



Stilllegung des ERA Morsleben

10. Bericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte)

Prüfung des Verfüllkonzepts:

Verfüllmaterial (Salzbeton M3)

BS-Projekt-Nr. 0108-03

erstellt im Auftrag des

Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt
des Landes Sachsen-Anhalt
Leipziger Straße 58
39112 Magdeburg

durch die

Brenk Systemplanung GmbH
Heider-Hof-Weg 23
52080 Aachen

Aachen, 03.07.2014

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:

- Dipl.-Phys. S. Kistingner
- Dipl.-Geol. R. H. Stollenwerk

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

Unterschrift Projektleiter	Unterschrift Geschäftsleitung
----------------------------	-------------------------------



ZUSAMMENFASSUNG

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die Prüfung, ob das gemäß Plan Stilllegung vorgesehene Verfüllmaterial (Salzbeton M3) die an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen erfüllt.

Wir kommen zu dem Ergebnis, dass die in [G 228] und in anderen Planunterlagen enthaltenen Anforderungen an das Verfüllmaterial bzw. an den (ausgehärteten) Versatz z. T. nicht ausreichend hergeleitet bzw. begründet sind. Zudem wurden in den Nachweisen zur Standsicherheit, Integrität und Langzeitsicherheit z. T. Annahmen bzgl. der Eigenschaften des Verfüllmaterials getroffen, die von den in [G 228] und in anderen Planunterlagen enthaltenen Anforderungen abweichen. Aus unserer Sicht sollte ausgehend von [G 228] ein Anforderungskatalog erstellt werden, in dem die Anforderungen an das Verfüllmaterial aufgeführt werden und die Notwendigkeit dieser Anforderungen und der einzuhaltenden Kennwerte für jeden Einzelfall begründet werden.

Im nächsten Schritt ist die Vollständigkeit der Erst-/Eignungsprüfung zu dem vorgesehenen Verfüllmaterial zu prüfen. Im Rahmen einer solchen Erst-/Eignungsprüfung sind alle Nachweise zu führen, dass die bestehenden Anforderungen an das Verfüllmaterial bei der Verwendung des vorgesehenen Materials eingehalten werden. Umfang und Inhalte einer Erst-/Eignungsprüfung hängen maßgeblich von den zu erfüllenden Anforderungen an das Verfüllmaterial ab. Es liegen uns jedoch weder eine Planunterlage noch ein Konvolut von Prüfunterlagen vor, die einer solchen Erst-/Eignungsprüfung oder der Dokumentation dieser Erst-/Eignungsprüfung entsprechen. Im vorliegenden Bericht wird der aktuelle Kenntnisstand zu den Materialparametern und Eigenschaften des gemäß Plan Stilllegung vorgesehenen Verfüllmaterials (Salzbeton M3) zusammengestellt. Wir kommen zu der Empfehlung, dass nach der behördlichen Bestätigung des o. g. Anforderungskatalogs eine auf diesem Katalog basierende vollständige Dokumentation zur Erst-/Eignungsprüfung für das vorgesehene Verfüllmaterial vorgelegt werden sollte.

Schließlich betrachten wir die im Plan Stilllegung und in den Planunterlagen enthaltenen Angaben zu den im Rahmen der Verfüllung des ERAM vorgesehenen Qualitätssicherungsmaßnahmen. Art und Umfang eines Teils dieser Maßnahmen hängen ebenfalls von den Anforderungen an das Verfüllmaterial ab. Wir kommen zu dem Ergebnis, dass die vorliegenden Angaben lediglich konzeptionell sind und detaillierte Darstellungen fehlen. Auf der Basis der Ergebnisse der Erst-/Eignungsprüfung zum Verfüllmaterial sollte ein detaillierter Qualitätsmanagementplan (QMP) aufgestellt werden, aus dem explizit sämtliche einzuhaltende Vorgaben (z. B. Parameterwerte bzw. -bandbreiten, Bauabläufe) und Maßnahmen (insbesondere Untersuchungen in Art und Umfang sowie Maßnahmen bei festgestellten Abweichungen von den Vorgaben) hervorgehen. Die Ergebnisse der in Umsetzung dieses QMP durchgeführten Untersuchungen und Prüfungen müssen den Nachweis ermöglichen, dass bei den Verfüllmaßnahmen nur erst-/eignungsgeprüftes Material verwendet wird.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite:

ZUSAMMENFASSUNG

1. EINLEITUNG	1
2. AUFGABENSTELLUNG UND BERICHTSAUFBAU.....	3
3. ANFORDERUNGEN AN DAS VERFÜLLMATERIAL	5
3.1. Anforderungen gemäß [G 228]	5
3.1.1. Ausgangsstoffe des Verfüllmaterials und Dosierung	5
3.1.2. Rheologische Materialeigenschaften.....	6
3.1.3. Thermodynamische Materialeigenschaften	7
3.1.4. Physikalische Materialeigenschaften	8
3.1.5. Anforderungen aus dem Umweltschutz	8
3.1.6. Anforderungen an die Eignungsprüfung für das Verfüllmaterial.....	9
3.1.7. Zusammenfassung der Anforderungen aus [G 228]	10
3.2. Anforderungen gemäß Plan Stilllegung und Planunterlagen.....	11
3.2.1. Plan Stilllegung [A 281]	11
3.2.1.1. Rolle der Versatzmaßnahmen im Stilllegungskonzept	11
3.2.1.2. Sicherheitstechnische Auslegungsanforderungen an den Versatz.....	12
3.2.1.3. Verfüllmaßnahmen im Rahmen der Stilllegung	12
3.2.1.4. Standsicherheit des Grubengebäudes während des Stilllegungsbetriebes	13
3.2.1.5. Verfüll-/Versatzmaßnahmen im Zusammenhang mit der Langzeitsicherheit	13
3.2.1.6. Berücksichtigung des Verfüllmaterials bei den Konsequenzanalysen	14
3.2.1.7. Anforderungen an das Verfüllmaterial aus dem Plan Stilllegung [A 281]	14
3.2.2. Verfüllplan [P 220]	15
3.2.3. Überwachungskonzept Salzbeton [P 229]	15
3.2.4. Überwachungs- und Beweissicherungsprogramm zu den Bauzuständen für die Stilllegung des ERAM [G 188]	17
3.3. Bewertung.....	17
3.3.1. Vorbemerkung.....	17
3.3.1.1. Ableitung von Anforderungen an Komponenten der Stilllegung	17
3.3.1.2. Darstellung der Verfüllung	22
3.3.1.3. Nachweis der Herstellbarkeit.....	24
3.3.2. Konsistenz der Angaben	25
3.3.3. Bestimmtheit der Anforderungen	27
3.3.4. Vollständigkeit und Begründung der Anforderungen	28
4. ANFORDERUNGEN AUS DEN SICHERHEITSNACHWEISEN DES BFS	31
4.1. Nachweise zur Standsicherheit und Integrität.....	31

4.1.1.	Annahmen in den Nachweisen	31
4.1.1.1.	Eigenschaften des Salzbetons	31
4.1.1.2.	Einbau des Salzbetons	34
4.1.2.	Bewertung	37
4.1.2.1.	Eigenschaften des Salzbetons	37
4.1.2.2.	Einbau des Salzbetons	39
4.2.	Langzeitsicherheitsnachweise	41
4.2.1.	Annahmen in den Nachweisen	41
4.2.1.1.	Langzeitsicherheitsanalyse mit dem Programm PROSA [P 277]	41
4.2.1.2.	Langzeitsicherheitsanalyse mit dem Programm EMOS [P 278]	44
4.2.2.	Bewertung	45
4.3.	Bewertung der Anforderungen	46
5.	EIGNUNG DES SALZBETONS M3 ALS VERFÜLLMATERIAL	53
5.1.	Angaben in [P 221]	53
5.1.1.	Ausgangsstoffe und Rezeptur	53
5.1.2.	Rheologische Untersuchungen	54
5.1.3.	Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten	55
5.1.4.	Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung	55
5.1.5.	Übertragung von Untersuchungsergebnissen des Salzbetons M2	56
5.1.6.	Physikalische Untersuchungen	58
5.1.7.	Thermodynamische Untersuchungen	60
5.2.	Angaben in [U 2]	61
5.3.	Angaben in [U 3]	61
5.4.	Angaben in [U 4]	61
5.5.	Bewertung	62
6.	QUALITÄTSSICHERUNG	66
6.1.	Plan Stilllegung [A 281]	66
6.2.	Qualitätssicherungsprogramm zur Stilllegung des ERAM [G 92]	67
6.3.	Systembeschreibung: Material für die Stilllegung [G 228]	67
6.4.	Überwachungskonzept Salzbeton [P 229]	68
6.4.1.	Überwachungskonzept	68
6.4.2.	Überwachung der Ausgangsstoffe	69
6.4.3.	Überwachung des Dosier- und Mischprozesses sowie der Salzbetonqualität	70
6.4.4.	Überwachung der Verfüllung	70
6.4.5.	Dokumentation der Überwachung	71
6.5.	Bewertung	71



7. ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN	74
8. LITERATUR.....	81



1. EINLEITUNG

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat beim zuständigen Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) die Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens nach § 9 b Atomgesetz (AtG) zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) beantragt. Ferner hat das BfS die Möglichkeit, Anträge zur Änderung der Dauerbetriebsgenehmigung zum ERAM (DBG) zu stellen.

Zur Planfeststellung des Stilllegungsbetriebes bzw. zur Änderung der DBG legt der Antragsteller Unterlagen vor, die den Gegenstand der Planfeststellung bzw. Plangenehmigung beschreiben und die Voraussetzungen für die Planfeststellung bzw. für die Plangenehmigung nachweisen sollen.

Zur Prüfung der Genehmigungsfähigkeit der in den o. g. Unterlagen beschriebenen Vorgehensweisen hat das MLU am 18.04.2002 mit dem Unternehmen Brenk Systemplanung GmbH (BS) einen

Vertrag über Sachverständigentätigkeit nach § 20 AtG im Rahmen des beantragten Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) sowie im Rahmen von atomrechtlichen Änderungsverfahren hinsichtlich der Dauerbetriebsgenehmigung für das ERAM (DGB)

geschlossen. Dieser Vertrag dient der Rahmenregelung zwischen dem MLU und BS zur Erbringung von Sachverständigenleistungen. Einzelheiten der zu erbringenden Leistungen werden in separaten Werkverträgen geregelt.

Der Stilllegung des ERAM liegt ein Sicherheitskonzept zugrunde, das im Plan zur Stilllegung des ERAM [A 281] in Verbindung mit weiteren Verfahrensunterlagen dargelegt wird. Das MLU beauftragte BS und die TU Clausthal (TUC) als deren Unterauftragnehmer mit der Prüfung der geotechnischen Teile dieses Sicherheitskonzepts auf Plausibilität und Vollständigkeit.

Dazu wurden bislang vorgelegt:

- 1. Bericht: Kurzstellungnahme ‚Standsicherheit und stabiler Endzustand - Lager H‘; TUC, 04.09.2009
- 2. Bericht: Darstellung des geotechnischen Teils des Sicherheitsnachweiskonzepts des BfS, seiner rechtlichen Bewertung und einer Zusammenstellung von Prüffragen für seine Prüfung auf Plausibilität und Vollständigkeit; BS, 11.10.2010
- 3. Bericht: Bewertung der Unterlage [P 218]; BS/TUC, 05.05.2011
- 4. Bericht: Bewertung der Unterlage [G 216]; BS/TUC, 20.06.2011
- 5. Bericht: Bewertung der Unterlage [P 212]; BS/TUC, 26.09.2011
- 6. Bericht: Konsistenz- und Plausibilitätsprüfung von Einzelunterlagen zum Standsicherheits- und Integritätsnachweis des ERA Morsleben – Unterlagen [P 214]/[P 215]/[P 224]/[P 234]/[P 243]/[P 245]/[P 267]; TUC, 04.05.2012
- 7. Bericht: Plausibilität und Vollständigkeitsprüfung in Bezug auf die Beherrschung von Lösungszutritten für den Zeitraum der Stilllegung; BS, 21.08.2012



- 8. Bericht: Prüfung des Verfüllkonzepts – Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach Durchführung der bGZ [P 220]; BS, 14.10.2013
- 9. Bericht: Prüfung der Abgeschlossenheit der Einlagerungsbereiche Ostfeld und Südfeld; BS, 24.04.2014

Gegenstand des vorliegenden 10. Berichts ist die Prüfung, ob die an das Verfüllmaterial gestellten Anforderungen mit dem vorgesehenen Salzbeton M3 erfüllt werden.

2. AUFGABENSTELLUNG UND BERICHTSAUFBAU

Der Stilllegung des ERAM liegt ein Sicherheitskonzept zugrunde, das im Plan Stilllegung [A 281] in Verbindung mit weiteren Verfahrensunterlagen dargelegt wird. Die Prüfung der geotechnischen Teile des Sicherheitskonzepts beinhaltet die Aspekte

- Standsicherheit und stabiler Endzustand,
- Beherrschung von Lösungszutritten,
- Standsicherheit der Schächte bei Erdbeben,
- Anforderungen aus der Langzeitsicherheitsanalyse (LSA) und
- Verfüllkonzept.

Gemäß Plan Stilllegung, Kapitel 2.6, kommt für die Verfüllung der Grubenbaue, die nicht qualifiziert verfüllt (d. h. abgedichtet) werden sollen, Salzbeton der Rezeptur M3 zum Einsatz. Nähere Angaben zu dieser Salzbetonrezeptur sind in Kapitel 3.1.5 des Plan Stilllegung enthalten.

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die Prüfung, ob der zur Verfüllung der Grubenbaue vorgesehene Salzbeton die an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen erfüllt und die in den Einzelnachweisen zur Standsicherheit und Barrierenintegrität sowie in den LSA unterstellten Eigenschaften aufweist.

Zu diesem Zweck ist zu prüfen,

- ob die Anforderungen an das Verfüllmaterial eindeutig formuliert sind, ob sie begründet sind, ob sie geeignet sind und ob sie vollständig sind,
- ob eine Erst-/Eignungsprüfung für ein Verfüllmaterial vorliegt, diese vollständig dokumentiert ist, die Ergebnisse plausibel sind und die Eignung ausweisen,
- ob im Ergebnis der Erst-/Eignungsprüfung Materialeigenschaften/-parameter identifiziert und quantifiziert werden, auf deren Basis die Konformität des Verfüllmaterials während der Stilllegungsarbeiten überprüft werden kann,
- ob die im Rahmen der Stilllegungsarbeiten erforderlichen Qualitätsmanagement- und Qualitätssicherungsmaßnahmen vollständig, nachvollziehbar und detailliert dargestellt sind und
- ob auf der Basis dieser Angaben für die Stilllegungsphase erwartet werden kann, dass eine ausreichende und nachvollziehbare Nachweisführung und Dokumentation hinsichtlich der Einhaltung der an das Verfüllmaterial gestellten Anforderungen möglich sein wird.

Hinsichtlich der an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen liegt uns die Unterlage ‚Systembeschreibung: Material für die Stilllegung‘ [G 228] vor. In Kapitel 3 des vorliegenden Berichts werden die aus [G 228] zu entnehmenden Anforderungen an das Verfüllmaterial wiedergegeben. Zwecks Überprüfung, ob die in [G 228] angegebenen Anforderungen vollständig sind, werden zudem die aus dem Plan Stilllegung und aus Planunterlagen, die dem Prüfgegenstand „Verfüllmaterial“ thematisch zuzuordnen sind, zu entnehmenden Anforderungen an das Verfüllmaterial dargestellt. Die auf der Basis dieser Unterlagen identifizierten und die aus [G 228] zu entnehmenden Anforderungen werden hinsichtlich ihrer Konsistenz, Bestimmtheit, Vollständigkeit und Begründung bewertet.



In Kapitel 4 wird geprüft, ob diese Anforderungen mit den Annahmen zu den Eigenschaften des Verfüllmaterials übereinstimmen, die im Rahmen von Nachweisführungen zur Standsicherheit, zur Integrität der geologischen Barriere und zur Langzeitsicherheit im Hinblick auf den Strahlenschutz erfolgten.

Anschließend wäre die Vollständigkeit der Eignungsprüfung zum vorgesehenen Verfüllmaterial (Salzbeton M3) zu bewerten. Es liegen uns jedoch weder eine Planunterlage noch ein Konvolut von Prüfunterlagen vor, die einer solchen Eignungsprüfung oder der Dokumentation dieser Eignungsprüfung entsprechen. Hinzu kommt, dass nach unserer Kenntnis vom Antragsteller derzeit diskutiert wird, die gemäß Plan Stilllegung und [P 221] vorgesehene Rezeptur des Salzbeton M3 zu modifizieren. Bislang durchgeführte Untersuchungen könnten damit hinfällig und zu ersetzen sein, sofern nicht die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf den Salzbeton der neuen Rezeptur z. B. durch vergleichende Untersuchungen nachgewiesen wird. In Kapitel 5 werden die uns vorliegenden Angaben zu den Materialparametern und Eigenschaften des Salzbeton M3 zusammengestellt und es werden Hinweise zur Erstellung einer vollständigen Dokumentation der Eignungsprüfung gegeben.

In Kapitel 6 stellen wir dar, welche Angaben zu den im Rahmen der Verfüllmaßnahmen vorgesehenen Qualitätssicherungsmaßnahmen vorliegen.

In Kapitel 7 erfolgt eine Bewertung im Hinblick auf die o. g. Prüfpunkte. Wir kommen dort zu Empfehlungen zum weiteren Vorgehen.

In Kapitel 8 ist das Literaturverzeichnis enthalten.

3. ANFORDERUNGEN AN DAS VERFÜLLMATERIAL

Zur Klärung der Fragestellung, ob der Salzbeton M3 die an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen erfüllt, ist zunächst zu prüfen, ob diese Anforderungen vom Antragsteller eindeutig definiert und begründet werden. Anforderungen an das bei der Stilllegung des ERAM zu verwendende Verfüllmaterial werden in der Unterlage [G 228] formuliert und in Abschnitt 3.1 wiedergegeben. Zwecks Überprüfung, ob die in [G 228] angegebenen Anforderungen vollständig sind und mit den Angaben in anderen zugehörigen Antragsunterlagen übereinstimmen, werden in Abschnitt 3.2 die aus dem Plan Stilllegung und aus Planunterlagen, die dem Prüfgegenstand „Verfüllmaterial“ thematisch zuzuordnen sind, zu entnehmenden Anforderungen an das Verfüllmaterial zusammengestellt. In Abschnitt 3.3 werden die Konsistenz, die Bestimmtheit, die Vollständigkeit und die Begründung der Anforderungen bewertet.

