
- die Homogenität des Pfeilermaterials.

Obige Aufstellung zeigt, dass die Ableitung der standortspezifischen Pfeilertragfähigkeit über die Erfassung der Vielzahl von Einzelfaktoren hinaus auch Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen zu berücksichtigen hat.

Als Kriterium für den Entwurf des Verfüllplans kann die Festlegung eines Verfüllgrads von 2/3 evtl. geeignet sein, wobei dies aus den in [P 212] angegebenen Begründungen nicht erkennbar ist. Der Nachweis der Standsicherheit und Integrität des so verwahrten Grubengebäudes ist aber nach dem Stand von Wissenschaft und Technik durch Modellierung mittels numerischer Berechnungsverfahren zu erbringen (vgl. Kapitel 3).



7. AUSWAHL DER SCHNITTE

7.1. Angaben in [P 212]

Gegenstand des Kapitels 3 in [P 212] ist die Auswahl von Schnitten durch das Grubengebäude, für die numerische Berechnungen zum Nachweis von Standsicherheit und Integrität durchzuführen sind („Berechnungsschnitte“). Diese Auswahl erfolgte in 5 Schritten.

Im **ersten Schritt** wurden Feldesteile identifiziert, für die Schnitte erstellt werden sollen. Feldesteile wurden dann ausgewählt, wenn sie einen Einlagerungsbereich enthalten oder wenn sie in der Nomenklatur des BfS „zutrittsgefährdet“ sind. Im Ergebnis wurden alle Feldesteile (SF, OF und WF als Einlagerungsbereiche und ZT, NF, SOF und die Grube Marie als „zutrittsgefährdete Feldesteile) ausgewählt.

Im **zweiten Schritt** wurden Schnittführungen festgelegt, für die sogenannte „Sonderschnitte“ angefertigt wurden (Anlagen 1 bis 17 in [P 212]). Die Auswahl dieser Schnittführungen erfolgte nach den folgenden Kriterien:

1. Der Schnitt liegt schon (bei Behörden) vor.
2. In Feldesteilen mit Einlagerungsbereichen soll der Schnitt so gewählt werden, dass in der Schnittebene vorrangig ein hoher Durchbauungsgrad und nachrangig Einlagerungsgrubenbaue vorliegen.
3. In zutrittsgefährdeten Feldesteilen soll der Schnitt so gewählt werden, dass in der Schnittebene ein hoher Durchbauungsgrad und zutrittsgefährdete Abbaue vorliegen.
4. Grubenbereiche mit einem schon vorhandenen Zutritt sind mit einem Schnitt zu berücksichtigen. (Dies betrifft nach [P 212] die Zutritte in Lager H und im Abbau 1a im ZT.)
5. Bereiche, in denen nach Verfüllplan mit einem signifikanten Eintrag von Hydratationswärme zu rechnen ist, sind mit einem Schnitt zu berücksichtigen.
6. Der Schnitt ist aus Gründen der Modellbildung zusätzlich erforderlich.

Zusätzlich wird gefordert, dass durch die Schnitte *„die repräsentative Erfassung*

- *des Tragverhaltens in Bezug auf die Haupttragrichtungen*
- *des Verformungsverhaltens in Bezug auf die Maximalwerte*
- *des Wärmeeintrags in Bezug auf Maximalwerte und daraus resultierende Zwangsspannungen ermöglicht werden.“*

Mittels dieser Kriterien wurden 17 Schnittführungen ausgewählt, für die Sonderschnitte angefertigt wurden (s. Tabelle 7-1).

Im **dritten Schritt** wurden Kriterien aufgestellt, nach denen festgelegt werden soll, zu welchen der 17 Sonderschnitte numerische Berechnungen durchgeführt werden sollen.

Eine numerische Berechnung wird als nicht erforderlich angesehen, wenn die beiden folgenden Bedingungen (1) und (2) erfüllt sind:



(1) Bedingung „Schutzziel Barrierenintegrität“

- Die Integrität der Barriere ist bereits verletzt oder
- der Hydratationswärmeeintrag ist vernachlässigbar (weil der zu verfüllende Grubenbau klein oder weit von der Barriere entfernt ist).

(2) Bedingung „Schutzziel Arbeitsschutz“

- Die Verfüllung der Abbaue in dem betreffenden Schnitt erfolgt von unten nach oben.

Eine numerische Berechnung wird als auf jeden Fall erforderlich angesehen, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind¹³:

(1) Bedingung „Schutzziel Barrierenintegrität“

- Der Schnitt enthält einen zutrittsgefährdeten Abbau und
- der Einfluss des Hydratationswärmeeintrag ist nicht vernachlässigbar (weil eine große Menge an Versatzmaterial eingebracht werden soll oder weil der Abstand zwischen zu verfüllendem Abbau und potentiellm Zutrittspfad gering ist).

(2) Bedingung „Schutzziel Arbeitsschutz“

- Der Hydratationswärmeeintrag ist nicht vernachlässigbar bzw.
- die Verfüllung der Abbaue in dem betreffenden Schnitt erfolgt nicht von unten nach oben und
- eine Nutzung der unten liegenden oder der benachbarten Abbaue kann nicht ausgeschlossen werden.