3.1. Anforderungen gemäß [G 228]

In der Unterlage [G 228] werden Anforderungen an die Materialeigenschaften des Pumpversatzes und an dessen Ausgangsstoffe beschrieben. Entsprechend [G 228] leiten sich diese Anforderungen aus den Sicherheitsnachweisen zur Einhaltung der Schutzziele

- Schutz der Biosphäre vor den schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Stoffe,
- Integrität der geologischen Barriere,
- Schutz der Tagesoberfläche,
- Vorsorge gegen schädliche Boden- und Grundwasserverunreinigungen und
- Arbeitsschutz

ab. In Kapitel 2 heißt es diesbezüglich: „Aus der Gesamtheit aller zu führenden Sicherheitsnachweise sowie der technischen Realisierbarkeit der Verfüllung leiten sich [...] Anforderungen an [...] Materialeigenschaften des Verfüllmaterials ab, die im Folgenden spezifiziert werden.“¹.

3.1.1. Ausgangsstoffe des Verfüllmaterials und Dosierung

Gemäß [G 228] soll das Verfüllmaterial zu einem Versatzkörper erstarren.

Gemäß [G 228], Kapitel 2.1, können die Bestandteile des Verfüllmaterials Bindemittel, Zusatzstoffe, Zuschlag (Gesteinskörnung) und Zugabewasser oder Salzlösungen sein. Auf die Verwendung von Zusatzmitteln² sollte nach Möglichkeit verzichtet werden. Sofern Zusatzmittel verwendet werden sollen, müssen sie der DIN EN 934 Teil 2 entsprechen.

¹ Nach unserem Verständnis umfassen die Sicherheitsnachweise auch den Nachweis der technischen Realisierbarkeit, vgl. Kapitel 3.3.1.

² Unter ‚Zusatzmitteln‘ sind nicht die zuvor genannten ‚Zusatzstoffe‘ (wie z. B. Steinkohlenflugasche) zu verstehen, sondern z. B. Fließmittel, Erstarrungsbeschleuniger o. ä., deren Menge einen Massenanteil von 5 % des Zementanteils nicht übersteigt (siehe auch Abschnitt 5.4).

Bezüglich der Ausgangsstoffe bestehen gemäß [G 228] u. a. folgende Vorgaben:

- Bei der Auswahl der Inhaltsstoffe sind Verwendungsverbote und Beschränkungen der Chemikalien-Verbotsverordnung einzuhalten (ChemVerbotsV).
- Der Versatz darf keinen Gefahrstoff im Sinne der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) darstellen (ausgenommen ist der alkalische pH-Wert) und darf weder explosionsgefährlich noch brandgefährlich sein³.
- Hinsichtlich des Arbeitsschutzes muss eine Zulassung des Verfüllmaterials gemäß § 4 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) vorliegen.
- Grundsätzlich sind Betonzusatzstoffe des Typs II (mit puzzolanischen oder latent hydraulischen Eigenschaften) einsetzbar.

Bemerkung: Wir vermuten, dass Betonzusatzstoffe des Typs I erlaubt sein sollen, der Satz also zu lesen ist als „Grundsätzlich sind Betonzusatzstoffe (auch) des Typs II einsetzbar“ und nicht als „Grundsätzlich sind Betonzusatzstoffe (nur) des Typs II einsetzbar“.

Da zudem das Wort „grundsätzlich“ Abweichungen im Einzelfall erlaubt und hier keine Einschränkungen für diese Abweichungen angegeben werden, enthält dieser Satz keine Anforderung.

- Bei nicht den DIN oder europäischen Normen entsprechenden Zusatzstoffen sind die Anforderungen an die Umweltverträglichkeit im Einzelnen nachzuweisen (vgl. Kapitel 3.1.5).
- Der Chloridgehalt stellt kein Ausschlusskriterium dar.
- Der Zuschlag bzw. die Gesteinskörnung muss Salzgrus enthalten.

Bemerkung: Nach unserem Verständnis dieser Anforderung muss der Zuschlag Salzgrus enthalten, darf aber auch aus anderem Material bestehen.

- Als Zugabewasser ist Trinkwasser sowie im Allgemeinen das in der Natur vorkommende Wasser geeignet. Salzlösungen, Grubenwässer sowie Wässer, die beim Reinigen der Misch- oder Förderanlage anfallen, können ebenfalls verwendet werden, sowie sie nicht Bestandteile enthalten, die die Versatzeigenschaften verschlechtern.
- Die Ausgangsstoffe des Verfüllmaterials müssen sich mit einer Genauigkeit von ± 3 % dosieren lassen.

3.1.2. Rheologische Materialeigenschaften

Die Anforderungen an die rheologischen Materialeigenschaften resultieren aus der Einbringtechnologie, die als hydraulischer Transport vorgesehen ist. Es ist „*beispielsweise*“ zu gewährleisten, dass eine Förderung des übertägig konditionierten Materials in die zu verfüllenden Abbaue problemlos

³ Explosionsgefährliche und brandfördernde Stoffe sind Gefahrenstoffe, so dass wir im Folgenden den zweiten Teil dieser Vorgabe nicht mehr gesondert aufführen.

möglich ist und dass das in die Abbaue verstürzte Material zu einem homogen zusammengesetzten Versatzkörper erstarrt.

Gemäß [G 228] ist im Einzelnen nachzuweisen, dass

- das Verfüllmaterial fließfähig ist (Konsistenz der Ausbreitklasse F4 nach DIN EN 206 oder fließfähiger),
- das Verfüllmaterial hydraulisch förderbar ist und
- Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen während des Förderprozesses sowie bei ruhender Suspension auszuschließen sind.

Die Maximalkorngröße D_{\max} des Verfüllmaterials wird auf 20 mm begrenzt.

Um die erforderliche Stützwirkung zu erreichen, ist es gemäß [G 228] erforderlich, dass in ausgewählten Abbauen eine möglichst vollständige Verfüllung und eine ausreichende Firstanbindung der Versatzkörper erfolgt. Dies wird gewährleistet, wenn

- der Fließwinkel des in die Abbaue verstürzten Materials geringer als 4° ist und
- Anlöse- und Umlöseprozesse an den Konturen der Abbaue durch den Verfüllstoff weitgehend vermieden werden.

Darüber hinaus muss das Verfüllmaterial gemäß [G 228] über eine ausreichende Kapazität verfügen, die Menge an Zugabewasser bzw. enthaltener Lösung vollständig chemisch und physikalisch zu binden.

3.1.3. Thermodynamische Materialeigenschaften

Nach der Einbringung des Verfüllmaterials ist eine nicht vernachlässigbare Wärmeentwicklung zu erwarten. Die Anforderungen an die thermodynamischen Materialkennwerte resultieren gemäß [G 228] im Hinblick auf den Nachweis des Schutzes der Tagesoberfläche bzw. des Schutzes der Integrität der geologischen Barriere und damit ebenso auf den Schutz der Biosphäre vor den schädlichen Auswirkungen der radioaktiven Stoffe.

Die adiabatische Temperaturerhöhung, die in Folge der Reaktionsprozesse auftritt, ist gemäß [G 228] für den Versatz bei einem theoretischen Hydratations- bzw. Erhärtungsgrad von 100 % auf 55 K begrenzt. Grundsätzlich sind Bindemittel zu verwenden, die im Sinne der DIN 1164 Teil 10 (August 2004) eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung aufweisen.

Bemerkung: In DIN 1164 Teil 10 (August 2004) sind keine Spezifikationen zur Hydratationswärmeentwicklung enthalten. Wir gehen davon aus, dass hier auf die Festlegungen der DIN EN 197-1 Bezug genommen werden soll. Danach weist ein Zement eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung auf, wenn er innerhalb von 7 Tagen weniger als 270 J/g Wärme freisetzt.

Die Formulierung „grundsätzlich“ erlaubt im Einzelfall Abweichungen. Da hier keine Einschränkungen für diese Abweichungen angegeben werden, ist die Verbindlichkeit dieser Anforderung unklar.

3.1.4. Physikalische Materialeigenschaften

Die Anforderungen an die physikalischen Parameter des verfestigten Versatzes resultieren gemäß [G 228] aus dem Nachweis des Schutzes der Integrität der geologischen Barriere und dem Schutz der Tagesoberfläche hinsichtlich Senkungen, jeweils für den Zustand des trockenen Endlagers.

Um sicherzustellen, dass der Versatz eine ausreichende Steifigkeit hat, hat das unverdichtete Verfüllmaterial nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen bei Raumtemperatur folgende Materialeigenschaften zu erfüllen:

- Die Steifigkeit und die Stützwirkung des Versatzes werden durch den statischen Elastizitäts-Modul bestimmt. Erforderlich ist ein Mittelwert von mindestens 6.000 MPa.

Bemerkung: Es wird nicht angegeben, über welche Gesamtheit der Mittelwert zu bilden ist.

- Das Verfüllmaterial ist mindestens in die Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 bzw. DIN 1045 Teil 1 einzustufen.
- Die Vorgabe einer einaxialen Zugfestigkeit orientiert sich am Materialverhalten von Steinsalz. Es ist ein Mittelwert von mindestens 0,7 MPa zu gewährleisten.

Bemerkung: Es wird nicht angegeben, über welche Gesamtheit der Mittelwert zu bilden ist.

Zusätzlich sind thermodynamisch induzierte Zwangsbeanspruchungen zu begrenzen:

- Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient des Verfüllmaterials darf im Durchschnitt nicht höher als der des Steinsalzes ($4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) sein.

Bemerkung: Es wird nicht angegeben, über welche Gesamtheit der Durchschnitt zu bilden ist.

3.1.5. Anforderungen aus dem Umweltschutz

In [G 228] wird ausgeführt, dass hinsichtlich des wasserrechtlichen Schutzziels sicherzustellen ist, dass schädliche Einwirkungen auf das Grundwasser und den Boden infolge einer Mobilisierung von Schadstoffen aus dem Verfüllmaterial vermieden oder auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

Hierzu werden maximal zulässige Stoffkonzentrationen in „*verfüllmaterialspezifischen Eluaten*“ ermittelt. Entsprechend [G 228], Kapitel 2.6, müssen die Eluate des Verfüllmaterials diese Stoffkonzentrationen einhalten.

Sofern Bindemittel und Zusatzstoffe verwendet werden, die den nationalen oder europäischen Normen entsprechen, sind gemäß [G 228] die relevanten Anforderungen zur Umweltverträglichkeit erfüllt (vgl. Kap. 3.1.1).

Bemerkung: Nach unserem Verständnis bedeutet dies, dass nur dann Eluatuntersuchungen erforderlich sein sollen und den Anforderungen genügen müssen, wenn die Bindemittel und Zusatzstoffe nicht bestimmten nationalen oder europäischen Normen entsprechen. Um welche Normen es sich hierbei handelt, wird nicht angegeben.

Der Chloridgehalt in den Ausgangsstoffen bzw. im Versatz stellt gemäß [G 228] kein Ausschlusskriterium dar.

3.1.6. Anforderungen an die Eignungsprüfung für das Verfüllmaterial

Gemäß [G 228] ist im Rahmen der Eignungsprüfung nachzuweisen, dass sämtliche in den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.5 beschriebenen Anforderungen an den Baustoff erfüllt werden. Es wird angegeben, dass die Bestimmung der Materialeigenschaften auf Normen und Richtlinien aus den Bereichen der Betontechnologie bzw. der Prüfung und Überwachung von Baustoffen basiert.

Anmerkung:

In der Unterlage [P 229] werden diese Normen und Richtlinien konkretisiert zu DIN EN 406 Teil 1, DIN 1045 Teil 2 und DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton. In der derzeit geltenden Fassung dieser Unterlagen wird nicht der Begriff „Eignungsprüfung“ sondern „Erstprüfung“ verwendet. Im Folgenden verwenden wir deshalb den Begriff *Erst-/Eignungsprüfung*.

Als durchzuführende Prüfungen bzw. Einzelnachweise werden aufgeführt:

- Ausbreitmaß in Anlehnung an DIN EN 12350 Teil 5,
- Fließwinkel,
- rheologische Materialparameter (Nachweis der Förderfähigkeit),
- Temperaturverlauf unter adiabatischen Bedingungen bei einer Starttemperatur von 20 °C bis die Temperaturerhöhung in einem Zeitraum von 2 Tagen geringer als 0,5 K ist,
- linearer Wärmeausdehnungskoeffizient,
- einaxiale Druck- und Zugfestigkeit und
- statischer Elastizitätsmodul.

Hinsichtlich der Bestimmung der physikalischen Materialeigenschaften wird angegeben, dass diese in Anlehnung an DIN 1048 Teil 5 und DIN EN 12390 Teil 3 an unverdichteten Probekörpern erfolgt, die 56 Tage bei Raumtemperatur lagerten.

Des Weiteren sind gemäß [G 228] folgende Nachweise und Angaben erforderlich:

- Nachweis, dass das Material sedimentationsstabil ist und dass Entmischungserscheinungen der Versatzkomponenten auszuschließen sind.
- Prüfung, ob sich auf der Oberfläche des frischen Versatzes Überstandslösung bildet. Die Menge der Überstandslösung ist zu quantifizieren. Nachweis, dass das Zugabewasser bzw. die im Frischbeton enthaltene Lösung inkl. der festgestellten Überschusslösung vom Verfüllmaterial vollständig chemisch und physikalisch gebunden werden kann.
- Nachweis durch Untersuchung verfüllmaterialspezifischer Eluate, dass die aus dem Umweltschutz resultierenden Anforderungen aus Kapitel 3.1.5 eingehalten werden.
- Hinsichtlich des Arbeitsschutzes muss für das Verfüllmaterial eine Zulassung gemäß § 4 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) vorliegen.

3.1.7. Zusammenfassung der Anforderungen aus [G 228]

Die in der Unterlage [G 228] angegebenen Anforderungen an das Verfüllmaterial lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (A1) Das Verfüllmaterial soll zu einem Versatzkörper erstarren.**
- (A2) Es sollte möglichst keine Verwendung von Zusatzmitteln erfolgen. Falls doch, dann müssen sie der DIN EN 934 Teil 2 entsprechen.**
- (A3) Bei der Auswahl der Inhaltsstoffe sind Verwendungsverbote und Beschränkungen der Chemikalien-Verbotsverordnung (ChemVerbotsV) einzuhalten.**
- (A4) Das Verfüllmaterial darf mit Ausnahme des alkalischen pH-Werts keinen Gefahrstoff im Sinne der GefStoffV darstellen.**
- (A5) Hinsichtlich des Arbeitsschutzes ist eine Zulassung nach § 4 GesBergV erforderlich.**
- (A6) Grundsätzlich sind Betonzusatzstoffe des Typs II einsetzbar.**
- (A7) Bei Bindemitteln oder Zusatzstoffen, die nicht den DIN oder europäischen Normen entsprechen, ist die Unbedenklichkeit des Verfüllmaterials im Hinblick auf sein Elutionsverhalten nachzuweisen (Ausnahme: Chlorid).**
- (A8) Die Gesteinskörnung („Zuschlag“) muss Salzgrus enthalten.**
- (A9) Als Zugabewasser darf Trinkwasser oder in der Natur vorkommendes Wasser verwendet werden. Salzlösungen, Grubenwasser sowie Reinigungswässern aus der Misch- und Förderanlage dürfen verwendet werden, sofern sie nicht Bestandteile enthalten, die die Versatzeigenschaften verschlechtern.**
- (A10) Die Ausgangsstoffe müssen sich mit einer Genauigkeit von ± 3 % dosieren lassen.**
- (A11) Das Verfüllmaterial muss eine Konsistenz der Ausbreitklasse F4 nach DIN EN 206 oder fließfähiger aufweisen.**
- (A12) Das Verfüllmaterial muss hydraulisch förderbar sein.**
- (A13) Es ist nachzuweisen, dass Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen während des Förderprozesses sowie bei ruhender Suspension auszuschließen sind.**
- (A14) Die Maximalkorngröße ist auf 20 mm begrenzt.**
- (A15) Der Fließwinkel muss beim Versturz in den Grubenbau geringer als 4° sein.**
- (A16) Anlöse- und Umlöseprozesse an den Konturen der Abbaue durch den Versatzstoff müssen weitgehend vermieden werden.**
- (A17) Das Verfüllmaterial muss über eine ausreichende Kapazität verfügen, die Menge an Zugabewasser bzw. enthaltener Lösung vollständig chemisch und physikalisch zu binden.**
- (A18) Die adiabatische Temperaturerhöhung, die in Folge der Reaktionsprozesse auftritt, ist für den Versatz bei einem theoretischen Hydratations- bzw. Erhärungsgrad von 100 % auf 55 K zu begrenzen.**

- (A19) Es sind Bindemittel zu verwenden, die im Sinne der DIN EN 197-1 eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung aufweisen.
- (A20) Der statische Elastizitätsmodul des Versatzes muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) einen Mittelwert von mindestens 6.000 MPa aufweisen.
- (A21) Das Verfüllmaterial muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) mindestens der Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 bzw. DIN 1045 Teil 1 entsprechen.
- (A22) Die einaxiale Zugfestigkeit des Versatzes muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) einen Mittelwert von mindestens 0,7 MPa aufweisen.
- (A23) Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient des Verfüllmaterials darf im Durchschnitt nicht höher als der des Steinsalzes ($4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) sein.

3.2. Anforderungen gemäß Plan Stilllegung und Planunterlagen

3.2.1. Plan Stilllegung [A 281]

Gemäß Plan Stilllegung [A 281], Kapitel 2.6, kommt als Verfüllmaterial Salzbeton der Rezeptur M3 zum Einsatz. Deren Zusammensetzung wird in Kapitel 3.1.5 des Plans angegeben (vgl. Kapitel 3.2.1.3 des vorliegenden Gutachtens).