(3) Bedingung „Sonderfall Einlagerungsbereich“

- Der gesamte Feldesteil ist Einlagerungsbereich und
- es erfolgt ein maßgeblicher Eintrag von Hydratationswärme.

Im Weiteren werden die folgenden Einschränkungen gemacht:

„Gegebenenfalls ist die Durchführung einer Berechnung eine Ermessensfrage.“ (Einschränkung 1)

„Befinden sich unter den notwendigerweise zu berechnenden Schnitten Schnitte, die vergleichbare Fragestellungen im Hinblick auf Integrität und Arbeitsschutz bereits abdeckend behandeln, können auf Basis dieses relativen Kriteriums weitere Schnitte ausgeschlossen werden.“ (Einschränkung 2)

Im **vierten Schritt** wurden die Schnitte ausgewählt, für die eine numerische Berechnung durchgeführt werden soll (s. Tabelle 7-1).

Die Auswahl wird wie folgt begründet:

Südfeld:

Die Verfüllung der Abbaue erfolgt über zwei neu aufgefahrene Strecken, so dass keine Anforderungen seitens des Arbeitsschutzes bestehen.

¹³ Wir vermuten, dass eine Berechnung als notwendig angesehen wird, wenn mindestens eine dieser 3 Bedingungen (1) bis (3) erfüllt ist. Dies wird in [P 212] jedoch nicht explizit angegeben.



Eine numerische Berechnung ist jedoch im Hinblick auf die Barrierenintegrität erforderlich, da große Mengen an Wärme freisetzendem Salzbetonversatz eingebracht werden sollen. Für die Berechnung wird der Schnitt **SF8S** ausgewählt, da er den höchsten Durchbaungsgrad und den geringsten Abstand eines zu verfüllenden Abbaus zum Salzspiegel enthält. Die Schnitte SF9S und SF9NA werden diesbezüglich durch den Schnitt abgedeckt.

Ostfeld:

Die Verfüllung erfolgt von unten nach oben, so dass keine Anforderungen seitens des Arbeitsschutzes bestehen.

Die Abbaue sind nicht zutrittsgefährdet und der Hydratationswärmeeintrag erfolgt in großer Entfernung zum Salzspiegel, so dass die Barrierenintegrität gegeben ist.

Es erfolgt deshalb keine numerische Berechnung.

Westfeld:

Es bestehen keine besonderen Anforderungen an den Arbeitsschutz.

Die Abbaue sind nicht zutrittsgefährdet und der Hydratationswärmeeintrag ist vernachlässigbar.

Es erfolgt deshalb keine numerische Berechnung.

Zentralteil:

Der Schnitt **ZT-3.3** wird im Hinblick auf die Barrierenintegrität numerisch berechnet, da er einen zutrittsgefährdeten Grubenbau enthält und der Hydratationswärmeeintrag nicht vernachlässigbar ist.

Die Schnitte **ZTN-3.1** und **ZTS-3.1** werden im Hinblick auf die Barrierenintegrität numerisch berechnet, da sie zutrittsgefährdete Grubenbaue enthalten und der Hydratationswärmeeintrag mit dem Versatz signifikant ist. Die Schnitte werden auch im Hinblick auf die Arbeitssicherheit berechnet, da hier unter Einbeziehung der bGZ die Verfüllung nicht grundsätzlich von unten nach oben erfolgt.

Für den Schnitt ZT-1.4 kann die Nachweisführung durch Analogieschlüsse auf Basis der abdeckenden Berechnungen zu den Schnitten ZTN-3.1 und ZTS-3.1 erfolgen. (Einschränkung 2)

Nordfeld:

Die Verfüllung erfolgt von unten nach oben, so dass keine Anforderungen seitens des Arbeitsschutzes bestehen.

Die Abbaue sind zutrittsgefährdet und es wird eine große Menge an Wärme freisetzendem Salzbetonversatz eingebracht. Für die Schnitte **NFM 1** und **NFM 2** werden deshalb numerische Berechnungen im Hinblick auf die Barrierenintegrität durchgeführt.¹⁴

Für den Schnitt NFN 1 kann die Nachweisführung im Hinblick auf die Barrierenintegrität durch Analogieschlüsse auf Basis der abdeckenden Berechnungen zu den Schnitten NFM 1 und NFM 2 erfolgen. (Einschränkung 2)

¹⁴ Aus den beiden Schnitten wird ein 3-dimensionales numerisches Modell erstellt.



Südostfeld:

Die Verfüllung der Abbaue erfolgt über Bohrungen von der 1. und 2. Sohle aus und die Verfüllung erfolgt „weitgehend“ von unten nach oben, so dass keine Anforderungen seitens des Arbeitsschutzes bestehen.

Für die Schnitte SOF1 und SOF2 kann die Nachweisführung im Hinblick auf die Barrierenintegrität durch Analogieschlüsse auf Basis der abdeckenden Berechnungen zum Zentralteil Bartensleben erfolgen. (Einschränkung 2)

Grube Marie:

Die Verfüllung erfolgt von unten nach oben, so dass keine Anforderungen seitens des Arbeitsschutzes bestehen.

Für den Schnitt Ma SA 1 ist das Schutzziel Barrierenintegrität bereits aufgegeben.

Für den Schnitt Ma NA 1 kann die Nachweisführung im Hinblick auf die Barrierenintegrität durch Analogieschlüsse auf Basis der abdeckenden Berechnungen zum Zentralteil Bartensleben erfolgen. (Einschränkung 2)

Es erfolgt deshalb keine numerische Berechnung.

Tabelle 7-1: Auswahl der Schnitte

Schnitt	Auswahl als „Sonderschnitt“ aufgrund Kriterium						Auswahl als Berechnungsschnitt aufgrund	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Arbeits- schutz	Barrieren- integrität
SF9 S	x							
SF9 NA	x							
SF8S		x						x
OF 1	x							
OF 9	x							
WF 1	x							
ZT-3.3	x			x				x
ZTN-3.1	x		x				x	x
ZTS-3.1	x		x				x	x
ZT-1.4					x	x		
SOF 1			x					
SOF 2			x					
NFM 1			x					x
NFM 2			x					x
NFN 1			x					
Ma SA 1	x		x					
Ma NA 1	x			x				



7.2. Bewertung

Entsprechend [P 218] sind die 7 in Tabelle 4-1 aufgeführten Nachweiserfordernisse (NW) zu erbringen, wobei 4 dieser Nachweise auch für den Zeitraum der „stabilen Endzustände“ erforderlich oder wünschenswert sind. Da nach [P 218] bei allen Nachweisen Berechnungen bzw. Plausibilitätsbetrachtungen vorgesehen sind, müssen die in [P 212] ausgewählten Sonder- und Berechnungsschnitte auch alle Nachweise ermöglichen. Für jedes NW müssen geeignete Schnitte vorliegen, so dass der jeweilige Nachweis vollständig erbracht werden kann. Dabei ist es durchaus möglich, dass für verschiedene NW der gleiche Schnitt verwendet werden kann.

Die Kriterien für die Auswahl der Schnitte und die Auswahl selber hängen von dem jeweiligen NW ab. Sie können deshalb erst dann verbindlich festgelegt bzw. bewertet werden, wenn die NW feststehen. In [BS 11a] empfehlen wir eine systematische Ableitung und präzise Formulierung der sich aus dem gültigen Regelwerk ergebenden NW (dort Forderungen F1 bis F4). Eine abschließende Bewertung der Schnittauswahl ist erst dann möglich, wenn diese Forderungen erfüllt sind. Da einige der in [P 218] aufgeführten Nachweiserfordernisse unstrittig sind und bei anderen absehbar ist, dass sie zumindest in ähnlicher Form zu erbringen sind, prüfen wir im Folgenden, ob die Schnittauswahl in [P 212] geeignet ist, die in [P 218] aufgeführten NW zu erbringen. Das NW (4) (NW einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume) klammern wir von der Bewertung aus, da wir es für nicht sachgerecht ansehen (s. [BS 11a]).

7.2.1. Verwendung 2-dimensionaler Schnitte

Die Beschränkung auf 2-dimensionale Schnitte impliziert zwei Näherungen:

- Es wird unterstellt, dass sich die in dem Schnitt angeschnittenen Grubenbaue senkrecht zur Schnittebene unendlich weit fortsetzen.
- Es wird unterstellt, dass sich die geologischen Verhältnisse senkrecht zur Schnittebene unverändert fortsetzen.

Beide Näherungen sind nicht erfüllt. Damit eine Nachweisführung dennoch mittels 2-dimensionaler Schnitte erfolgen kann, muss eine zusätzliche Annahme getroffen werden, deren Gültigkeit ebenfalls nachzuweisen ist. Eine solche Annahme könnte sein:

„Für jeden Richtungsvektor senkrecht zum Gravitationsfeld der Erde gilt¹⁵: Wählt man aus der Menge aller parallelen Schnitte durch einen Gebirgsbereich, die senkrecht zu diesem Richtungsvektor liegen, den im Hinblick auf ein Kriterium ungünstigsten Schnitt aus und ist das Kriterium bei 2-dimensionaler Betrachtungsweise in diesem Schnitt erfüllt, dann ist das Kriterium auch im dem betrachteten Gebirgsbereich bei 3-dimensionaler Betrachtungsweise erfüllt.“

Eine Nachweisführung mittels 2-dimensionaler Schnitte besteht somit aus den drei Schritten:

1. Nachweis bzw. Begründung der Annahme zur Reduzierung der Nachweisführung auf 2 Dimensionen.
2. Ermittlung eines geeigneten (hier: des ungünstigsten) Schnitts.

¹⁵ D. h. der Richtungsvektor liegt in der x-y-Ebene eines Koordinatensystems, dessen z-Achse die Höhenachse ist.