Der Plan enthält an diversen Stellen weitere Angaben zum Verfüllmaterial bzw. zu den an dieses Material zu stellenden Anforderungen. Diese Angaben werden nachfolgend zusammengestellt.

In den Quellenangaben zum Plan Stilllegung [A 281Q] sind zu diesen Fundstellen zahlreiche Planunterlagen aufgeführt. Weitergehende Angaben zum Verfüllmaterial bzw. zu den an dieses Material gestellten Anforderungen sind dabei den Unterlagen [P 220], [P 229] und [G 188] zu entnehmen. Auf diese Unterlagen wird in den Abschnitten 3.2.2 bis 3.2.4 dieses Berichts eingegangen. Die in [G 228] enthaltenen Anforderungen wurden bereits in Kapitel 3.1 betrachtet.

3.2.1.1. Rolle der Versatzmaßnahmen im Stilllegungskonzept

In Kapitel 2.3 des Plan Stilllegung wird das Stilllegungskonzept erläutert. Es wird angegeben, dass mit den umfangreichen Verfüllmaßnahmen das Ziel verfolgt wird, das die Grubengebäude umgebende Gebirge zu stützen und dadurch seine abdichtende Wirkung (Integrität) gegenüber Deckgebirgslösungen zu erhalten. Da Lösungszutritte über mögliche Schwachstellen im Gebirge nicht vollständig ausgeschlossen werden können, sorgt der hohe Verfüllgrad bei einem solchen Lösungszutritt dafür, dass die insbesondere im Bereich von Kalilagern vorkommenden Auf- und Umlöseprozesse in ihrem Umfang beschränkt werden und dass die Stabilität der Grubengebäude erhalten bleibt. Die Möglichkeit weiterer Zutritte bleibe dann auf ein Minimum beschränkt und es sei sichergestellt, dass es an der Tagesoberfläche nicht zu senkungsbedingten Schäden kommt.

3.2.1.2. Sicherheitstechnische Auslegungsanforderungen an den Versatz

Als zentrale Forderung an die technischen Stilllegungsmaßnahmen wird in Kapitel 2.4 des Plan Stilllegung der Nachweis des sogenannten stabilen Endzustands für das stillgelegte Endlager aufgeführt, der die Standsicherheit der Grubenbaue und den Erhalt der Integrität der Salinargesteine in der Umgebung der Einlagerungsgrubenbaue umfasst.

Zur Gewährleistung der Standsicherheit ergeben sich Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Versatzes:

- *„Zur Gewährleistung der langfristigen Standsicherheit muss der Versatz einen Elastizitätsmodul von mindestens 6.000 MPa und eine einaxiale Zugfestigkeit von 0,7 MPa aufweisen. Er ist mindestens der Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 zuzuordnen. Der zum Einsatz kommende Baustoff erfüllt nachweislich die geforderten Eigenschaften.“*
- *„Durch die hydraulische Einbringtechnik des fließfähigen Materials ist ein ausreichend hoher Verfüllgrad der einzelnen Grubenbaue gewährleistet.“*

Hinsichtlich weiterer Anforderungen zu den Verfüllmaßnahmen wird in Kapitel 2.4 des Plans auf Kapitel 3.1.5 des Plans verwiesen.

3.2.1.3. Verfüllmaßnahmen im Rahmen der Stilllegung

In Kapitel 3.1.5 des Plan Stilllegung wird der für die Verfüllmaßnahmen vorgesehene Baustoff beschrieben. Es ist ein Salzbeton vorgesehen, der aus Bindemittel (Zement), Betonzusatzstoffen (z. B. Gesteinsmehl, Steinkohlenflugasche), Zuschlägen (z. B. Salzgrus, Quarzsand) und einer Anmischflüssigkeit (z. B. Wasser, Salzlösungen) besteht.

Hinsichtlich der Anforderungen an den Salzbeton wird angegeben:

„Die an den Salzbeton gestellten Anforderungen (Festigkeiten, Förderbarkeit) leiten sich aus dem zu erreichenden stabilen Endzustand der verfüllten Grubengebäude und der geplanten hydraulischen Einbringung des Betons ab.“

In Bezug auf die Qualitätssicherung wird angegeben, dass die Ausgangskomponenten sowie die Salzbetonherstellung überwacht werden sollen. Es wird auf die im Rahmen der bGZ gewonnenen Erfahrungen mit dem Baustoff Salzbeton verwiesen.

Im Hinblick auf die Zusammensetzung des Salzbetons wird angegeben:

„Bei den Planungsarbeiten zur Stilllegung des ERAM und der Ableitung von sicherheitsrelevanten Anforderungen wurde der Salzbeton M3 zugrunde gelegt. Er enthält die folgenden Ausgangsstoffe [...]:

- *Zement der Bezeichnung CEM III/B 32,5 - N-LH/HS/NA*
- *Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450*
- *Steinsalzzuschlag (Salzgrus)*
- *Wasser.“*

Die Zusammensetzung wird in Abb. 3.1-12 des Plan Stilllegung mit 54,5 % Salzgrus, 23,0 % Steinkohlenflugasche, 9,9 % Zement sowie 12,6 % Wasser angegeben.

Der Salzbeton soll mit Hilfe einer Förderanlage und Rohrleitungen direkt oder über Verfüllbohrungen in die Hohlräume unter Tage gepumpt werden. Es wird angegeben, dass sich bei den Verfüllarbeiten im Rahmen der bGZ gezeigt hat, dass der Salzbeton so fließfähig ist, dass sich nahezu horizontale Lagen ausbilden, bevor er abbindet.

Es wird ausgeführt, dass unter Berücksichtigung der prognostizierten geologischen Langzeitentwicklung, der zu gewährleistenden Standsicherheit der Grubengebäude und der damit verbundenen erforderlichen Minimierung des Umlösevermögens sowie der Langzeitsicherheitsanalysen Anforderungen an das Verfüllmaterial sowie die Verfüllmaßnahmen abgeleitet wurden.

3.2.1.4. Standsicherheit des Grubengebäudes während des Stilllegungsbetriebes

Gemäß Kapitel 5.1 des Plan Stilllegung ergeben sich während der Stilllegung unterschiedliche Bauzustände, denen alle thermomechanischen Beanspruchungszustände im Versatz und Gebirge zugeordnet werden, die sich während der Verfüllphase unter dem Einfluss des abbindenden Baustoffs und der damit verbundenen Temperaturentwicklung einstellen.

Für die Sicherheit des Stilllegungsbetriebes ist es gemäß Plan Stilllegung von Bedeutung, dass für diese Bauzustände

- die Standsicherheit der gesamten Grubengebäude nachgewiesen wird und
- der Arbeitsschutz in den betrieblich genutzten Grubenbauen gewährleistet ist.

Die numerischen Standsicherheitsberechnungen berücksichtigen die Bereiche der Grubengebäude mit dem höchsten Durchbaugrad und mit dem größten Wärmeeintrag durch abbindenden Baustoff.

Die Reihenfolge der Verfüllmaßnahmen wird in den rechnerischen Nachweisen berücksichtigt. Ausgehend vom Spannungs- und Verformungszustand des Gebirges vor Beginn der Stilllegungsmaßnahmen wird der Ablauf der Verfüllmaßnahmen unter Berücksichtigung der Eigenschaften der Verfüllmaterialien rechnerisch simuliert.

3.2.1.5. Verfüll-/Versatzmaßnahmen im Zusammenhang mit der Langzeitsicherheit

In Kapitel 5.4.1 des Plan Stilllegung sind in Bezug auf das Verfüllmaterial bzw. auf die an dieses zu stellenden Anforderungen folgende Aussagen enthalten:

„Auf der Basis von Experimenten und Modellrechnungen wurden die Eigenschaften der Versatzmaterialien untersucht. Es wird gezeigt, dass die Anforderungen zuverlässig eingehalten werden können. Mittels betriebsbegleitender Qualitätssicherungsmaßnahmen werden die Einhaltung der Anforderungen an die Materialien und die Bauausführung überwacht.“

„Der Versatz dient der Erhaltung der langfristigen Standsicherheit und Integrität des Salzgebirges um die Einlagerungsbereiche West-Südfeld und Ostfeld, der Begrenzung von Senkungen an der Tagesoberfläche, der Behinderung des Transports von Schadstoffen sowie der Begrenzung von Auf- und Umlösungen potenziell zutretender Lösungen am Salzgestein. Der Versatz ist gegenüber chemischen Angriffen durch die Lösungen über lange Zeiten stabil.“

Mit geomechanischen Modellrechnungen wurden unter Berücksichtigung der Hohlraumgeometrie der Grubenbaue und der ortsabhängigen Eigenschaften des Gebirges die

konkreten Anforderungen an den Versatz abgeleitet. Anforderungen an den Versatz wurden für den Verfüllgrad einzelner Grubenbaue, die Druckfestigkeit und die Steifigkeit formuliert. Die zeitliche Änderung der Kennwerte von Gebirge und Versatz wurde in den Modellrechnungen berücksichtigt. Zugelassene Toleranzen in der Bauausführung und Bandbreiten der Materialeigenschaften sowie der geologischen und geotechnischen Daten und Kennwerte wurde ebenfalls einbezogen.

Die den Modellrechnungen zugrunde liegenden Eigenschaften des Versatzmaterials wurden durch Laborversuche bestimmt. [...] Es wurde gezeigt, dass die bei der Wechselwirkung mit dem Gebirge auftretenden mechanischen Belastungen nicht zu unzulässigen Beanspruchungen des Versatzes führen.“

3.2.1.6. Berücksichtigung des Verfüllmaterials bei den Konsequenzanalysen

In Kapitel 5.4.3 des Plan Stilllegung wird ausgeführt, dass die Parameter des Modellansatzes zur Beschreibung der Konvergenz aus geomechanischen Modellrechnungen abgeleitet wurde.

„Hierbei werden die Verformung des umgebenden Salzgebirges und die sich ergebende Verringerung des Volumens der Grubenbaue in Abhängigkeit von der Zeit, der Stützwirkung des Versatzes und des Fluiddrucks ermittelt. Die verwendeten Werte der Stoffparameter wurden durch Laboruntersuchungen mit standortspezifischen Materialproben durchgeführt.“

Auch in Bezug auf den Transport kontaminierter Lösung durch die Restgrube werden die Eigenschaften des Verfüllmaterials erwähnt:

„Der Transport der kontaminierten Lösung durch die Restgrube benötigt einige Zeit und wird durch sorptionsfähige Bestandteile im Versatz noch zusätzlich verzögert. Da die realen Verhältnisse in den Gruben jedoch schwer modelltechnisch abzubilden und zudem zum Teil nur grob bekannt sind, wird als ungünstigste Annahme in den Konsequenzanalysen von einem raschen Transport ausgegangen und die Sorption am Versatzmaterial vernachlässigt.“

3.2.1.7. Anforderungen an das Verfüllmaterial aus dem Plan Stilllegung [A 281]

Gemäß Kapitel 2.6 des Plan Stilllegung [A 281] kommt als Verfüllmaterial Salzbeton der Rezeptur M3 (definiert in Kapitel 3.1.5 des Plans) zum Einsatz. Der eingesetzte Salzbeton muss

- **fließ- und pumpfähig sein,**
- **einen geringen Fließwinkel aufweisen und**
- **einen mit der Standsicherheit des Grubengebäudes verträglichen Wärmeeintrag durch den abbindenden Baustoff zur Folge haben.**

Nach der Erhärtung muss er

- **eine ausreichende Stützwirkung entfalten,**
- **einen Elastizitätsmodul von mindestens 6.000 MPa aufweisen,**
- **einaxiale Zugfestigkeit von 0,7 MPa aufweisen und**

- **mindestens der Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 entsprechen.**

In Kapitel 5.4.1 des Plans wird zur Langzeitsicherheit des ERAM angegeben, dass der Salzbeton gegenüber chemischen Angriffen durch Lösungen über lange Zeiten stabil sei. Hieraus wird jedoch in [A 281] keine Anforderung an das Material abgeleitet. Hierauf gehen wir in Kapitel 4 ein.

3.2.2. Verfüllplan [P 220]

Gemäß [P 220], Kapitel 1, besteht das wichtigste Merkmal des Stilllegungskonzepts in der weitgehenden Verfüllung der bestehenden Hohlräume des gesamten Grubengebäudes mit einem fließfähigen Salzbeton.

In [P 220], Kapitel 9.1, wird ausgeführt, dass der Salzbetonversatz als pumpfähige Mischung angeliefert und in die zu verfüllenden Grubenbaue gepumpt wird. Gemäß [P 220], Kapitel 9.4, ist die Rezeptur des Salzbetons auf die erforderlichen Eigenschaften als Verfüllmaterial und insbesondere auf die rheologischen Eigenschaften hinsichtlich der Pumpbarkeit und Förderbarkeit über weite Strecken ausgelegt.

In den Grubenbauen breitet sich das Material gemäß [P 220], Kapitel 9.1, unter kleinem Fließwinkel aus und erhärtet zu einem Versatzkörper.

Damit ergeben sich aus dem Verfüllplan [P 220] folgende Anforderungen an den Salzbetonversatz:

- **Fließ- und Pumpfähigkeit über weite Strecken;**
- **kleiner Fließwinkel;**
- **Aushärtung zu einem Versatzkörper.**

3.2.3. Überwachungskonzept Salzbeton [P 229]

In [P 229] werden der Salzbeton charakterisiert und die qualitätssichernden Maßnahmen konzeptionell dargestellt. Das Überwachungskonzept setzt voraus, dass für den Salzbeton im Rahmen der Eignungsprüfung die grundsätzliche Eignung als Verfüllmaterial nachgewiesen wurde und eine Zulassung gemäß § 4 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) vorliegt.

Da sich diese Unterlage i. W. auf die Überwachung und Qualitätssicherung der Verfüllarbeiten bezieht, werden die Inhalte von [P 229] i. W. in Kapitel 6.4 dieses Gutachtens dargestellt. Nachfolgend werden lediglich die Anforderungen an das Verfüllmaterial wiedergegeben, die [P 229] zu entnehmen sind.

Kapitel 2 der Unterlage [P 229] ist hinsichtlich der Bestandteile des Salzbetons zu entnehmen:

- Der Salzbeton enthält Zement, der im Sinne der DIN 1164 Teil 10 eine niedrige Hydrationswärme aufweist. Weiterhin enthält der Salzbeton latent hydraulische bzw. puzzolanische und/oder inerte Betonzusatzstoffe. Der Zement sowie die latent hydraulischen bzw. puzzolanischen Zusatzstoffe werden in [P 229] als Bindemittel (B) zusammengefasst.
- Als Zuschlag (Gesteinskörnung) wird Steinsalz mit einem Größtkorn von bis zu 20 mm verwendet.

- Als Anmischflüssigkeit ist Leitungs- bzw. Trinkwasser sowie das im Allgemeinen in der Natur vorkommende Wasser geeignet. Zusätzlich kann geeignete Salzlösung und Spül- bzw. Reinigungswasser aus der Reinigung der Mischanlage und der hydraulischen Förderanlage verwendet werden.
- Auf die Verwendung von Zusatzmitteln⁴ ist gemäß [P 229] nach Möglichkeit zu verzichten. Sofern Zusatzmittel erforderlich sein sollten, müssen diese die Anforderungen der DIN EN 934 Teil 2 erfüllen.

Zur Salzbetonherstellung wird angegeben:

- Das Dosieren der Ausgangsstoffe und das Anmischen der Suspension erfolgen über Tage in einer Mischanlage.
- Für die Dosierung ist das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel (W/B-Wert) relevant. Bei der Festlegung des W/B-Wertes und bei den Schwankungsbreiten der Anteile der Baustoffkomponenten werden die Einflüsse auf das Misch- und Förderverhalten der Suspension sowie auf die Eigenschaften des Festbetons berücksichtigt.
- Die Suspension wird mittels Dickstoffpumpen durch Rohrleitungen in die zu verfüllenden Grubenbaue verpumpt.

Der Unterlage [P 229] sind somit folgende Anforderungen an den Salzbeton zu entnehmen:

- **Es ist eine Zulassung nach § 4 GesBergV erforderlich.**
- **Es ist Zement zu verwenden, der im Sinne der DIN 1164 Teil 10 eine niedrige Hydrationswärmeentwicklung aufweist.**
- **Der Zuschlag besteht aus Steinsalz.**
- **Die Maximalkorngröße ist auf 20 mm begrenzt.**
- **Die Anmischflüssigkeit darf aus Trinkwasser, in der Natur vorkommendem Wasser, geeigneter Salzlösung sowie Reinigungswässern aus der Misch- und Förderanlage bestehen. Die Brauchbarkeit von Spül- und Reinigungswässern aus der Misch- und Förderanlage und von Salzlösungen ist vor der Verwendung zu überprüfen.**
- **Es sollte möglichst keine Verwendung von Zusatzmitteln erfolgen. Falls doch, dann müssen sie der DIN EN 934 Teil 2 entsprechen.**
- **Die Suspension muss pumpfähig sein.**

⁴ Unter ‚Zusatzmitteln‘ sind nicht die im ersten Spiegelpunkt genannten Betonzusatzstoffe zu verstehen, sondern z. B. Fließmittel, Erstarrungsbeschleuniger o. ä., deren Menge einen Massenanteil von 5 % des Zementanteils nicht übersteigt.

3.2.4. Überwachungs- und Beweissicherungsprogramm zu den Bauzuständen für die Stilllegung des ERAM [G 188]

In der Unterlage [G 188] werden Anforderungen an die Gewährleistung der Standsicherheit betrieblich genutzter Grubenbaue angegeben. Als im Hinblick auf das Verfüllmaterial wesentliche Randbedingungen und Merkmale werden genannt:

- die Materialeigenschaften des Versatzes und
- die mittlere Einbringtemperatur des Versatzes.

Während hinsichtlich der Materialeigenschaften auf die Unterlage [G 228] verwiesen wird, wird zum zweiten Punkt ausgeführt:

„Für alle Grubenbaue ist die durch das Versatzmaterial eingebrachte Wärmemenge von Bedeutung. Diese hängt neben der Hydratationswärme des Baustoffs [...] von seiner Einbringtemperatur ab. Die Überwachung der Versatztemperatur während des Einbringens ist vorgesehen.“

Angaben zur zulässigen Einbringtemperatur des Verfüllmaterials sind in [G 188] nicht enthalten.