3. Nachweis, dass das Kriterium in 2 Dimensionen in diesem Schnitt erfüllt ist.

Sind Nachweise für verschiedene Kriterien zu erbringen, dann müssen die drei Nachweisschritte für jedes Kriterium separat durchgeführt werden.

Bei Gültigkeit der oben aufgeführten Annahme wäre es zulässig, den für die Nachweisschritte 2. und 3. günstigsten Richtungsvektor auszuwählen, z. B. in Richtung der größten Ausdehnung eines Grubenbaus, so dass der Querschnitt des von dem ungünstigsten Schnitt angeschnittenen Grubenbaus möglichst gering ist.

In [P 212] wird die Reduzierung der Nachweisführung auf 2 Dimensionen nicht begründet. Wir empfehlen deshalb:

F1: Vom BfS sollte dargelegt und begründet werden, weshalb die Nachweise zu den bestehenden Nachweiserfordernissen anhand von (2-dimensionalen) Schnitten geführt werden können.

Da wir vermuten, dass das BfS implizit von der Gültigkeit der o. g. Annahme ausgeht, möchten wir sie im Folgenden kommentieren. Die Vernachlässigung der 3. Dimension bzw. die Annahme eines unendlich langen Grubenbaus führt tendenziell zu einer Überschätzung der Senkungs- und Kriechbewegungen an der Erdoberfläche und der Kriechbewegungen im Gebirge, da die Stützwirkung senkrecht zur Schnittebene vernachlässigt wird. Weiterhin führt sie zu einer Überschätzung des Wärmeeintrags in das Gebirge.

Bezüglich

NW (1) Begrenzung der Senkung an der Tagesoberfläche

NW (5) Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel

sowie der Temperaturerhöhung in der obersten Anhydritscholle (ein Kriterium bei NW (6))

wirkt sich die Vernachlässigung der 3. Dimension ungünstig aus, so dass – bei homogenen geologischen Verhältnissen – die Reduzierung auf einen 2-dimensionalen Schnitt bzgl. dieser NW bzw. Kriterien konservativ und die o. g. Annahme bzgl. dieser beiden Kriterien gerechtfertigt ist.

Bzgl. der Schiefstellung von Gebäuden ist die o. g. Annahme jedoch in dieser Allgemeinheit nicht zutreffend. Die Schiefstellung von Gebäuden wird dadurch bestimmt, wie stark der Durchörterungsgrad variiert. Sofern die Schnittebene so gewählt wird, dass sie eine besonders hohe Variabilität des oberflächennahen Durchörterungsgrads aufweist, führt die Vernachlässigung der 3. Dimension tendenziell zu größeren Schiefstellungen und ist bzgl.

NW (2) Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden

konservativ. Geologisch gleichförmige, störungsfreie Verhältnisse im Deckgebirge vorausgesetzt, würde eine mögliche Annahme für dieses Kriterium also lauten:

„Wählt man aus der Menge aller vertikalen Schnitte durch einen Gebirgsbereich denjenigen Schnitt aus, bei dem der über die Teufe integrierte unverfüllte Hohlraum in Abhängigkeit von der horizontalen Koordinate am stärksten variiert, dann ist die in diesem Schnitt berechnete künftige maximale Schiefstellung größer als in dem betrachteten Gebirgsbereich bei 3-dimensionaler Betrachtungsweise.“



Wie sich eine Überschätzung des Wärmeeintrags in das Gebirge auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und damit auf

NW (3) Erhalt der vorhandenen Barrierenintegrität

NW (7) Arbeitssicherheit

sowie die Spannungszustände in der obersten Anhydritscholle (ein Kriterium bei NW (6))

auswirkt, ist ohne die Durchführung numerischer Berechnungen unklar. Die Formulierung einer geeigneten Annahme zur Reduzierung der Nachweisführung auf 2 Dimensionen kann deshalb erst im Ergebnis solcher Berechnungen begründet werden.

Wir kommen deshalb zu dem Ergebnis, dass die Nachweisführung ein iterativer Prozess sein muss: Ggf. kann erst im Ergebnis der numerischen Berechnungen nachgewiesen werden, dass die Beschränkung auf 2-dimensionale Schnitte zulässig ist. Die Zulässigkeit kann sich z. B. dadurch ergeben, dass die Berechnungen zeigen,

- dass sich ein durch die Reduzierung auf 2 Dimensionen überschätzter Effekt ungünstig hinsichtlich eines Kriteriums auswirkt, oder
- dass die berechneten Größen so weit unterhalb der zulässigen Kriterien liegen, dass die Reduzierung auf 2 Dimensionen im Hinblick auf die Erfüllung des NW irrelevant ist (beispielsweise bei der Schiefstellung von Gebäuden).

H 2: Bei der Führung der Einzelnachweise ist im Ergebnis der numerischen Berechnungen bzw. Plausibilitätsbetrachtungen nachzuweisen, dass die Beschränkung auf 2-dimensionale Schnitte zulässig ist. Hierzu kann beispielsweise dargelegt werden, dass sich ein durch die Reduzierung auf 2 Dimensionen überschätzter Effekt ungünstig hinsichtlich eines Kriteriums auswirkt, oder dass die berechneten Größen so weit unterhalb der zulässigen Kriterien liegen, dass die Reduzierung auf 2 Dimensionen im Hinblick auf die Erfüllung des NW irrelevant ist.

Im Hinblick auf das NW (7) möchten wir darauf hinweisen, dass die Standsicherheit von Pfeilern u. A.

- von den geometrischen Verhältnissen (Höhe und Breite der Pfeiler),
- den Gesteinen in den Pfeilern und deren Homogenität sowie
- dem Alter der Grubenbaue

abhängt. Die Schnitte, in denen diese Größen am ungünstigsten sind, sind nicht zwingend die Schnitte mit dem höchsten Durchbaugrad. Sofern sich herausstellt, dass die diesbezüglich ungünstigsten Schnitte längs und nicht quer zu den Grubenbauen verlaufen, lässt sich der Nachweis der Arbeitssicherheit ggf. nicht mittels 2-dimensionaler Schnitte erbringen.

Bei der Begründung der Annahme zur Reduzierung der Nachweisführung auf 2 Dimensionen und bei der Auswahl des abdeckenden Schnitts sind die geologischen Verhältnisse zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die Lage der Anhydritschollen relativ zu den zu verfüllenden



Grubenbauen (s. NW (6)), vgl. Abschnitt 7.2.3. Die Schnitte mit dem höchsten Durchbauungsgrad müssen nicht immer die abdeckenden unter Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse sein.

7.2.2. Identifizierung der Feldesteile, für die Schnitte zu erstellen sind

Da die Auswahlkriterien in [P 212] dazu führen, dass für alle Feldesteile Schnitte zu erstellen sind, erübrigt sich eine Bewertung der Kriterien. Wir stimmen der Auswahl der Feldesteile zu.

7.2.3. Kriterien für die Sonderschnitte

In [P 212] wird nur unvollständig erläutert, welche Funktion die Sonderschnitte haben. Die Sonderschnitte dienen in [P 212] als Grundmenge für die Auswahl der Berechnungsschnitte, d. h. der Schnitte, für die numerische Berechnungen zur Erfüllung der NW durchgeführt werden sollen. Die nicht als Berechnungsschnitte ausgewählten Sonderschnitte werden in [P 212] nicht weiter berücksichtigt, so dass unklar bleibt, welche Funktion sie haben.

Auf S. 28 werden lediglich Anforderungen an die Sonderschnitte formuliert. Es wird gefordert, dass sie die repräsentative Erfassung

- „des Tragverhaltens in Bezug auf die Haupttragrichtungen
 - des Verformungsverhaltens in Bezug auf die Maximalwerte
 - des Wärmeeintrags in Bezug auf Maximalwerte und daraus resultierende Zwangsspannungen“
- sowie „möglichst weitgehend abdeckende Aussagen“ ermöglichen sollen.

Die Funktion der Sonderschnitte bestimmt aber die Kriterien für ihre Festlegung. Im Folgenden analysieren wir deshalb zunächst, welche Funktion den Sonderschnitten zukommt.

Nach unserem Verständnis haben die Sonderschnitte die Funktion, das Grubengebäude mit dem umgebenden Gebirge im Hinblick auf die Nachweiserfordernisse abdeckend zu repräsentieren. Die Wahl der Sonderschnitte ist deshalb eng mit der Begründung für die Reduzierung der Nachweisführung auf 2 Dimensionen verbunden.

Folgt man bei der Nachweisführung der in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Vorgehensweise, dann müssen die Sonderschnitte alle Schnitte umfassen, von denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie bezüglich eines der Nachweiskriterien der jeweils ungünstigste Schnitt sind.

Stellt man diese Anforderung an die Auswahl der Sonderrisse, dann fehlt in [P 212] die Angabe, welches Kriterium sich aus welchem NW ergibt und weshalb dies der Fall ist. Auch ohne diese Angabe ist jedoch erkennbar, dass die in [P 212] für die Auswahl der Sonderrisse aufgestellten Kriterien unvollständig sind. Insbesondere werden die geologischen Verhältnisse (z. B. die Lage der Anhydritschollen) nicht berücksichtigt. Weiterhin fehlen Kriterien wie

- (großer) Resthohlraum nach Verfüllung¹⁶,
- (geringer) Abstand des obersten Grubenbaus zum Salzspiegel,

¹⁶ Für die künftigen langfristigen Senkungen und Schiefstellungen ist es auch wichtig, welche Hohlräume offen bleiben sollen, und nicht nur, welche Hohlräume gegenwärtig offen sind.



- Größe der obersten Grubenbaue (wegen der Erwärmung des Salzspiegels durch Hydratationswärme; s. NW (5)),
- (geringe) Mächtigkeit der Salzbarriere zum Zentralteil (zwischen Lager B und Lager C),
- ungünstige Pfeiler- und Schwebengeometrie und
- Alter der Grubenbaue.