Somit ergeben sich aus der Unterlage [G 188] keine zusätzlichen Anforderungen.

3.3. Bewertung

3.3.1. Vorbemerkung

3.3.1.1. Ableitung von Anforderungen an Komponenten der Stilllegung

Der in [G 228] angegebene Grundsatz, wonach sich die Anforderungen an die Stilllegung (hier konkret die Materialeigenschaften des zur Hohlraumverfüllung vorgesehenen Salzbetons) aus der Gesamtheit aller zu führenden Sicherheitsnachweise sowie der technischen Realisierbarkeit ableiten, ist sachgerecht und stellt u. E. die einzige Möglichkeit zur systematischen Ableitung und Begründung der Anforderungen, die an die Stilllegung (bzw. hier die Verfüllung) zu stellen sind, dar. Der Grundsatz ist im Einklang mit den Vorgaben in [BMU 10] für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle.⁵ Auf verschiedenen Fachgesprächen wurde dieser Grundsatz jedoch vom BfS angezweifelt. Im Folgenden begründen wir, weshalb wir den Grundsatz für richtig und alternativlos ansehen.

Das Verhalten des stillgelegten ERAM und seine Auswirkungen auf die Umgebung werden durch die Eigenschaften des Endlagers und seiner Umgebung zum Zeitpunkt der Stilllegung sowie durch die dort nach der Stilllegung ablaufenden Prozesse und Ereignisse bestimmt. Aufgrund der vorgesehenen wartungsfreien Stilllegung können künftig ablaufende Prozesse und Ereignisse dann nicht mehr beeinflusst werden. Die einzige Möglichkeit, auf das Langzeitverhalten des ERAM Einfluss zu nehmen und seine Langzeitsicherheit nach Möglichkeit zu gewährleisten, ist deshalb, das ERAM in einen geeigneten Zustand zu überführen.

⁵ „Für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers [...] sind deterministische Rechnungen [...] durchzuführen. Zielsetzung dieser Rechnungen sind [...] Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems [...].“ ([BMU 10] Kapitel 7.3)

Da die geologischen Bedingungen im Umfeld der Grube nicht beeinflussbar sind, beschränken sich die technischen Möglichkeiten im Rahmen der Stilllegung auf die Veränderung des Zustands der Grube. Dies kann durch das Entfernen von Stoffen (z. B. die Beseitigung einer Auflockerungszone oder die Herstellung von Bohrungen) und durch das Einbringen von Stoffen (z. B. Versatzmaterialien, aber auch komplexerer Strukturen) erfolgen. Die Stoffe bzw. Strukturen nach ihrem Einbau bezeichnen wir im Folgenden zusammenfassend als Komponenten⁶. Für den Zustand der (stillgelegten) Grube von Bedeutung sind

- die räumliche Anordnung (d. h. Ort und Menge) der eingebauten Komponenten bzw. der entfernten Stoffe,
- die Eigenschaften der eingebauten Komponenten und
- die Art bzw. die Umstände des Einbaus bzw. des Entfernens (dies kann einen Einfluss auf die Eigenschaften der Komponenten und des umgebenden Gebirges haben).

Bei der Stilllegung, d. h. bei der Überführung des ERAM in den vorgesehenen Verwahrungszustand, sind im Hinblick auf die Sicherheit die folgenden Bedingungen zu erfüllen⁷:

- Nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik ist mit einem ausreichenden Maß an Gewissheit zu erwarten, dass ausgehend von dem mit der Stilllegung angestrebten Zustand die gesetzlichen Anforderungen an die Langzeitsicherheit des ERAM erfüllt werden⁸.
- Während der Umstellung des ERAM auf diesen Zustand müssen die gesetzlichen Anforderungen an den Betrieb eingehalten werden.
- Die Stilllegung genügt den bestehenden Optimierungs- und Minimierungsgeboten⁹.

Die Genehmigung der Stilllegung erfolgt auf der Basis eines Plans (Plan Stilllegung). Damit die Genehmigungsfähigkeit festgestellt werden kann, muss der Plan die folgenden Inhalte aufweisen:

- Darstellung des angestrebten Verwahrungszustands des Endlagers.
- Darstellung der Vorgehensweise zur Herstellung dieses Verwahrungszustands.
- Nachweis¹⁰, dass der angestrebte Verwahrungszustand und seine Herstellung den bestehenden Optimierungs- und Minimierungsgeboten genügt (Nachweis der Optimierung).
- Nachweis, dass der angestrebte Verwahrungszustand langzeitsicher ist^{8,11}.

⁶ Der abgebundene Versatzkörper in einem Abbau ist danach eine Komponente.

⁷ Unter Sicherheit fassen wir den Schutz von Mensch, Wasser und Sachgütern vor ungewollten Beeinträchtigungen. Andere gesetzliche Anforderungen, wie Denkmalschutz oder Naturschutz, sind ebenfalls zu berücksichtigen. Dies ist jedoch nicht Gegenstand dieses Gutachtens.

⁸ Dies schließt Analysen zu Wahrscheinlichkeit und Konsequenzen von Abweichungen vom angestrebten Verwahrungszustand ein.

⁹ Die Optimierungs- und Minimierungsgebote können als Teil der Sicherheitsanforderungen verstanden werden. Da die Optimierung jedoch schutzgutübergreifend ist und sowohl den Zeitraum der Stilllegung als auch den Zeitraum nach Abschluss der Stilllegung umfasst, haben wir sie hier separat aufgeführt.

¹⁰ Hier und im Folgenden verwenden wir das Wort Nachweis, weisen aber darauf hin, dass es sich hierbei häufig um eine (möglichst gute) Begründung handelt und nicht um einen zwingenden Beweis.

- Nachweis, dass der angestrebte Verwahrungszustand hergestellt werden kann („Nachweis der Herstellbarkeit“)¹².
- Nachweis, dass während der Herstellung (d. h. im Stilllegungsbetrieb) die gesetzlichen Sicherheitsanforderungen eingehalten werden.

Die beiden Darstellungen (erster und zweiter Spiegelpunkt) bilden den Antragsgegenstand.

Die Darstellung der Vorgehensweise zur Herstellung des angestrebten Verwahrungszustands ist zugleich auch Teil des Nachweises der Herstellbarkeit.

Die Angaben in den Darstellungen müssen mit den Annahmen in den Nachweisen konsistent sein.

Die Angaben in den Darstellungen müssen so detailliert sein, dass alle sicherheitsrelevanten Sachverhalte, von denen in den Nachweisen explizit oder implizit Kredit genommen wird, festgelegt sind. Sie entsprechen der Genehmigungsplanung nach HOAI.

Aufgrund der Komplexität des Endlagersystems (sowohl hinsichtlich seines Aufbaus als auch hinsichtlich der möglichen Einflussgrößen) sind die Nachweise ebenfalls komplex und müssen in verschiedene Teilnachweise aufgegliedert werden. Innerhalb eines Teilnachweises wird die Gültigkeit einer Annahme (oder Aussage) gezeigt, wobei dies häufig unter dem Vorbehalt einer (oder mehrerer) anderen Annahme(n) erfolgt. Beispielsweise wird in den gegenwärtig vorliegenden Antragsunterlagen der Nachweis zur Einhaltung der Dosiskriterien unter der Annahme geführt, dass im ERAM an verschiedenen Stellen hydraulische Abdichtungsbauteile mit gewissen Systemeigenschaften errichtet werden¹³. Der Nachweis dieser Systemeigenschaften erfolgt unter einer Reihe von Annahmen, u. a. der Annahme einer rissarmen Herstellung. Der Nachweis der rissarmen Herstellung beruht wiederum (u. a.) auf einer Reihe von Annahmen zum Verhalten des eingebrachten Materials. Der Nachweis, dass das eingebrachte Material dieses Verhalten aufweisen wird, beruht auf entsprechenden Erst-/Eignungsprüfungen zu Ausgangsstoffen und Einbautechnik in Verbindung mit der Vorgabe eines Qualitätsmanagementprogramms.

Die Nachweisführung ist nur dann vollständig, wenn jede der Annahmen zutreffend bzw. gut begründet ist. Bei Annahmen zu Sachverhalten, die durch Maßnahmen kontrolliert beeinflussbar sind, kann die entsprechende Annahme als Anforderung formuliert werden. Die kontrollierbare Einflussgröße muss dann dieser Anforderung entsprechen.

¹¹ Anforderungen an die Langzeitsicherheit des ERAM ergeben sich aus den Rechtsgebieten Atomrecht, Wasserrecht und Bergrecht. Der Nachweis der Langzeitsicherheit des für das ERAM angestrebten Verwahrungszustands weist deshalb die folgenden wesentlichen Elemente auf:

- Nachweis („Langzeitaussage“ [BMU 10]) zur Integrität der geologischen Barriere,
- Nachweis („Langzeitaussage“ [BMU 10]) hinsichtlich der Einhaltung der Dosiskriterien aus [SSK 10],
- Nachweis hinsichtlich des Schutzes des Grund- und Oberflächenwassers und
- Nachweis des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen sowie des Schutzes von Bodenschätzen und Bergwerken.

¹² Dies schließt den Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Robustheit („Nachweis der Robustheit technischer Komponenten“ [BMU 10]) ein. Ein reiner „Nachweis der Handhabbarkeit“ ist nicht ausreichend.

¹³ An dieser Stelle ist es unerheblich, ob die unterstellten Eigenschaften als gut prognostizierbar (beschrieben durch einen festen Wert) oder weniger gut prognostizierbar (beschrieben durch eine Bandbreite oder eine Verteilung für den Grad der Erwartung des Eintretens eines Wertes) angenommen werden. In beiden Fällen muss die Annahme wenn möglich nachgewiesen (bzw. gut begründet) werden.

Die Nachweisführung ist dann vollständig, wenn zu jeder Annahme im jeweils letzten Zweig des Nachweisbaums

- entweder gezeigt wird, dass sie einen kontrolliert beeinflussbaren Sachverhalt betrifft, und dieser Sachverhalt als Anforderung festgeschrieben wird,
- oder gezeigt wird, dass die Annahme keinen Einfluss auf die Sicherheit hat,
- oder gezeigt wird, dass die Annahme bei Einhaltung der geforderten (übrigen) Annahmen stets erfüllt ist.

Hinsichtlich des Einbaus von Stoffen bzw. Komponenten können solche Annahmen

- die Eigenschaften der Komponenten (in den Nachweisen der Langzeitsicherheit des angestrebten Verwahrungszustands¹⁴),
- die räumliche Anordnung der Komponenten (in den Nachweisen der Langzeitsicherheit des angestrebten Verwahrungszustands) und
- charakteristische Eigenschaften der Baustoffe (Ausgangsstoffe und hieraus hergestellte Stoffe) und Technologien (in den Nachweisen der Herstellbarkeit, der Sicherheit während der Herstellung und der Optimierung)

betreffen.

In manchen Fällen lassen sich die Eigenschaften oder/und die Anordnung der Komponenten durch Messungen während oder/und nach ihrer Herstellung zuverlässig kontrollieren. In diesen Fällen kann ein Teil des Nachweises der Herstellbarkeit als Anforderung an die Komponente formuliert werden, deren Einhaltung dann durch Kontrollen während der Durchführung der Stilllegungsarbeiten zu zeigen ist. Für diese Art der Nachweisführung ist es erforderlich, dass im Bedarfsfall geeignete Korrekturmaßnahmen ergriffen werden können und werden. Die Wirksamkeit und Eignung des Kontroll- und Korrektursystems sind bei dieser Vorgehensweise ebenfalls Teil des Sicherheitsnachweises.

Manche Eigenschaften der Komponenten lassen sich durch die Auswahl der einzubauenden Stoffe und die Art des Einbaus zuverlässig steuern. In diesen Fällen kann ein Teil des Nachweises der Herstellbarkeit als Anforderung an die Auswahl der einzubauenden Stoffe und an die Art des Einbaus formuliert werden. Als weitere Elemente des Nachweises der Herstellbarkeit sind dann zu zeigen,

- dass eine solche Steuerung zuverlässig möglich ist,
- dass geeignete Stoffe für den Einbau zur Verfügung stehen (Erst-/Eignungsprüfung) und
- dass die Einhaltung der Anforderungen an die Stoffe und die Art des Einbaus gewährleistet werden können (Qualitätsmanagementplan).

¹⁴ In Einzelfällen können sich auch aus der Sicherheit während der Herstellung Anforderung an eine Komponente ergeben.

Wir kommen zu folgenden Feststellungen:

- **Jede für die Genehmigungsfähigkeit der Stilllegung des ERAM relevante Anforderung an**
 - **die Eigenschaften der bei der Stilllegung verwendeten Stoffe,**
 - **die Durchführung des Einbaus dieser Stoffe,**
 - **die Eigenschaften der eingebauten Stoffe und**
 - **die Eigenschaften der eingebauten Komponenten**

leitet sich aus dem Nachweis der Optimierung, dem Nachweis der Langzeitsicherheit des angestrebten Verwahrungszustands, dem Nachweis der Herstellbarkeit oder dem Sicherheitsnachweis für den Stilllegungsbetrieb ab¹⁵.

- **Ob für eine Komponente, einen Stoff oder die Durchführung des Einbaus genehmigungsrelevante Anforderungen bestehen, hängt von der konkreten Realisierung der verschiedenen Nachweise ab.**
- **Jede dieser Anforderungen muss Teil der Darstellung des angestrebten Verwahrungszustands des Endlagers oder/und der Vorgehensweise zur Herstellung dieses Verwahrungszustands sein.**

Anmerkungen:

- Die Festlegung von Anforderungen an eine Komponente erfolgt zweckmäßigerweise iterativ. Nach Auswahl der Komponente (im Ergebnis von Machbarkeits- und Optimierungsuntersuchungen) werden deren erwartete bzw. sicher gewährleistete Eigenschaften bestimmt. Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse wird untersucht, ob die Sicherheit von diesen Eigenschaften abhängt und ob die Einhaltung der bestehenden Sicherheitskriterien mit den erwarteten bzw. gewährleisteten Eigenschaften nachgewiesen werden kann. Für Eigenschaften, von denen die Sicherheit nicht abhängt, brauchen keine Anforderungen gestellt werden. Ist eine Eigenschaft sicherheitsrelevant und kann die Sicherheit mit der angenommenen Eigenschaft nachgewiesen werden, kann die Eigenschaft als Anforderung festgelegt werden. Kann die Sicherheit zunächst nicht nachgewiesen werden, bestehen zwei Möglichkeiten: Entweder werden die Komponente so verändert, dass mit ihren veränderten Eigenschaften der Sicherheitsnachweis geführt werden kann, oder die Sicherheitsanalyse wird überarbeitet (z. B. weil man zunächst aus Gründen der Ökonomie vereinfachende aber konservative Annahmen getroffen hat).

Unabhängig davon, aufgrund welcher Überlegungen und im Ergebnis welcher Entwicklungsschritte die Anforderungen an eine Komponente abgeleitet wurden, müssen bei Vorliegen der endgültigen Sicherheitsnachweise die Annahmen in den Sicherheitsnachweisen mit den entsprechenden Anforderungen an die jeweilige Komponente konsistent sein.

- Nicht für jede Eigenschaft einer Komponente oder eines Stoffs, die bzw. der im Rahmen der Sicherheitsanalysen parametrisiert wurde, müssen Anforderungen formuliert werden. Allerdings ist dann (bei Langzeitsicherheitsnachweisen im Rahmen der Sicherheitsanalyse) darzulegen,

¹⁵ Auch die Anforderungen aus dem technischen Regelwerk dienen der Gewährleistung der Sicherheit. Ihre Einhaltung ist implizit Teil eines Sicherheitsnachweises.

dass diese Eigenschaft keinen signifikanten Einfluss auf die Sicherheit hat oder dass die Eigenschaft bei Einhaltung der geforderten (übrigen) Eigenschaften stets erfüllt ist.

- Erst bei Vorliegen der vollständigen Sicherheitsnachweise lassen sich systematisch alle genehmigungsrelevanten Anforderungen an eine Komponente, einen Stoff oder eine Einbautechnologie ableiten.
- (Zusätzliche) Anforderungen, die sich nicht aus einem Sicherheitsnachweis ergeben, sind für die Genehmigung der Stilllegung nicht von Relevanz. Sie dürfen jedoch die Erfüllung der genehmigungsrelevanten Anforderungen nicht beeinträchtigen.

3.3.1.2. Darstellung der Verfüllung

Die Darstellungen beschreiben den Antragsgegenstand. Die Teile der Darstellungen, die die Verfüllung der Grubenbaue mit Salzbeton betreffen, müssen die folgenden Elemente umfassen:

Darstellung des angestrebten Verwahrungszustands des Endlagers

- Im **Verfüllplan** ist festzulegen, welche Grubenbaue in welchem Umfang mit Salzbeton (bei verschiedenen Arten von Salzbeton mit welcher Art von Salzbeton) verfüllt werden sollen. Er ist nicht Teil eines Nachweises, muss jedoch konsistent mit den Annahmen in den Sicherheitsanalysen sein¹⁶.
- In den **Anforderungen an das Verfüllmaterial** ist festzulegen, welche In-situ-Eigenschaften der (in die Grubenbaue eingebrachte) Salzbeton aufweisen soll.

Bemerkung:

Wir empfehlen, dass in der Unterlage zu den Anforderungen an das Verfüllmaterial diese Anforderungen erläutert werden. Hierzu sollte zu jeder Anforderung explizit auf den entsprechenden Nachweis verwiesen werden, aus dem sich die Anforderung ergibt.

Darstellung der Vorgehensweise zur Herstellung des angestrebten Verwahrungszustands

- In den **Anforderungen an die Baustoffe und die Verfülltechnologie** ist festzulegen, welche Anforderungen an die Baustoffe (Ausgangsstoffe und hieraus hergestellte Stoffe) und die Technologien zur Herstellung, Transport und Einbau der Baustoffe bestehen.

Bemerkung:

Wir empfehlen, dass in der Unterlage zu den Anforderungen an die Baustoffe und die Verfülltechnologie diese Anforderungen erläutert werden. Hierzu sollte zu jeder Anforderung explizit auf den entsprechenden Nachweis verwiesen werden, aus dem sich die Anforderung ergibt.