Sofern diese Kriterien vom BfS nicht herangezogen werden, weil sie als unter den konkreten Bedingungen im ERAM unerheblich angesehen werden (z. B. aufgrund eines vergleichsweise einheitlichen Alters der Grubenbaue innerhalb eines Grubenbereichs), ist dies zu begründen.¹⁷

Die Kriterien

- „Schnitt liegt schon bei Behörden vor“ und
- „Einlagerungsgrubenbau in der Schnittebene“

sind für die o. g. Zielstellung (Auswahl des jeweils abdeckenden Schnitts für die NW (1) bis NW (7)) unerheblich.

Weiterhin ist unverständlich, weshalb das Kriterium

- „Grubenbereiche mit einem schon vorhandenen Zutritt“

gewählt wird, wenn gerade dieses Kriterium bei der späteren Auswahl der Berechnungsschnitte als ein Ausschlusskriterium gewählt wird. („Die Integrität der Barriere ist bereits verletzt.“)

Nach unserer Auffassung müssen die Sonderschnitte alle Schnitte umfassen, bei denen nicht unmittelbar erkennbar ist, dass sie hinsichtlich aller NW durch einen anderen Schnitt konservativ abgedeckt werden. Anhand dieser Sonderschnitte sind dann in einem späteren Schritt alle abdeckenden Schnitte auszuwählen. Wir empfehlen deshalb:

F 3: Vom BfS sollten die Kriterien für die Auswahl der Sonderschnitte unter Beachtung der in Abschnitt 4.2.3 gemachten Anmerkungen begründet werden.

7.2.4. Festlegung der Sonderschnitte

Die Sonderschnitte müssen alle Schnitte umfassen, von denen nicht ausgeschlossen werden kann, dass sie bezüglich eines der Nachweiskriterien der jeweils ungünstigste Schnitt sind. Wenn die Kriterien für die Auswahl der Sonderschnitte festliegen, sind die Sonderschnitte festzulegen.

Grundsätzlich kann die Festlegung der Sonderschnitte nur auf der Basis eines dreidimensionalen geologischen und bergbaulichen Modells der Grube und des umgebenden Gebirges bzw. einer ausreichend dichten Schar von Schnitten durch dieses Modell in unterschiedlichen Richtungen erfolgen. Die Gewährleistung bzw. die Überprüfung der Vollständigkeit der Sonderschnitte erfolgt

¹⁷ Hinweis: In [P 99], S.36 wird von BGR ausgeführt: „Vergleichende Berechnungen zeigen, dass das sukzessive Ausbrechen, d.h. das Auffahren der Hohlräume zu den wirklichen Zeitpunkten, nur in den ersten zwei Jahrzehnten zu anderen Ergebnissen führt“. Die „vergleichenden Berechnungen“ werden in [P 99] nicht dokumentiert, bestätigen aber die allgemeine Erfahrung numerischer Analysen zum Tragverhalten untertägiger Strukturen im Salinar.



dann durch einen Vergleich der Sonderschnitte mit den möglichen Schnittlinien durch das dreidimensionale Modell bzw. mit der vollständigen Schar der Modellschnitte. Sofern ein dreidimensionales Modell nicht vorliegt bzw. die Schar der vorliegenden Modellschnitte das Grubenmodell nicht ausreichend vollständig darstellt, ist nachvollziehbar darzulegen, welche konkreten Unterlagen der Auswahl der Sonderschnitte zugrunde liegen und aufgrund welcher Überlegungen und Annahmen die Bereiche bzw. Richtungen, für die keine Schnitte vorliegen, als potentiell ungünstig ausgeschlossen werden können. Wir empfehlen deshalb:

F 4: Vom BFS sollte die Vorgehensweise bei der Auswahl der Sonderschnitte dargelegt und die Vollständigkeit der Sonderschnitte unter Berücksichtigung aller Nachweiserfordernisse begründet werden.

Eine Bewertung der ausgewählten Sonderschnitte im Hinblick auf ihre Vollständigkeit erfolgt erst nach einer Klärung der offenen Punkte, die in [BS 11a], [BS 11b] und in diesem Gutachten festgestellt wurden, und zu denen wir Forderungen abgeleitet haben.

Unabhängig hiervon weisen wir aber darauf hin, dass die 15 Sonderschnitte zur Grube Bartensleben hinsichtlich des NW Erhalt der Barrierenintegrität schon große Teile der Grube abdecken dürften. Unklar ist gegenwärtig jedoch bspw.,

- ob es in anderen Schnittrichtungen ungünstigere Verhältnisse im Hinblick auf die Schiefstellung von Gebäuden, den Abstand zur nächste Anhydritscholle oder die Pfeilerstabilität gibt und
- durch welche Schnitte die Barrierenintegrität zwischen dem Südfeld (Lager B) und dem Zentralteil (Lager C) nachgewiesen werden soll.

Bei manchen Einflussfaktoren ist ohne die Durchführung von numerischen Berechnungen unklar, ob sie sich hinsichtlich eines Nachweiskriteriums günstig oder ungünstig auswirken. Solche Einflussfaktoren sind die Temperaturerhöhung des Gebirges durch Hydratationswärme, die Kriechklasse des die Grubenbaue umgebenden Gebirges und die geometrische Anordnung der Grubenbaue. Ihr Einfluss auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und damit auf die Barrierenintegrität (NW (3)), den Schutz der obersten Anhydritscholle (NW (6)) und die Arbeitssicherheit (NW (7)) kann ohne numerische Berechnungen häufig nicht so präzise vorhergesagt werden, dass stets erkennbar wäre, welcher von zwei Schnitten der ungünstigere ist. Ggf. kann aus den Berechnungen zu einem Schnitt abgeleitet werden, wie die verschiedenen Einflussfaktoren wirken und es kann auf dieser Basis im Nachhinein begründet werden, dass der gewählte Schnitt der ungünstigere ist. Oder es kann aus den Berechnungsergebnissen abgeleitet werden, dass die Nachweise so robust sind (dass also die Kriterien der NW so deutlich eingehalten werden), dass die Unterschiede zwischen dem berechneten Schnitt und anderen Schnitten zu gering sind, um zu einer Verletzung der Kriterien bei den anderen Schnitte führen zu können.

Wir kommen deshalb zu dem Ergebnis, dass die Nachweisführung auch aus diesen Überlegungen heraus ein iterativer Prozess sein muss: Ggf. kann erst im Ergebnis der numerischen Berechnungen nachgewiesen werden, dass die Auswahl der Sonderschnitte und Berechnungsschnitte vollständig bzw. abdeckend durchgeführt wurde. Wir empfehlen deshalb:



H 5: Bei der Führung der Einzelnachweise ist im Ergebnis der numerischen Berechnungen nachzuweisen, dass die Auswahl der Sonder- und Berechnungsschnitte vollständig bzw. abdeckend im Sinne der zu führenden Nachweise durchgeführt wurde.

7.2.5. Kriterien für die Auswahl der Berechnungsschnitte

Die in [P 212] angegebenen Ausschlusskriterien, bei deren Vorliegen keine numerischen Berechnungen durchzuführen sind, sind u. E. nicht schlüssig:

- Das Einhalten von Sicherheitsabständen als Nachweis für den langfristigen Erhalt der Barrierenintegrität entspricht nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- Da nach unserer Auffassung der Ausschluss einer weiteren Verschlechterung der Barrierenwirkung (und eine Verbesserung der Barrierenwirkung) nachzuweisen ist (s. [BS 11a]), schließt eine schon bestehende Verletzung der Barrierenintegrität eine numerische Nachweisführung nicht aus. Im Gegenteil: Insbesondere dort, wo eine Verletzung der Barrierenintegrität ausgewiesen wird, ist im Rahmen erweiterter und ergänzender rechnerischer Untersuchungen den Konsequenzen der Integritätsverletzung nachzugehen.
- Das Ausschlusskriterium „Verfüllung von unten nach oben“ (im Hinblick auf den Arbeitsschutz) entspricht nicht der in [P 218] und [G 216] angegebenen Nachweismethodik. Nach dieser soll die Arbeitssicherheit für alle Grubenbaue zunächst mittels Berechnungen oder Plausibilitätsbetrachtungen ermittelt werden (Sicherheitselement 3). Das Ausschlusskriterium „Verfüllung von unten nach oben“ soll erst bei den darauffolgenden Sicherheitselementen 4 und 5 herangezogen werden.

Es fällt auf, dass die Kriterien für die Notwendigkeit von numerischen Berechnungen ausschließlich im Hinblick auf NW (3) (Barrierenintegrität) und NW (7) (Arbeitsschutz) aufgestellt werden. Es werden keine Kriterien für die Notwendigkeit von Berechnungen im Hinblick auf die übrigen Nachweiserfordernisse angegeben. Da dies in [P 212] nicht begründet wird, stellen sich die Fragen, ob diese Nachweiserfordernisse bei der Auswahl der Berechnungsschnitte überhaupt berücksichtigt wurden und falls ja, wie. Wir empfehlen deshalb:

F 6: Die Kriterien für die Auswahl der Berechnungsschnitte sollten begründet werden. Dies schließt insbesondere eine Begründung ein, weshalb hierbei lediglich die Nachweiserfordernisse (3) (Barrierenintegrität) und (7) (Arbeitsschutz) explizit berücksichtigt werden.

F 7: Die Inkonsistenzen zwischen den Unterlagen [P 218], [G 216] und [P 212] im Hinblick auf die Methodik der Nachweisführung zur Gewährleistung der Arbeitssicherheit sollten beseitigt werden und es sollte ein widerspruchsfreies Nachweiskonzept vorgelegt werden.



7.2.6. Auswahl der Berechnungsschnitte

Eine Bewertung der ausgewählten Berechnungsschnitte erfolgt erst nach einer Klärung der offenen Punkte, die in [BS 11a], [BS 11b] und in diesem Gutachten festgestellt wurden, und zu denen wir Forderungen abgeleitet haben.