- In der **Planung der Verfüllmaßnahmen** ist anzugeben, wie die im Verfüllplan festgelegte Verfüllung technologisch erfolgen soll. Hinsichtlich der Verfüllung mit Salzbeton enthält sie die Angaben,

¹⁶ Die (mittlerweile zurückgezogene) Unterlage [P 220] „Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM [...]“ enthält Inhalte der hier definierten Elemente *Verfüllplan* und *Planung der Verfüllmaßnahmen*.

- wie der Salzbeton zu den einzelnen Grubenbauen transportiert werden soll,
- wie er in die einzelnen Grubenbaue eingebaut werden soll,
- welche technischen Maßnahmen ergriffen werden, um den angestrebten Verfüllgrad auch tatsächlich zu erreichen, und
- ob – und wenn ja, welche – technische Maßnahmen darüber hinaus ergriffen werden, damit der Salzbeton nach seinem Einbau die geforderten Eigenschaften aufweist.

Diese Planung ist ebenfalls Antragsgegenstand, sie ist aber auch Teil des Nachweises der Herstellbarkeit. Die Angaben müssen deshalb so detailliert sein, dass sie den Nachweis der Herstellbarkeit ermöglichen.

Um den im Verfüllplan festgelegten Verfüllgrad eines Grubenbaus sicherzustellen, muss der Verfüllgrad während der Verfüllung überwacht werden. Bei nicht ausreichender Verfüllung sind Korrekturmaßnahmen durchzuführen. Bei niedrigen Verfüllgraden, deren genauer Wert für die Standsicherheit und Integrität des ERAM nicht von Bedeutung ist, kann die Überwachung des Verfüllgrads über die Überwachung der eingebrachten Salzbetonmenge erfolgen. Eine konkrete Planung zusätzlicher Korrekturmaßnahmen ist i. d. R. nicht erforderlich, da über die reguläre Zufuhr eine ausreichende Materialmenge in den Grubenbau eingebracht werden kann. In Fällen, in denen eine praktisch vollständige und sofort stützende Verfüllung erreicht werden soll, kann die Sicherung des Verfüllgrads z. B. in der Sicherung der Entlüftung der Kammer, der Überwachung des Verfüllstands des Salzbetons an einer oder mehrerer Stellen im Grubenbau und der Möglichkeit zum nachträglichen Verfüllen nicht ausreichend verfüllter Bereiche über zusätzliche Bohrungen bestehen. In einem solchen Fall müssen diese Maßnahmen Gegenstand der Genehmigungsplanung sein.

Sofern sich aus dem Nachweis der Optimierung oder dem Nachweis der Langzeitsicherheit des angestrebten Verwahrungszustands bzgl. eines Sachverhalts (z. B. dem Verfüllgrad eines Grubenbaus) keine Anforderung nach einem konkreten Zustand ergibt, sondern lediglich gewisse Randbedingungen vorgegeben werden, die von einer Reihe von Zuständen erfüllt werden, brauchen im Verfüllplan und der Planung der Verfüllmaßnahmen auch nur diese Randbedingungen festgeschrieben werden.

Wenn sich bspw. aus dem Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere die Anforderung ergibt, einen bestimmten Abbau zu mindestens 95 % zu verfüllen, dann ist dieser Verfüllgrad und seine Herstellung im Verfüllplan bzw. in der Planung der Verfüllmaßnahmen darzustellen. Ergibt sich dagegen nur die Anforderung, die Abbaue in einem Teil der Grube im Mittel zu einem gewissen Prozentsatz zu verfüllen, dann braucht auch nur diese Anforderung im Verfüllplan fixiert bzw. ihre Umsetzung in der Planung der Verfüllmaßnahmen dargestellt zu werden. Dies schließt nicht aus, dass im Verfüllplan für die verschiedenen Grubenbaue konkrete Verfüllgrade, die mit diesen Anforderungen verträglich sind, festgeschrieben werden, es ist aber nicht erforderlich.

Wir kommen zu folgender Feststellung:

- **Die Unterlagen zur Darstellung der Verfüllung (und damit auch die Unterlage [G 228]) können erst im Ergebnis der Nachweise abschließend erstellt bzw. geprüft werden.**

3.3.1.3. Nachweis der Herstellbarkeit

Der Herstellbarkeitsnachweis soll zeigen, dass mit der in der Planung der Verfüllmaßnahmen dargestellten Verfülltechnologie und mit einem geeigneten Verfüllmaterial der im Verfüllplan definierte angestrebte Verfüllungszustand erreicht werden kann. Darüber hinaus soll er zeigen, dass dieser Verfüllungszustand in Verbindung mit den In-situ-Eigenschaften des Versatzkörpers dem angestrebten Verwahrungszustands des Endlagers entspricht.

Eine solche Nachweisführung ist als Herstellbarkeitsnachweis vor Beginn der Verfüllung vorzulegen, da das in die Gruben Hohlräume eingebrachte Verfüllmaterial nach seinem Einbau de facto nicht mehr verändert oder entfernt werden kann.

Ein wesentlicher Bestandteil des Herstellbarkeitsnachweises ist die Nachweisführung, dass das in die Grubenbaue eingebrachte Material in situ den entsprechenden Anforderungen genügt. Es ist deshalb im Rahmen des Herstellbarkeitsnachweises zu zeigen, dass die zuvor unter Labor- und Technikumsbedingungen ermittelten Eigenschaften des Verfüllmaterials auf die In-situ-Bedingungen übertragbar sind. Dies bedeutet, dass sich

- entweder die Eigenschaften des in die Grubenbaue eingebrachten Verfüllmaterials bzw. des Versatzkörpers nicht signifikant von den Eigenschaften des unter Labor- und Technikumsbedingungen hergestellten Verfüllmaterials bzw. der aus diesem Material hergestellten Prüfkörper unterscheiden dürfen,
- oder anhand der Ergebnisse von Laboruntersuchungen mit ausreichender Gewissheit auf die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials geschlossen werden kann.

Diese Nachweisführung erfordert entweder eine ausreichende Erfahrung mit dem Verfüllmaterial und der Verfülltechnik oder ausführliche großmaßstäbliche Versuche unter In-situ-Bedingungen, bei denen auch bereits die in der Bauphase zu verwendende Misch- und Fördertechnologie eingesetzt wird.

Da das Verfüllmaterial Salzbeton nach unserer Kenntnis nur im ERAM eingesetzt wird, basieren die diesbezüglichen Erfahrungen ausschließlich auf der bGZ. In welchem Umfang die dabei durchgeführten Messungen und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse zur Nachweisführung herangezogen werden können, ist uns nicht bekannt, da diese Informationen vom BfS in den Nachweisführungen bislang nicht verwendet wurden.

Ein probeweises Vorab-Verfüllen von repräsentativen Gruben Hohlräumen mit der erst in einigen Jahren einzusetzenden Misch- und Verfülltechnologie und die intensive Untersuchung der erzeugten großvolumigen Versatzkörper sind mit einem solchen Aufwand und Schwierigkeiten verbunden, dass wir dies als unrealistisch ansehen.

Wir empfehlen deshalb, zunächst kritisch zu überprüfen, welche Anforderungen an die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials unverzichtbar und deshalb zwingend zu stellen (und ihre Erfüllung nachzuweisen) sind, ggf. in Abhängigkeit vom Einbauort. Darauf aufbauend sollte dargelegt werden, welche diesbezüglichen Erkenntnisse im Rahmen der bGZ gewonnen wurden und inwieweit sie sich als Nachweis verwenden lassen. Sofern sich bzgl. der In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials Nachweiserfordernisse ergeben, die nicht durch die im Rahmen der bGZ gewonnenen Erfahrungen erbracht werden können (bspw. weil künftig andere Verfüllmaterialien

eingesetzt werden sollen) und die großmaßstäbliche In-situ-Versuche erforderlich machen, sollte geprüft werden, ob es Grubenbaue gibt, bei denen diese Anforderungen nicht bestehen. Bei der Aufnahme der Verfüllmaßnahmen könnten diese Grubenbaue zuerst verfüllt und zur Vervollständigung der Nachweisführung im Sinne eines Großversuchs untersucht werden. Die Verfüllung der Grubenbaue mit erhöhten Anforderungen an die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials würde erst nach Vorliegen dieser Nachweise erfolgen.

Wir kommen zu folgender Feststellung:

- **Es sollte – ggf. in Abhängigkeit vom Einbauort – geprüft werden, welche Anforderungen an die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials unverzichtbar und deshalb zwingend zu stellen sind. Es könnte zweckmäßig sein, den Umfang der rechnerischen Nachweisführung zur Integrität der geologischen Barriere zu erhöhen, um so zeigen zu können, dass für manche Materialeigenschaften – ggf. in Abhängigkeit vom Einbauort – keine oder geringe Anforderungen bestehen.**

3.3.2. Konsistenz der Angaben

In den Kapitel 3.1 und 3.2 sind die Anforderungen aufgeführt, die gemäß der Unterlage [G 228] sowie gemäß Plan Stilllegung [A 281], dem Verfüllplan [P 220] und den Unterlagen [P 229] und [G 188] an das Verfüllmaterial gestellt werden. Diese Anforderungen werden nachfolgend tabellarisch zusammengefasst (Tabelle 3-1).

Aus der Tabelle 3-1 ist zu entnehmen, dass die in den verschiedenen Unterlagen enthaltenen Anforderungen an den Versatz bzw. an das Verfüllmaterial z. T. nicht völlig übereinstimmen:

- Gemäß [G 228] soll das Verfüllmaterial „*fließfähig (Konsistenz der Ausbreitungsklasse F4 nach DIN EN 206 oder fließfähiger)*“ sein. Entsprechend DIN EN 206 wird Beton der Ausbreitungsklasse F4 als „sehr weich“ bezeichnet. Erst bei F5 wird Beton als „fließfähig“ bezeichnet.

Wir gehen davon aus, dass hier die Ausbreitungsklasse verbindlich ist und nicht die Konsistenzangabe (d. h. die sprachliche Bezeichnung der Konsistenz).

- Gemäß Plan Stilllegung müssen der Elastizitätsmodul „*mindestens 6.000 MPa*“ und die einaxiale Zugfestigkeit „*0,7 MPa*“ betragen, gemäß [G 228] jedoch „*im Mittel mindestens 6.000 MPa*“ bzw. „*im Mittel mindestens 0,7 MPa*“. Auf diese unterschiedliche Darstellung wiesen wir bereits in unserem Bericht vom 28.09.2011 [BS 11c] hin (Ergebnisse zu Prüfungen im Rahmen des Prüfkomplexes 9 „Anlagen für die Stilllegung, Wetter- und Klimatechnik – Phase 1“). Das BfS klärte dies mit Schreiben vom 09.05.2012 [BfS 12] wie folgt auf:

„Die Anforderungen im Plan Stilllegung sind zur besseren Übersichtlichkeit vereinfachend dargestellt.“

Hinsichtlich der Angaben in [G 228] ist allerdings unklar, über welche Werte gemittelt werden muss (z. B. über die Gesamtergebnisse oder über die Proben aus einer Materialcharge), ob es eine untere bzw. obere Beschränkung der zulässigen Bandbreite gibt und – wenn nicht – weshalb auf eine solche Beschränkung verzichtet werden kann.

Tabelle 3-1: Anforderungen an das Verfüllmaterial

Eigenschaft/Parameter	[G 228]	[A 281]	[P 220]	[P 229]
Erstarrungsverhalten	Verfüllmaterial muss zu Versatzkörper erstarren	Verfüllmaterial muss zu Versatzkörper erstarren	Verfüllmaterial muss zu Versatzkörper erstarren	
Zusatzmittel	möglichst nicht verwenden; falls doch, dann gemäß DIN EN 934 Teil 2			möglichst nicht verwenden; falls doch, dann gemäß DIN EN 934 Teil 2
Inhaltsstoffe	Verwendungsverbote und Beschränkungen der ChemVerbotsV sind einzuhalten			
	kein Gefahrstoff im Sinne der GefStoffV			
	zulassungsfähig nach § 4 GesBergV			zulassungsfähig nach § 4 GesBergV
Zusatzstoffe	Typ II einsetzbar; wenn nicht normgerecht, ist die Eignung im Einzelnen nachzuweisen	Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450		
Grundwasser-gefährdung	Entweder Bindemittel und Zusatzstoffe entsprechend DIN oder europäischen Normen oder Eluatwerte des (ausgehärteten) Verfüllmaterials unterschreiten maximal zulässige Konzentrationswerte			
Gesteinskörnung (Zuschlag)	muss Salzgrus enthalten	Steinsalz (Salzgrus)		besteht aus Steinsalz
Anmischflüssigkeit	Trinkwasser, natürlich vorkommendes Wasser, Salzlösungen, Grubenwasser, Reinigungswasser aus der Misch- und Förderanlage; sofern sie nicht Bestandteile enthalten, die die Versatzeigenschaften verschlechtern	Wasser		Trinkwasser, natürlich vorkommendes Wasser, geeignete Salzlösungen, Reinigungswasser aus der Misch- und Förderanlage; die Brauchbarkeit der Spül- u. Reinigungswässer sowie von Salzlösungen ist vor der Verwendung zu überprüfen
Dosierbarkeit	mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ zu dosieren			
Konsistenz	Konsistenz der Ausbreitklasse 4 nach DIN EN 206 oder fließfähiger			
Pumpfähigkeit	hydraulisch förderbar	fließ- und pumpfähig	Fließ- und Pumpfähigkeit über weite Strecken	pumpfähig
Sedimentationsverhalten	Nachweis, dass Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen während des Förderprozesses sowie bei ruhender Suspension auszuschließen sind			
Korngrößenspektrum	Maximalkorngröße 20 mm			Maximalkorngröße 20 mm
Ausbreitverhalten	Fließwinkel geringer als 4°	kleiner Fließwinkel	kleiner Fließwinkel	
Lösungsvermögen	An- und Umlöseprozesse an den Konturen der Abbaue durch den Versatzstoff müssen weitgehend vermieden werden			
Wasserbindevermögen	ausreichende Kapazität, um die Menge an Zugabewasser bzw. enthaltener Lösung vollständig chemisch und physikalisch zu binden			
Wärmeentwicklung	adiabatische Temperaturerhöhung ist auf 55 K zu begrenzen	Wärmeeintrag durch den abbindenden Baustoff muss verträglich sein mit der Standsicherheit des Grubengebäudes		
Bindemittel	mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung im Sinne der DIN 1164 Teil 10	Zement der Bezeichnung CEM III/B 32,5 - N-LH/HS/NA		mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung im Sinne der DIN 1164 Teil 10
Stützwirkung/statischer Elastizitätsmodul	nach 56 Tagen im Mittel mindestens 6.000 MPa (Lagerung bei Raumtemperatur)	ausreichende Stützwirkung, statischer E-Modul mindestens 6.000 MPa	Aushärtung zu einem Versatzkörper	
Druckfestigkeit	mindestens Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 bzw. DIN 1045 Teil 1 (Lagerung bei Raumtemperatur)	mindestens Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206		
einaxiale Zugfestigkeit	nach 56 Tagen im Mittel mindestens 0,7 MPa (Lagerung bei Raumtemperatur)	0,7 MPa		
Wärmeausdehnung	Wärmeausdehnungskoeffizient darf im Durchschnitt nicht höher als $4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ sein			

Des Weiteren beziehen sich die genannten Werte gemäß [G 228] auf Prüfkörper nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen. Im Plan Stilllegung sind diesbezüglich keine Angaben enthalten. Dies könnte ebenfalls eine „vereinfachende Darstellung“ sein. Allerdings könnten sich diese Werte auch auf die Endfestigkeit des Verfüllmaterials beziehen. Dann läge eine Abweichung von den Angaben in [G 228] vor. Im Folgenden gehen wir davon aus, dass die Angaben in [G 228] verbindlich sind.

- Als Anmischflüssigkeit werden „Wasser“ [A 281] bzw. „Trinkwasser, natürlich vorkommendes Wasser, Salzlösungen, Grubenwasser, Reinigungswasser aus der Misch- und Förderanlage“ [G 228] bzw. „Trinkwasser, natürlich vorkommendes Wasser, geeignete Salzlösungen, Reinigungswasser aus der Misch- und Förderanlage“ [P 229] angegeben.

Auch hier gehen wir davon aus, dass die Angaben in [G 228] verbindlich sind.

Gemäß Kapitel 2.6 des Plans [A 281] kommt Salzbeton M3 mit der in Kapitel 3.1.5 des Plans angegebenen Rezeptur zum Einsatz. Wir verstehen diese Aussage so, dass auch anderes Material zum Einsatz kommen kann, sofern es die Anforderungen an das Verfüllmaterial (siehe Tabelle 3-1 dieses Gutachtens) erfüllt. Die Rezepturangaben stellen hier deshalb keine Materialanforderung dar. Sie beinhalten vielmehr die Aussage, dass für dieses Material zum Zeitpunkt der Plangenehmigung eine Erst-/Eignungsprüfung erfolgt sein wird.

3.3.3. Bestimmtheit der Anforderungen

Um die Sicherheit zu gewährleisten, ist eine vollumfängliche Erfüllung der aus den Sicherheitsanalysen abgeleiteten Anforderungen unerlässlich. Hierzu ist es erforderlich, die Anforderungen konkret und eindeutig zu formulieren, so dass keine Abweichungen zwischen Annahmen in den Sicherheitsanalysen und den tatsächlichen Materialeigenschaften aufgrund von Interpretationsspielräumen entstehen können.

Nicht alle Ausführungen in [G 228] sind mit der ausreichenden Präzision formuliert:

- Aus der Vorgabe (A6)

„Grundsätzlich sind Betonzuschlagstoffe des Typs II [...] einsetzbar“

wird nicht deutlich, ob Zuschlagstoffe des Typs II alternativ oder zusätzlich zu Zuschlagstoffen des Typs I verwendet werden dürfen oder ob ausschließlich Zusatzstoffe des Typs II zu verwenden sind.

- Bei der Vorgabe (A7) (Nachweis der Einhaltung von maximalen Eluatwerten im Verfüllmaterial bei Einsatz von Bindemitteln oder Zusatzstoffen, die nicht den DIN- oder europäischen Normen entsprechen) wird nicht angegeben, um welche DIN- und europäischen Normen es sich handelt. (Bspw. lassen Normen bzgl. geomechanischer Eigenschaften keine Rückschlüsse auf den Stoffaustrag zu.)

In Kapitel 2.5 („Anforderungen resultierend aus dem Umweltschutz“) wird angegeben, dass maximal zulässige Stoffkonzentrationen in „verfüllmaterialspezifischen Eluaten“ ermittelt werden. In Kapitel 2.6 („Eignungsprüfung“) wird angegeben, dass durch Untersuchungen verfüllmaterialspezifischer Eluate nachzuweisen ist, dass die aus dem Umweltschutz resultierenden Anforderungen eingehalten werden. Die Anforderungen (nach unserem Verständnis

die Unterschreitung der maximal zulässige Stoffkonzentrationen im Eluat) werden nicht explizit benannt. Weder werden die maximal zulässigen Stoffkonzentrationen angegeben, noch wird angegeben, nach welchen Regeln die Eluatuntersuchungen durchzuführen sind.

- Gemäß [G 228] muss der Zuschlag bzw. die Gesteinskörnung „*Salzgrus enthalten*“(A8). Es ist unklar, ob er nur zu einem gewissen Anteil oder vollständig aus Salzgrus bestehen muss. Den Angaben in [A 281] („*Steinsalz (Salzgrus)*“) und [P 229] („*besteht aus Steinsalz*“) zufolge ist anzunehmen, dass der Zuschlag vollständig aus Salzgrus bestehen soll. Sollte in [G 228] gefordert werden, dass (nur) ein Teil der Gesteinskörnung aus Salzgrus bestehen muss, wäre zu spezifizieren, ob es einen Mindestanteil gibt. Weiterhin wäre in [G 228] zu präzisieren, ob es Anforderungen an den Mineralbestand (z. B. ausschließlich Steinsalz, vgl. [A 281]) gibt.
- Entsprechend (A9) dürfen Salzlösungen und betriebliche Wässer nur dann als Zugabewasser verwendet werden, wenn sich die Versatzeigenschaften hierdurch nicht verschlechtern. Nach unserem Verständnis ist hier eine Verschlechterung relativ zu mit Trinkwasser hergestelltem Versatz gemeint. Es wird nicht angegeben, wie eine entsprechende Überprüfung zu erfolgen hat und welche Parameter im Einzelnen zu überprüfen sind.
- Die Bedingung (A16), dass „*Anlöse- und Umlöseprozesse an den Konturen der Abbaue durch den Versatzstoff weitgehend vermieden werden*“, ist präzisierungsbedürftig. Die Bedingung bezieht sich nicht auf eine unmittelbare und überprüfbare Materialeigenschaft. Es sollte klar gestellt werden,
 - ob hier (nur) die Aussage getroffen wird, dass das durch die übrigen Anforderungen spezifizierte Material zu keinen signifikanten Anlöse- und Umlöseprozessen führen kann (dies wäre zu belegen) oder
 - ob dies eine zusätzlich Forderung ist und wie ihre Erfüllung zu zeigen ist.
- Die Forderung (A17), dass das Verfüllmaterial über eine ausreichende Kapazität verfügen muss, die Menge an Zugabewasser bzw. enthaltener Lösung vollständig chemisch und physikalisch zu binden, wäre zu präzisieren. Es wäre anzugeben, wie ihre Erfüllung zu zeigen ist.
- Die Forderung (A18) (Begrenzung der adiabatischen Temperaturerhöhung bei einem theoretischen Hydratationsgrad von 100 % auf 55 K) bedarf der Konkretisierung. Die Hydratation von Beton ist ein lange anhaltender Prozess, der erst nach Jahren weitgehend abgeschlossen ist. Beispielweise beträgt der Hydratationsgrad in dem in [P 221] verwendeten Hydratationsmodell (siehe Kapitel 4.1.1.1 im vorliegenden Gutachten) nach 365 Tagen effektivem Betonalter erst 83 %. Die adiabatische Temperaturerhöhung bei einem Hydratationsgrad von 100 % ist deshalb eine in der Praxis nicht messbare Größe. Es wäre anzugeben, welche (messbare) Größe tatsächlich begrenzt werden soll und welche Anforderungen an diese bestehen.
- Es wird nicht angegeben, über welche Gesamtheiten in den Forderungen (A20), (A22) und (A23) gemittelt werden soll.

3.3.4. Vollständigkeit und Begründung der Anforderungen

Wie in Kapitel 3.1.1 angegeben, folgen wir dem in [G 228] genannten Grundsatz, dass sich die Anforderungen an die Materialeigenschaften des zur Hohlraumverfüllung vorgesehenen Salzbetons aus der Gesamtheit aller zu führenden Sicherheitsnachweise sowie der technischen Realisierbarkeit

der Verfüllung ableiten¹⁷. Die Umsetzung des Grundsatzes erfolgt in [G 228] allerdings unvollständig. Zwar wird angegeben, dass den aufgeführten Anforderungen die Sicherheitsnachweise für den Strahlenschutz, die Integrität der geologischen Barriere, den Schutz der Tagesoberfläche, den Schutz von Boden und Grundwasser und den Arbeitsschutz zugrunde liegen. Diese Sicherheitsnachweise werden jedoch nicht konkret benannt (z. B. in Form eines Verweises auf die entsprechenden Unterlagen, in denen diese Nachweise geführt werden). Weiterhin wird nicht angegeben, wie/weshalb sich die einzelnen Anforderungen aus [G 228] (z. B. 4° als maximaler Fließwinkel des Salzbetons beim Einbau, 55 K als maximale adiabatische Temperaturerhöhung bei vollständiger Hydratation oder einaxiale Zugfestigkeit nach 56 Tagen Abbindezeit von 0,7 MPa als „Mittelwert“) aus diesen Sicherheitsnachweisen ergeben und wie die konkreten Zahlenwerte begründet sind. Ein Verweis auf eine oder mehrere entsprechende Unterlagen ist in [G 228] ebenfalls nicht vorhanden. Damit bleiben Erfordernis, Eignung (des Parameters und des geforderten Parameterwerts) und Vollständigkeit der Anforderungen aus [G 228] unklar.

Ob aufgrund der vorliegenden Sicherheitsnachweise weitere Anforderungen an das Versatzmaterial zu stellen sind, die in [G 228] nicht enthalten sind, bleibt aufgrund der fehlenden Dokumentation ihrer Ableitung aus den Sicherheitsnachweisen bzw. fehlender entsprechender Verweise offen.

Die Herleitung des vollständigen Satzes der an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen setzt voraus, dass alle zu führenden Nachweise zur Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen identifiziert und erbracht wurden. Dies ist bislang nicht der Fall und wurde von uns bereits in [BS 11a] im Zusammenhang mit der Bewertung der Unterlage [P 218] thematisiert. In [P 218] sind die aus Sicht des BfS erforderlichen Nachweise zum Themenkomplex „Standicherheit und Integrität“ zusammengestellt und es wird dargelegt, mittels welcher Methoden die Nachweise geführt und anhand welcher Kriterien die Sicherheit bewertet werden sollen.

Die dort aufgeführten erforderlichen Nachweise lauteten:

- Nachweis der Begrenzung der Senkung der Tagesoberfläche.
- Nachweis der Begrenzung der Schiefstellung von Gebäuden.
- Nachweis des Erhalts der vorhandenen Barrierenintegrität für zutrittsgefährdete Grubenräume.
- Nachweis einer ausreichend dicken Salzbarriere für nicht zutrittsgefährdete Grubenräume.
- Nachweis der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung am Salzspiegel.
- Nachweis der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung in der jeweils obersten Anhydritschollen oder alternativ Nachweis der Unterschreitung der Bruchgrenze des Anhydrits oder einer Zustandsverbesserung des Anhydrits.
- Nachweis der Zustandsverbesserung des Salzes in Konturbereichen der Grubenräume und den Tragelementen.

¹⁷ Nach unserem Verständnis ist der Nachweis der technischen Realisierbarkeit der Verfüllung (mit den in den Sicherheitsnachweisen unterstellten Eigenschaften) Teil dieser Sicherheitsnachweise, siehe Kap. 3.3.1.

Die zum Themenkomplex „Standicherheit und Integrität“ bislang vorgelegten Einzelnachweise [P 214], [P 215], [P 224], [P 234], [P 243], [P 245] und [P 267] haben das Führen dieser Nachweise zum Gegenstand.

In [BS 11a] wiesen wir darauf hin, dass sich ein Teil der in [P 218] aufgeführten Nachweise nicht unmittelbar aus dem gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk ergibt und dass aus [P 218] nicht hervorgeht, weshalb nach Auffassung des BfS genau diese und nur diese Nachweiserfordernisse bestehen. Wir empfehlen in [BS 11a] deshalb die Forderungen F 1 bis F 4:

- 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.

Bislang liegt uns keine Unterlage zur Umsetzung dieser Forderungen vor. Wenn alle Nachweiserfordernisse systematisch und vollständig zusammengestellt sind, kann die Vollständigkeit der Sicherheitsnachweise bewertet werden. Aus den vollständigen und inhaltlich bestätigten Sicherheitsnachweisen ergeben sich die genehmigungsrelevanten Anforderungen an die Materialien und ihren Einbau.

Aus unserer Sicht sollte die Unterlage [G 228] durch eine Unterlage ersetzt oder ergänzt werden, in der die Anforderungen an das Verfüllmaterial vollständig aufgeführt werden. Die Anforderungen und die einzuhaltenden Kennwerte sollten im Einzelfall aus den Nachweiserfordernissen bzw. den Nachweisen hergeleitet und begründet werden.

Wie in Kapitel 3.3.1 erläutert, müssen die Annahmen in den Sicherheitsnachweisen mit den entsprechenden Anforderungen an die jeweilige Komponente konsistent sein. Im folgenden Kapitel 4 analysieren wir die vom BfS vorgelegten Nachweise zum Themenkomplex „Standicherheit und Integrität“ und zur Langzeitsicherheit im Hinblick auf den Strahlenschutz und prüfen, welche Anforderungen an das Verfüllmaterial sich hieraus ergeben und ob diese konsistent mit den Anforderungen aus [G 228] sind. Da die Nachweise zur Standicherheit und Integrität vom BfS gegenwärtig überarbeitet werden und – wie oben angesprochen – die Nachweiserfordernisse aus [P 218] nicht systematisch abgeleitet wurden, so dass hier Änderungen nicht ausgeschlossen werden können, kann diese Analyse nur einen vorläufigen Charakter haben.

Auf den Langzeitsicherheitsnachweis im Hinblick auf den Gewässerschutz gehen wir nicht ein, da die entsprechenden Unterlagen vom BfS zurückgezogen wurden. Den Nachweis der Arbeitssicherheit klammern wir ebenfalls aus, da hierzu vom BfS widersprüchliche Angaben vorliegen und wir eine Überarbeitung als erforderlich ansehen (vgl. [BS 11b]).

4. ANFORDERUNGEN AUS DEN SICHERHEITSNACHWEISEN DES BFS

4.1. Nachweise zur Standsicherheit und Integrität

Die vom BFS vorgelegten Nachweise zur Standsicherheit und Integrität entsprechen den folgenden in Kapitel 3.3.1 dieses Gutachtens aufgeführten Elementen der Nachweisführung:

- Nachweis („Langzeitaussage“ [BMU 10]) zur Integrität der geologischen Barriere und
- Nachweis des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen.

Weiterhin enthalten sie gemäß [P 218] Beiträge zum Nachweis, dass während der Herstellung (d. h. im Stilllegungsbetrieb) die Sicherheitsanforderungen im Hinblick auf die Standsicherheit der Grube eingehalten werden. Sie beinhalten nicht den Nachweis der Optimierung und der Herstellbarkeit.

Aus den Nachweisen zur Standsicherheit und Integrität lassen sich deshalb lediglich Anforderungen an die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials nach seinem Einbau ableiten. Anforderungen an die Eigenschaften des Verfüllmaterials vor seinem Einbau bzw. im Labor ergeben sich (erst) aus dem Herstellbarkeitsnachweis.

4.1.1. Annahmen in den Nachweisen

4.1.1.1. Eigenschaften des Salzbetons

In den rechnerischen Nachweisen zur Standsicherheit und Integrität des verfüllten Endlagers [P 215], [P 234] und [P 243] werden die folgenden Annahmen zum Versatzmaterial M3 getroffen:

Der Salzbeton wird als isotropes, homogenes elasto-plastisches Material modelliert, das folgendes Verhalten aufweist:

- Liegen die Spannungen im Material, beschrieben durch einen symmetrischen Spannungstensor

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix},$$

unter einem bestimmten Grenzzustand, verformt sich das Material linear elastisch, d. h., die Verzerrungen im Material, beschrieben durch einen symmetrischen Verzerrungstensor

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix},$$

sind proportional zu den anliegenden Spannungen. Aufgrund der unterstellten Homogenität und Isotropie gilt

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^e \\ \varepsilon_{22}^e \\ \varepsilon_{33}^e \\ \varepsilon_{12}^e \\ \varepsilon_{13}^e \\ \varepsilon_{23}^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & & & \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & & & \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & & & \\ & & & (1+\nu)/E & & \\ & & & & (1+\nu)/E & \\ & & & & & (1+\nu)/E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix}$$

mit ϵ^e als dem elastischen Anteil der Verzerrung, E als Elastizitätsmodul und ν als Querkontraktionszahl. Diese Verzerrung würde sich bei Beseitigung der Spannungen vollständig zurückbilden.

Bemerkung: In [P 215], [P 234] und [P 243] werden die verwendeten Formeln nicht angegeben und es wird für das Elastizitätsmodul die Größe E_{ct} verwendet. Wir vermuten, dass sie mit E in der obigen Formel identisch ist.

- Überschreiten die Spannungen im Material den Grenzzustand, verformt sich das Material plastisch. Dieser Anteil der Verzerrung, ϵ^p , würde sich bei Beseitigung der Spannungen nicht zurückbilden. Es wird angenommen, dass die Verzerrung instantan erfolgt. Sie ist so groß, dass der Grenzzustand gerade eingehalten wird. Die Richtung der Verzerrung wird aus einem „plastischen Potential“ $G(\sigma_{ij})$ ermittelt und zwar so, dass durch die Verzerrung die meiste Energie freigesetzt wird (genauer: die Energiedissipation am größten ist).
- Durch die plastische Verformung ändert das Material nicht seine Eigenschaften. Insbesondere bleibt sein elastisches Verhalten unverändert.
- Der Grenzzustand für die Spannungen, der das elastische Verhalten vom plastischen Verhalten trennt, wird durch eine Gleichung für die σ_{ij} beschrieben [P 249]:

$$F(\sigma_{ij}) \equiv \sqrt{J_2} + A \cdot I_1 - B = 0$$

mit $I_1 = 1$. Invariante des Spannungstensors $= \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

$J_2 = 2$. Invariante des Spannungsdeviators

$$= 1/6 \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]$$

$\sigma_i =$ Hauptspannungen (Eigenwerte) des Tensors σ

$A, B =$ Materialparameter

Es gilt also stets $\sqrt{J_2} + A \cdot I_1 - B \leq 0$. Diese Bedingung wird als Drucker-Prager-Kriterium bezeichnet.

Bemerkung: In [P 249] werden für den Salzbeton zwei Bedingungen für den Grenzzustand angesetzt. Neben einem Drucker-Prager-Kriterium wird dort ein weiteres Kriterium zur Begrenzung der mittleren Zugspannung verwendet. In [P 215], [P 234] und [P 243] wird dieses zweite Kriterium nicht erwähnt, so dass wir davon ausgehen, dass es hier nicht verwendet wurde.

Die Materialparameter A und B werden in [P 215], [P 234] und [P 243] aus der einaxialen Zugfestigkeit f_{ct} und der Zylinderdruckfestigkeit f_c berechnet, wobei der verwendete Zusammenhang nicht angegeben wird.

Bemerkung: Gemäß [Rus 11] beträgt der Zusammenhang zwischen den Materialkonstanten A und B sowie der Zugfestigkeit f_t und der Druckfestigkeit f_c

$$A = \frac{f_c - f_t}{\sqrt{3} \cdot (f_c + f_t)} \quad \text{und} \quad B = \frac{2 \cdot f_c \cdot f_t}{\sqrt{3} \cdot (f_c + f_t)}$$

Es ist jedoch unklar, ob das BfS diesen Zusammenhang verwendet und ob die jeweiligen Größen (f_{ct} bzw. f_c und f_t) bei BfS und [Rus 11] identisch sind.

Für das plastische Potential $G(\sigma_{ij})$ wird der Ansatz $G(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{ij})$ gewählt.

Die in [P 215], [P 234] und [P 243] durchgeführten geomechanischen Berechnungen sind thermo-mechanische Berechnungen, d. h., dass neben den Verformungen und Spannungen auch die Temperatur in Gestein und Versatz berechnet wird.

Durch das Abbinden des Betons erfolgt eine Wärmefreisetzung

$$Q(t) = \alpha(t) \cdot Q_{max}$$

mit der insgesamt frei werdenden massenspezifischen Wärmeenergie Q_{max} als Materialparameter und einem zeitabhängigen Hydratationsgrad α . In [P 215], [P 234] und [P 243] wird die Wärmeenergie auf die Zementmasse bezogen und in J je g Zement angegeben.

Der Hydratationsgrad ist eine zeitabhängige Größe, für die vom BfS folgender Zusammenhang angenommen wird:

$$\alpha(t) = \exp \left\{ - \left(\ln \left(1 + \frac{t_e}{t_1} \right) \right)^b \right\} \quad \text{mit} \quad t_e = \int_{t'=0}^t dt' \exp \left\{ \frac{E_A}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T(t')} \right) \right\}$$

mit den Materialparametern t_1 , b und E_A (Aktivierungsenergie), der Referenztemperatur $T_1 = 293 \text{ K}$ sowie der allgemeinen Gaskonstante $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$.

Die Temperatur T ergibt sich aus dem thermischen Anteil der thermomechanischen Berechnung. In diesem wird die Wärme- bzw. Temperaturenbreitung mittels

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \nabla T) + C \cdot Q(t)$$

berechnet mit der Dichte ρ , der (massen-)spezifischen Wärmekapazität c und der Wärmeleitfähigkeit λ als Materialparameter sowie C als Zementmasse je m^3 Salzbeton.