Unabhängig hiervon weisen wir aber darauf hin, dass die Berechnungsschnitte (sowie alle 17 Sonderschnitte) z. T. größere nicht definierte (weiße) Bereiche beinhalten. Im Rahmen der Nachweisführung ist darzulegen,

- ob und wenn ja wie diese nicht definierten Bereiche bei der Nachweisführung berücksichtigt werden und
- wie dies begründet ist.

Auch hier kann es sich als erforderlich erweisen, die Nachweisführung als iterativen Prozess zu führen: Die notwendigen Begründungen können ggf. aus den durchgeführten Berechnungen abgeleitet werden (s. Forderung F 5), z. B. in Folge einer Sensitivitätsanalyse bzgl. der Eigenschaften der nicht erfassten Bereiche. Wir empfehlen deshalb:

H 8: Bei der Führung der Einzelnachweise sollte dargelegt werden,

- **ob und wenn ja wie die in den Berechnungsschnitten nicht definierten Bereiche bei der Nachweisführung berücksichtigt werden und**
- **wie dies begründet ist.**



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
- [AG 08] DÜSTERLOH U., LUX K.-H., KNOLL P., STAHL U.
Prüfbericht im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des ERA
Morsleben
Prüfung der Auslegungsreife von Unterlagen – Fortsetzung der Prüfung:
Zeitraum Mai 2007 bis Juli 2008
AG Morsleben, 24.07.2008
- [BGR 98A] BGR
ERA Morsleben, Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen (Darstellung
der Einzelergebnisse), Archiv-Nr. 117221, Tgb.-Nr. 10742/98
1998
- [BGR 98B] BGR
ERA Morsleben: Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor
und In-situ, Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen, Archiv-Nr.
117213, Tgb.-Nr. 10683/98
1998
- [BS 11A] KISTINGER S. (BS) , DÜSTERLOH U, LUX K.-H. (TUC)
Stilllegung des ERA Morsleben
3. Zwischenbericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte)
Bewertung P 218
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 05.05.2011
- [BS 11B] KISTINGER S. (BS) , DÜSTERLOH U. (TUC)
Stilllegung des ERA Morsleben
4. Zwischenbericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte)
Bewertung G 216
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 20.06.2011
- [DEPV 09] VERORDNUNG ÜBER DEPONIEEN UND LANGZEITLAGER (DEPONIEVERORDNUNG - DEPV)
vom 27.04.2009
Bundesgesetzblatt Jahrgang 2009 Teil I Nr. 22 vom 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 überwachungsbedürftigen Abfällen im Salzgebirge – Ablagerung in Bergwerken
Ernst & Sohn, Bautechnik 70 (1993), Heft 12
- [G 216] MÜLLER-HOEPPE N.
Konzept von Vorsorgemaßnahmen für die Stilllegung
DBE, Peine, 15.12.2005
- [GIM 68] GIMM W.
Kali- und Steinsalzbergbau
Aufschluß und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten
Band 1
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968
- [MEI 07] MEIER G., MEIER J.
Erdfälle und Tagesbrüche – Möglichkeiten einer numerischen Modellierung
Bull. angew. Geol., Vol. 12/1, 91-103 (Juli 2007))
- [MIC 66] MICHALZIK A.
Die Bedeutung des Versatzes für die planmäßige Senkung der Abbauverluste im Kalibergbau
Freiburger Forschungshefte A 400
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1966
- [MOH 63] MOHR F.
Gebirgsmechanik
Hermann Hübener Verlag K.G., Goslar, 1963
- [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 99] HEUSERMANN S., NIPP H.-K.
ERA Morsleben. Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben
BGR, Hannover, 14.12.2000
- [P 212] MÜLLER-HOEPPE, KREIENMEYER
Stand sicherheits- und Integritätsnachweis - Kriterien zur Auswahl von Berechnungsschnitten
DBE, Stand 15.12.2005



- [P 218] MÜLLER-HOEPPE
Sicherheitsnachweismethoden und Sicherheitsnachweiskriterien für die Maßnahmen
der Stilllegung (Standicherheit und Integrität)
DBE, Stand 15.12.2005
- [P 220] Fischer et. al
Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach Durchführung der bergbaulichen
Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil – Konzeptplanung –
DBE, 15.12.2005
- [SPA 57] SPACKELER G.
Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues (2. Auflage)
VEB Wilhelm Knapp Verlag, Halle (Saale), 1957
- [SUL 88] SULEM J., VARDOULAKIS I.
Bifurcation analysis of the triaxial test on rock specimens.
France – US Workshop “Strain Localization and Size Effect Due to Cracking and
Damage”
Preprints, Ecole Normale Supérieure, Cachan, France, 6.-9. September 1988
- [SUL 90] SULEM J., VARDOULAKIS I.
Bifurcation analysis of the triaxial test on rock specimens.
A theoretical model of shape and size effect
Acta Mechanica 83, 195-212 (1990)