Bemerkung: In [P 215], [P 234] und [P 243] wird c als volumenspezifische Wärmekapazität bezeichnet. Anhand der Einheit $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ist jedoch erkennbar, dass es sich um die (massen-)spezifische Wärmekapazität handeln muss.

In [P 215], [P 234] und [P 243] werden das E-Modul, die Zugfestigkeit und die Druckfestigkeit als vom Hydratationsgrad α abhängig modelliert, wobei gemäß [P 221] die folgenden Zusammenhänge verwendet werden:

E-Modul	$E_{ct}(\alpha) = E_{cte} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{2/3}$
Zugfestigkeit	$f_{ct}(\alpha) = f_{cte} \cdot \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0}$
Druckfestigkeit	$f_c(\alpha) = f_{ce} \cdot \left(\frac{\alpha - \alpha_0}{1 - \alpha_0} \right)^{3/2}$

mit dem Mindesthydratationsgrad α_0 sowie E_{cte} , f_{cte} und f_{ce} als Materialparameter.

Die Kopplung mit dem mechanischen Anteil der thermomechanischen Berechnung erfolgt über die Wärmeausdehnung, die durch den Wärmeausdehnungskoeffizient α_T als Materialparameter beschrieben wird.

Für die Materialparameter werden in [P 215], [P 234] und [P 243] die folgenden Werte angenommen:

Elastizitätsmodul $E_{cte} \equiv E_{ct} (\alpha=1)$	10,7 GPa
Querkontraktionszahl ν	0,27
Zugfestigkeit $f_{cte} \equiv f_{ct} (\alpha=1)$	2,09 MPa
Druckfestigkeit $f_{ce} \equiv f_c (\alpha=1)$	42,1 MPa
massenspezifische Wärmeenergie Q_{max}	482,5 J/g (Zement)
Zementanteil im Salzbeton C	197 kg (Zement)/m ³ (Salzbeton)
Mindesthydratationsgrad α_0	0,385
Materialparameter der Hydratation t_1	4,2101 Tage
Materialparameter der Hydratation b	-1,1255
Dichte des Salzbetons	1.950 kg/m ³
spezifische Wärmekapazität c	920 J/(kg·K)
Wärmeleitfähigkeit λ	0,87 W/(m·K)
Wärmeausdehnungskoeffizient α_T	$2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

4.1.1.2. Einbau des Salzbetons

In den [P 215], [P 234] und [P 243] werden Annahmen zum Verfüllgrad der verschiedenen Grubenbaue in den jeweiligen Berechnungsschnitten getroffen. Für die mit Salzbeton verfüllten Grubenbaue werden die in den Tabellen 4-1, 4-2 und 4-3a bis 4-3c angegebenen Verfüllgrade unterstellt. Für die Grubenbaue, die im Rahmen der bGZ verfüllt wurden, wird in [P 243] ein Verfüllgrad von 100 % angesetzt.

Die Nachweise zur Standsicherheit und Integrität für das Westfeld [P 214], für das Ostfeld und das Südostfeld [P 245] und für die Grube Marie [P 224] beinhalten keine expliziten Annahmen im Hinblick auf den Salzbeton. Es wird auf die Berechnungen zum Zentralteil in [P 243] verwiesen und den Umstand, dass die Verhältnisse in den jeweiligen Grubenfeldern günstiger als im Zentralteil seien. Die Berechnungen in [P 243] seien somit für das jeweilige Grubenfeld abdeckend. Bezüglich des Materialverhaltens des Salzbetons M3 wird damit implizit unterstellt, dass er sich so wie in [P 243] modelliert verhält.

Tabelle 4-1: Umfang der in [P 215] (Südfeld, Berechnungsschnitt SF8s) angenommenen Verfüllung

Grubenbau	Querschnitt	Verfülldauer in d	Verfüllgrad
Abbau 8s – 2a-Sohle	k. A.	12	70 %
Abbau 8s – 2. Sohle	k. A.	35	65 %
Abbau 8s – 3a-Sohle	k. A.	25	68 %
Abbau 8s – 3. Sohle	k. A.	17	67 %
Abbau 8s – 4a-Sohle	k. A.	44	85 %
Kalilager 1. Sohle	k. A.	1	100 %
Kalilager -284 mNN	k. A.	1	100 %
Kalilager 2. Sohle	k. A.	1	100 %
Kalilager 4. Sohle	k. A.	1	100 %
Strecken der 4. Sohle	k. A.	1	100 %

Tabelle 4-2: Umfang der in [P 234] (Nordfeld, Modell NF3D) angenommenen Verfüllung

Grubenbau	Volumen	Verfülldauer in d	Verfüllgrad	
			Planung	Modell
Abbau 7s – 1. Sohle	k. A.	2	95 %	95,7 %
Abbau 7n – 1. Sohle	k. A.	23	95 %	93,4 %
Abbau 7a – 1. Sohle	k. A.	3	93 %	92,0 %
Abbau 3 – 2. Sohle	k. A.	48	95 %	96,5 %
Abbau 7 – 2. Sohle	k. A.	42	95 %	97,4 %
Abbau 3s – 3. Sohle	k. A.	63	90 %	90 %
Abbau 7 – 3. Sohle	k. A.	15	76 %	76,3 %
Abbau 3 – 4a-Sohle	k. A.	29	94 %	92,2 %
Abbau 4 – 4a Sohle	k. A.	34	90 %	91,5 %
Abbau 5 – 4a-Sohle	k. A.	20	86 %	85,2 %
Abbau 7 – 4a-Sohle	k. A.	0	0 %	0 %

Tabelle 4-3a: Umfang der in [P 243] (Zentralteil, Modellschnitt ZTN-3.1) angenommenen Verfüllung (ohne bGZ)

Grubenbau	Querschnitt	Verfülldauer in d	Verfüllgrad
Abbau 3n – 1.Sohle	k. A.	13	95 %
Abbau 2n – 2. Sohle	k. A.	27	87 %
Abbau 4n – 2. Sohle	k. A.	7	64 %
Abbau 2n – 3. Sohle	k. A.	23	93 %
Abbau 3n – 3. Sohle	k. A.	33	84 %
Abbau 4n, 4a – 3. Sohle	k. A.	68	97 %
Abbau 1 bn – 4a-Sohle	k. A.	10	95 %

Tabelle 4-3b: Umfang der in [P 243] (Zentralteil, Modellschnitt ZTS-3.1) angenommenen Verfüllung (ohne bGZ)

Grubenbau	Querschnitt	Verfülldauer in d	Verfüllgrad
Abbau 3s – 1. Sohle	k. A.	26	95 %
Abbau 4s – 2a-Sohle	k. A.	6	72 %
Abbau 4s – 2. Sohle	k. A.	20	87 %
Abbau 4s, 4a – 3. Sohle	k. A.	144	98 %
Abbau 1bs – 4a-Sohle	k. A.	8	95 %
Abbau 2bs – 4a-Sohle	k. A.	10	95 %
Abbau 1s – 4. Sohle	k. A.	2	84 %
Abbau 2s – 4. Sohle	k. A.	8	83 %
Abbau 3s – 4. Sohle	k. A.	4	95 %

Tabelle 4-3c: Umfang der in [P 243] (Zentralteil, Modellschnitt ZT-3.3) angenommenen Verfüllung (ohne bGZ)

Grubenbau	Querschnitt	Verfülldauer in d	Verfüllgrad
Abbau 1a – 1.Sohle	k. A.	1	95 %
Abbau 1a – 2a-Sohle	k. A.	6	95 %
Abbau 1a – 2. Sohle	k. A.	24	84 %
Abbau 3n – 3. Sohle	k. A.	33	84 %
Abbau 1an – 4. Sohle	k. A.	22	95 %

4.1.2. Bewertung

4.1.2.1. Eigenschaften des Salzbetons

Vollständigkeit der Nachweise

Die Angaben in den Nachweisen [P 215], [P 234] und [P 243] sind nicht vollständig. Hinsichtlich der Modellierung des Salzbetons fehlt die Angabe des vollständigen Satzes der verwendeten Gleichungen. Insbesondere fehlen Gleichungen zur Dokumentation, wie die Größen Zugfestigkeit f_{ctc} , Druckfestigkeit f_{ce} und E-Modul E_{cte} in die Modellierung einfließen.

Neben der Angabe der verwendeten Gleichungen fehlt auch ihre Begründung. Nach unserem Verständnis wird der Salzbeton hier als elastoplastisches Material beschrieben, unabhängig vom Ausmaß seiner Verzerrung. In der Literatur wird für Beton teilweise auch ein elastoplastischer Ansatz – wie in [P 215], [P 234] und [P 243] beschrieben – verwendet, allerdings liegt der Gültigkeitsbereich dieses Ansatzes hier typischerweise bei einer Gesamtverzerrung von 0,35 % (davon 0,2 % elastisch und 0,15 % plastisch), siehe z. B. in [Sch 14] Seite 5.31 f¹⁸. Bei einer stärkeren Verzerrung wird das Gefüge des Betons zerstört und er verändert seine mechanischen Eigenschaften. Wenn in den Nachweisen des BfS für Salzbeton angenommen wird, dass er seine Festigkeit und seine elastischen Eigenschaften unverändert vom Grad seiner plastischen Verzerrung beibehält, ist dies zu begründen bzw. es sind entsprechende Materialanforderungen zu formulieren. Alternativ ist zu zeigen, dass diese Eigenschaften für die Sicherheitsnachweise unerheblich sind.

Zu Beginn des Kapitels 4.1 wiesen wir darauf hin, dass sich aus den Nachweisen zur Standicherheit und Integrität lediglich Anforderungen an die In-situ-Eigenschaften des Verfüllmaterials nach seinem Einbau ableiten lassen und dass sich die Anforderungen an die Eigenschaften des Verfüllmaterials vor seinem Einbau bzw. im Labor aus dem Herstellbarkeitsnachweis ergeben. In [P 215], [P 234] und [P 243] wird jedoch implizit vorausgesetzt, dass die im Labor ermittelten Werte für die Materialeigenschaften mit seinen In-situ-Eigenschaften übereinstimmen. Hierauf gehen wir in Kapitel 4.3 ein. Unabhängig hiervon prüfen wir im Folgenden die Konsistenz zwischen den Angaben in [P 215], [P 234] und [P 243] (für das Material in situ) und den Materialanforderungen in [G 228] (für das Material unter Laborbedingungen).

Konsistenz von Nachweisen und Materialanforderungen

Die in [P 215], [P 234] und [P 243] angegebenen Parameterwerte für die **einaxiale Zugfestigkeit** bei vollständigem Abbinden (2,09 MPa) und die **Zylinderdruckfestigkeit** bei vollständigem Abbinden (42,1 MPa) wurden aus Untersuchungen an M3-Proben abgeleitet [P 221]. Die in [P 221] angegebenen Werte nach 56 Tagen Abbindezeit betragen

einaxiale Zugfestigkeit f_{ct} (56 d)	–	1,35 MPa (bei 40 °C Lagertemperatur),
Zylinderdruckfestigkeit f_c (56 d)	–	19,6 MPa (bei 40 °C Lagertemperatur).

¹⁸ Für den elastischen Anteil wird dort ein parabolischer Ansatz empfohlen, allerdings ist ein linearer Ansatz auch zulässig.

Diese Werte weichen von den in [G 228] nach 56 Tagen geforderten Werten (einaxiale Zugfestigkeit 0,7 MPa und Festigkeitsklasse C8/10 entsprechend 8 MPa Zylinderdruckfestigkeit) nach oben ab. Die Anforderungen an das Material sind also geringer als die in den Nachweisen verwendeten Werte.

Der nach 56 Tagen geforderte **E-Modul** von 6.000 MPa und der in den Nachweisen verwendete Wert von 10.700 MPa für den vollständig abgebundenen Salzbeton sind mit dem in [P 221] angegebenen Abbindemodell nicht vollständig kompatibel. Entsprechend dem Modellansatz aus [P 221] sollte der Abbindegrad nach 56 Tagen mindestens 0,717 betragen. Ausgehend von einem E-Modul nach vollständigem Abbinden in Höhe von 10.700 MPa ergibt sich hieraus ein E-Modul nach 56 Tagen von mindestens 7.100 MPa. Dieser Wert liegt über dem geforderten E-Modul von 6.000 MPa.

Aus der massenspezifischen Wärmeenergie Q_{max} (482,5 J/g (Zement)) lässt sich die **adiabatische Temperaturerhöhung** ΔT_a^{max} im abbindenden Salzbeton berechnen mittels

$$\Delta T_a^{max} = \frac{C \cdot Q_{max}}{c \cdot \rho}$$

mit C als dem Zementanteil im Salzbeton C [kg (Zement)/m³ (Salzbeton)], c als der spezifischen Wärmekapazität c [J/(kg·K)] und ρ als der Dichte des Salzbetons. Mit den in [P 215], [P 234] und [P 243] angegebenen Parametern lässt sich die adiabatische Temperaturerhöhung im Modell zu 53,1 K berechnen, was geringfügig unter dem in [G 228] geforderten Wert von 55 K liegt. Auch hier sind die Modellannahmen in den Nachweisen günstiger als die Anforderungen an den Salzbeton, allerdings ist der Unterschied nur sehr gering.

Der geforderte maximale **lineare Wärmeausdehnungskoeffizient** liegt mit $4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ deutlich über dem Wert in den Nachweisen ($2,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Wir kommen zu dem Ergebnis, dass für alle Materialparameter, die in die Nachweise [P 215], [P 234] und [P 243] einfließen und für die gleichzeitig in [G 228] Anforderungen festgelegt werden, bei der Nachweisführung stets ein günstigerer Wert unterstellt wurde als in [G 228] gefordert wird. Die Nachweise sind mit den Materialanforderungen deshalb nicht kompatibel. Die Nachweise müssten entweder durch Rechnungen ergänzt werden, in denen gezeigt wird, dass auch mit den geforderten Mindestwerten die Nachweisziele erbracht werden können, oder es ist auf andere Art zu begründen, weshalb die Differenzen in den Parameterwerten keinen (signifikanten) Einfluss auf das Systemverhalten haben. Wir gehen davon aus, dass die in [P 215], [P 234] und [P 243] berechneten Spannungszustände primär vom Verfüllgrad der Grubenbaue und im Vergleich dazu nur sehr untergeordnet von E-Modul, Zugfestigkeit und Druckfestigkeit abhängen (sofern diese in der hier diskutierten Größenordnung liegen). Dies sollte jedoch vom BfS dargelegt werden.

Für 5 Materialparameter, die in die Nachweise [P 215], [P 234] und [P 243] einfließen, werden in [G 228] keine Anforderungen festgelegt (Querkontraktionszahl ν , Mindesthydratationsgrad α_0 , Modellparameter der Hydratation t_1 und b sowie Wärmeleitfähigkeit λ). Dies setzt voraus, dass die mögliche Variation dieser Parameter so gering ist, dass sie keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Nachweise haben. Dies sollte vom BfS dargelegt und begründet werden.

Bei der Überarbeitung der Unterlagen [P 215], [P 234] und [P 243] sollten diese Lücken in der Nachweisführung beseitigt werden.

Es ist sinnvoll und zweckmäßig, die Anforderungen an das Verfüllmaterial so gering wie ohne Sicherheitsverzicht möglich zu formulieren. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Anforderungen als auch die geforderten Eigenschaften. Hierdurch kann das Spektrum der geeigneten Baustoffe erweitert werden, was die Beschaffungssicherheit erhöht und die Möglichkeit zur Optimierung hinsichtlich anderer Parameter (z. B. Schadstofffreisetzung und Kosten) erweitert.

Wir empfehlen deshalb, tatsächlich nur solche (genehmigungsrelevante) Forderungen an das Material festzuschreiben, die sich aus den Sicherheitsnachweisen ergeben. Diese Anforderungen sollten jedoch dann mit den Nachweisen konsistent sein.

4.1.2.2. Einbau des Salzbetons

Die vom BfS vorgelegten „Stand sicherheits- und Integritätsnachweise“¹⁹ setzen voraus, dass der Salzbeton an bestimmten Stellen im ERAM eingebracht wird. Damit werden implizit die folgenden Annahmen getroffen:

- Der Salzbeton kann zu den Grubenbauen transportiert werden.
- Der Salzbeton kann in die einzelnen Grubenbaue eingebaut werden und zwar so, dass der jeweils angestrebte Verfüllgrad erreicht wird.

Zusätzlich ist zu gewährleisten, dass der Salzbeton nach seinem Einbau in situ die in den Stand sicherheits- und Integritätsnachweisen aufgeführten Eigenschaften aufweist (vgl. Kapitel 4.3).

Aus dem ersten Punkt ergibt sich die Anforderung an den Salzbeton, dass er hydraulisch förderbar sein muss. Dies entspricht der **Anforderung A12**. Wir können nicht ausschließen, dass sich aus der endgültigen Planung der Verfüllmaßnahmen und dem darauf aufbauenden Herstellbarkeitsnachweis weitere Konkretisierungen, wie Viskosität und Zeitverhalten des Abbindens, ergeben werden.

Der zweite Punkt stellt keine unmittelbare Anforderung an den Salzbeton dar. Dieser Punkt führt dazu, dass ein Herstellbarkeitsnachweis zu führen ist, in dessen Ergebnis sich ggf. Anforderungen an den Salzbeton ergeben.

Um die Herstellbarkeit – d. h. die Verfüllung jedes Grubenbaues mit dem im Verfüllplan ausgewiesenen zugehörigen Verfüllgrad – zu gewährleisten, ist grundsätzlich ein Steuerungssystem, bestehend aus einer Überwachung des erreichten Verfüllgrads und einer technischen Möglichkeit zur Erhöhung des Verfüllgrads (Nachbesserung), erforderlich. Die Ansprüche an dieses Steuerungssystem sind vom erforderlichen Verfüllgrad abhängig.

Bei einem niedrigen erforderlichen Verfüllgrad ist es i. d. R. ausreichend, den erreichten Verfüllgrad aus dem Verhältnis von eingebrachter Salzbetonmenge und zuvor bestimmten Hohlräumvolumen zu ermitteln. Der erreichte Verfüllgrad kann bei Bedarf, d. h. bei Unterschreitung des geforderten Verfüllgrads, auf einfache Weise mittels Fortsetzung der Salzbetonzufuhr in den Grubenbau erhöht werden. Diese Regelungsmöglichkeit ist ausreichend, solange der Salzbeton sich in dem Grubenbau weitgehend ungehindert ausbreiten kann. Durch die Festlegung einer

¹⁹ Bei diesen Unterlagen handelt es sich um Sicherheitsanalysen.

Anforderung an den Fließwinkel (entsprechend **Anforderung A15**) kann – bis zu einem gewissen Verfüllgrad – die Verfüllbarkeit jeweiligen Grubenhohlraums gewährleistet werden.

Um den Nachweis zu führen, dass ein geforderter hoher Verfüllgrad erzielt wurde, kann es notwendig werden, das tatsächliche Füllniveau oder die tatsächliche Verteilung des Salzbetons im Grubenbau durch Messung zu bestimmen. Weiterhin kann es zur Erhöhung des erzielten Verfüllgrads erforderlich werden, zusätzliche Maßnahmen wie das Stoßen einer weiteren Verfüllbohrung durchzuführen. Ob (und wenn ja welche) zusätzliche Anforderungen hieraus an das Verfüllmaterial resultieren, ergibt sich aus dem Nachweis der Herstellbarkeit (mit der Darstellung der Vorgehensweise zur Herstellung des angestrebten Verwahrungszustands, vgl. Kapitel 3.3.1 dieses Gutachtens).

Aus den vorliegenden Standsicherheits- und Integritätsnachweisen des BfS ergeben sich explizite Anforderungen an die Verfüllgrade verschiedener Grubenbaue. In Kapitel 4.1.1.2 dieses Gutachtens sind die in den Standsicherheits- und Integritätsnachweisen des BfS angesetzten Verfüllgrade zusammengestellt. Für die Steinsalzabbau im Südfeld liegen sie zwischen 65 % und 85 %. Dies ist bei einem Einleiten des Verfüllmaterials im Grubenbauhöchsten technologisch ohne Probleme erreichbar. Die angenommenen Verfüllgrade von 100 % für Kalilager und Strecken werden kaum erreichbar sein, allerdings dürften hier die Volumina so gering sein, dass eine nicht ganz vollständige Verfüllung keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnungen hat. Diese wäre aber im Rahmen der Nachweise zur Integrität der geologischen Barrieren nachzuweisen bzw. zu begründen. Inwieweit sich hieraus oder aus den für den Zentralteil und das Nordfeld unterstellten Verfüllgraden von über 95 % über A15 hinausgehende Anforderungen an das Verfüllmaterial ergeben werden, ist derzeit offen.

Wir weisen an dieser Stelle darauf hin, dass die rechnerischen Nachweise zur Standsicherheit und Integrität ([P 215], [P 234] und [P 243]) unter der Annahme konkreter Verfüllgrade für die verschiedenen Abbaue in den Berechnungsschnitten durchgeführt wurden und nicht untersucht wurde, welche Auswirkungen andere Verfüllgrade haben würden. Diese Annahme führt damit zu einer konkreten Anforderung an die Verfüllgrade dieser Abbaue.

Die in der Genehmigungsunterlage [G 217] getroffene Festlegung, dass ein mittlerer Verfüllgrad von ca. 65 % pro Feldesteil zu erzielen ist, ist weitaus unspezifischer als die in den Nachweisen getroffene Annahme zur Verfüllung der in den Berechnungsschnitten betrachteten Abbaue. Sie würde es bspw. erlauben, eine Abbaureihe im Südfeld unverfüllt zu lassen, sofern zwei andere Abbaureihen vollständig verfüllt würden. Für eine solche Konstellation liegt jedoch kein Sicherheitsnachweis vor.

Die „Systembeschreibung der Verfüllung“ [G 217] ist als Genehmigungsunterlage nicht hinreichend. Der Genehmigung muss ein Verfüllplan zugrunde liegen, der für die einzelnen Grubenbaue zu erzielende Verfüllgrade ausweist, die mit den Sicherheitsnachweisen konsistent sind.

Weiterhin weisen wir an dieser Stelle darauf hin, dass die rechnerischen Nachweise zur Standsicherheit und Integrität nur für einzelne Schnitte durch das Grubengebäude bzw. einzelne 3-dimensionale Ausschnitte des Grubengebäudes durchgeführt wurden. Für die Teile der Grube, für die keine numerischen Berechnungen durchgeführt wurden, wird der Nachweis mit dem Verweis

auf die Übertragbarkeit geführt. Diese Übertragbarkeit ist zu begründen und die hierbei getroffenen Annahmen sind konkret zu benennen. Dies gilt insbesondere für die unterstellten Verfüllgrade in den nicht explizit modellierten Grubenbauen. Bspw. dürfte eine Übertragbarkeit der Ergebnisse des Berechnungsschnitts SF8s auf andere Abbaureihen des Südfelds u. a. voraussetzen, dass die Verfüllgrade in diesen Abbaureihen nicht geringer sind als die Verfüllgrade in dem jeweils entsprechenden Grubenbau der Abbaureihe SF8s. Diese impliziten Annahmen bei der Übertragbarkeit führen ebenfalls zu Anforderungen.

Bei der Übertragung von Nachweisen, die für einen Teil der Grube geführt wurden, auf andere Teile der Grube sind die impliziten und expliziten Voraussetzungen bzw. Annahmen, unter denen die Übertragbarkeit gilt, vollständig zu benennen bzw. zu begründen.

4.2. Langzeitsicherheitsnachweise

Der radiologische Langzeitsicherheitsnachweis und der Nachweis der Unbedenklichkeit der Grundwasserbeeinflussung basieren auf den Langzeitsicherheitsanalysen (LSA) [P 277] und [P 278]. In diesen LSA werden diverse Annahmen hinsichtlich der Eigenschaften des bei der Stilllegung des ERAM zu verwendenden Verfüllmaterials getroffen. Die Ergebnisse der LSA stehen somit unter dem Vorbehalt, dass diese Annahmen realisiert werden. Teil des Langzeitsicherheitsnachweises muss deshalb auch der Nachweis sein, dass das vorgesehene Verfüllmaterial die in den LSA angenommenen Eigenschaften aufweist.

Die in den LSA enthaltenen Annahmen zu den Eigenschaften des Verfüllmaterials werden nachfolgend zusammengestellt.

4.2.1. Annahmen in den Nachweisen

4.2.1.1. Langzeitsicherheitsanalyse mit dem Programm PROSA [P 277]

In [P 277], Kapitel 2, wird als wesentliches Merkmal des Verfüllkonzeptes angegeben, dass eine Vielzahl von Hohlräumen der Grubengebäude sowie ausgewählte Streckenabschnitte und vertikale Grubenbaue weitgehend mit einem fließfähigen Salzbeton derart verfüllt werden, dass

- die gebirgsmechanische Stabilität des Gesamtsystems langfristig gesichert ist,
- die Konvergenz des Grubengebäudes behindert wird,
- die Bewegung von Lösung in den Grubengebäuden generell eingeschränkt wird,
- gewisse Strecken und Gesenke mit erhöhtem technischem Aufwand verfüllt sind und eine spezielle hydraulische Barriere (Abdichtung) gegen den Zutritt von Salzlösung in die Einlagerungsgrubenbaue sowie den Austritt von Fluiden aus denselben bilden und
- das Volumen zutretender Lösung und damit auch das Ausmaß von Auf- und Umlöseprozessen begrenzt werden.

Hinsichtlich des Verfüllmaterials wird ausgeführt:

„Als Versatzmaterialien für bisher unverfüllte Hohlräume und für die Abdichtungen ist im Allgemeinen ein aus Zement, Steinkohlenflugasche, Salzzuschlag und Wasser bestehender Salzbeton vorgesehen²⁰. [...]

Die aus den Standsicherheitsuntersuchungen abgeleiteten Anforderungen an die Materialparameter (E-Modul, Druck- und Zugfestigkeit) sowie die Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Labor- und In-Situ-Versuche sind in [DBE 2006]²¹ und [K-UTEC 2008]²² dargestellt, während die Nachweise des chemischen Langzeitverhaltens der Versatzmaterialien in [GRS 2009]²³ im Detail aufgeführt sind.“

Gemäß [P 277], Kapitel 3.1.4, wirken sich Versatzmaßnahmen konvergenzverringend aus. Es wird zwischen kompaktierbarem (z. B. Salzgrus) und nicht oder gering kompaktierbarem Versatz (Salzbeton) unterschieden.

In [P 277], Kapitel 3.1.8, wird angegeben, dass die Versatzstoffe zwar große Mengen an sorbierenden Festphasen enthalten, die Sorption in der gesamten Grube aufgrund der nur eingeschränkten Prognostizierbarkeit sowie der wenigen vorhandenen experimentellen Daten jedoch konservativ vernachlässigt wird. Eine Ausnahme stellt die Modellierung des Austritts des Inventars aus dem Radiumfass dar, bei der eine Sorption am Salzbeton des Streckenstummels, in dem das Radiumfass eingelagert ist, angenommen wird. Gemäß [P 277], Anhang R, wird der K_d -Wert für die Sorption von ²²⁶Ra am Salzbeton mit 0,01 m³/kg (bezogen auf die Masse des Salzbetons) angenommen.

Im Rahmen der Beschreibung des Referenzszenarios wird in [P 277], Kapitel 3.2, dargestellt, dass der Salzbetonversatz in der übrigen Grube nicht in nennenswertem Ausmaß mit magnesiumhaltiger Lösung reagiert, da keine ausreichenden hydraulischen Kräfte vorhanden sind, um das Porenwasser im Inneren der großen Versatzkörper zu verdrängen. Als Abweichung von dieser Annahme wird das Alternativszenario „Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube“ definiert.

In [P 277], Kapitel 3.3, Tabelle 3-1, werden die im Modell integrierten Prozesse und Vorgänge angegeben. Dort und in den Kapitel 3.3.1 bzw. 3.3.4 wird u. a. ausgeführt, dass die Hohlraumkonvergenz der übrigen Grube im Modell unter Berücksichtigung der Stützwirkung von Fluiddruck und Versatz behandelt wird, d. h. es erfolgen Annahmen zur Stützwirkung des Versatzes.

In [P 277], Kapitel 3.5.5, wird das Alternativszenario „Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube“ erläutert. Es wird dargestellt, dass der Salzbeton, der in der übrigen Grube als Stützversatz dient, im Referenzszenario nicht oder nur in vernachlässigbarem Umfang durch magnesiumhaltige Lösungen angegriffen wird, da

- der Großteil des Salzbetons wegen seiner niedrigen Permeabilität und mangels treibender Kräfte in den verfüllten Hohlräumen nicht durchströmt wird,

²⁰ In Bezug auf den bei der bGZ verwendeten Salzbeton wird angegeben: „Für die bGZ wird ein Salzbeton verwendet, welcher Kalkmehl und Sand anstelle von Steinkohlenflugasche enthält.“

²¹ = Unterlage [G 228]

²² = Unterlage [P 266]

²³ = Unterlage [P 299]

- diffusive Prozesse aufgrund des geringen Oberfläche-/Volumenverhältnisses keine nennenswerten Stoffumsätze bewirken können und
- der Versatz aufgrund der Konvergenz teilweise vom umgebenden Salzgestein eingeschlossen und damit gegen einen Angriff von Lösungen geschützt wird.

Bei diesem Alternativszenario wird angenommen, dass der Salzbeton in der übrigen Grube durch magnesiumhaltige Lösungen korrodiert wird und damit seine Stützwirkung teilweise einbüßt²⁴.

Die berechneten Folgen der Korrosion sind gering. Die Auspressrate liegt (anfänglich) um 20 % über der des Referenzszenarios. In [P 277] wird deshalb gefolgert, dass dieser Prozess nicht weiter berücksichtigt werden muss und seine Folgen mit der Variation der Konvergenzrate im Rahmen der probabilistischen Modellierung abgedeckt werden.

In [P 277], Kapitel 4, werden die gewählten Modellparameter erläutert. Hinsichtlich des Verfüllmaterials ist [P 277], Kapitel 4.1, Tabelle 4-1, für die wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes der Wert $2 \cdot 10^{-4}$ zu entnehmen.

In [P 277], Kapitel 4.2, wird hinsichtlich der nicht radionuklidspezifischen Parameter der Einlagerungsbereiche auf Anhang D verwiesen. Zu diesen Parametern zählen der totale Verfüllgrad der Einlagerungsgrubenbaue und des restlichen Einlagerungsbereichs (kompaktierbarer und nicht kompaktierbarer Versatz) sowie der Anteil des kompaktierbaren Versatzes am Gesamtversatz in den Einlagerungsgrubenbauen und im restlichen Einlagerungsbereich.

Die mittlere Porosität von Salzbeton wird mit 20 % angegeben. Es wird angenommen, dass lediglich 0,1 % des Porenwassers zur Radionuklidmobilisierung und -auspressung beiträgt. Dieser Anteil nimmt den als „wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes“ bezeichneten Teil der Gesamtporosität ein. Diese Parameter werden auch in [P 277], Anhang C, für den Salzbeton genannt. Zudem wird dort der relative Anfangsfüllgrad des Salzbetons mit Flüssigkeit mit dem Wert 1,00 versehen.

Damit ergeben sich aus der LSA [P 277] folgende Annahmen zum Salzbetonversatz:

- keine oder nur geringe Kompaktierbarkeit, Stützwirkung bzgl. Konvergenz;
- Sorptionsfähigkeit für ²²⁶Ra am Salzbeton, K_d -Wert von $10 \text{ cm}^3/\text{g}$ (bezogen auf die Masse des Salzbetons);
- niedrige Permeabilität, keine Durchströmung, keine nennenswerten Stoffumsätze infolge diffusiver Prozesse;
- mittlere Porosität = 20 %;
- wirksame Porosität des nicht oder gering kompaktierbaren Versatzes = $2 \cdot 10^{-4}$ (d. h. 1 Promille des Porenwassers);
- relativer Anfangsfüllgrad des Salzbetons mit Flüssigkeit = 100 %.

²⁴ In diesem Szenario wird angenommen, dass der (korrodierte) Salzbeton die gleiche Stützwirkung wie Salzgrus der gleichen Porosität (anfänglich 20 %) aufweist. Der Salzbeton ist kompressibel und seine Porosität strebt im Verlauf der Zeit gegen Null.

4.2.1.2. Langzeitsicherheitsanalyse mit dem Programm EMOS [P 278]

Gemäß [P 278], Kapitel 5.3.1, werden mit dem Einbringen von Versatz in unverfüllte Grubenbaue folgende Ziele verfolgt:

- Stützung des Gebirges und
- Reduktion der Hohlraumvolumina.

Hinsichtlich einer guten Stützwirkung muss der Versatz mit einem hohen Verfüllgrad eingebracht werden und eine geringe Kompaktionsfähigkeit aufweisen. Außerdem soll die geringe Kompaktionsfähigkeit möglichst lange erhalten bleiben.

Hinsichtlich einer großen Hohlraumreduktion muss der Versatz mit einem hohen Verfüllgrad eingebracht werden und einen geringen zugänglichen Porenraum aufweisen. Die Eigenschaften des Versatzes sollen über eine möglichst lange Zeit erhalten bleiben.

Der Salzbeton wird als ein äußerst gering durchlässiges Material mit einer Porosität von ca. 20 % beschrieben. Der Porenraum ist weitgehend mit Flüssigkeit gefüllt. Wegen der geringen Durchlässigkeit ist der Porenraum gemäß [P 278] jedoch praktisch nicht zugänglich.

Gemäß [P 278], Kapitel 5.3.1, ist der Salzbeton ein äußerst steifes Material, so dass die Stützwirkung unmittelbar wirksam wird. Bei den Modellrechnungen wird von vollständig stützenden und vollständig hohlraumbeseitigenden Eigenschaften des Salzbetons ausgegangen. In [P 278], Kapitel 7.5, wird angegeben, dass bei der Modellierung der Konvergenz für Salzbeton und für Magnesiabeton von einer vollständigen Stützwirkung ausgegangen wird, so dass eine Konvergenz nicht zu betrachten ist.

Es wird in [P 278], Kapitel 5.3.1, des Weiteren angegeben, dass der Salzbeton gegenüber NaCl-Lösungen beständig, jedoch gegenüber magnesiumhaltigen Lösungen nicht beständig ist, so dass es zu einer Alterung des Materials und zu einer zunehmenden Verfügbarkeit der Porenlösung kommt. Die Porenlösung des Salzbetons wird in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit jedoch nicht berücksichtigt, da der Salzbeton aufgrund der geometrischen Verhältnisse nur wenig zugänglich ist.

Als Folge der Alterung des Salzbetons kommt es gemäß [P 278] auch zu einem langsamen Verlust der Stützwirkung. Es wird angenommen, dass aufgrund der geometrischen Verhältnisse nur ein kleiner Volumenanteil des Salzbetons betroffen sein wird. Zudem erfolgt die Abnahme der Stützwirkung sehr langsam, so dass gemäß [P 278] nur mit einer geringfügigen Zunahme der Konvergenzraten zu rechnen ist. Dieser Effekt wird als vernachlässigbar angesehen und in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit nicht berücksichtigt.

Aufgrund der geringen bzw. nicht zu gewährleistenden Zugänglichkeit des Salzbetons bleibt die Rückhaltung von Schadstoffen durch Sorption am Salzbeton in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit gemäß [P 278], Kapitel 5.3.1, unberücksichtigt. In [P 278], Kapitel 7.2.8, wird jedoch angegeben, dass bei der Modellierung der Freisetzung von Radium aus dem Radiumfass eine Sorption von Radium am Verfüllmaterial angenommen wird.

Gemäß [P 278], Kapitel 7.10.3, gilt:

„Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption und Ausfällung wurde experimentell untersucht [86]²⁵. Hierbei wurden pH-Werte zwischen 8 und 10 und Komplexbildnerkonzentrationen von bis zu 1 mol/m³ eingestellt.

Die pH-Werte der Experimente decken nicht die zu erwartenden Werte in den Einlagerungsgrubenbauen ab. Die Komplexbildnerkonzentrationen in den Einlagerungsgrubenbauen sind teilweise höher als in den Experimenten. Daher sind die gemessenen Rückhalteparameter nicht anwendbar. Aus diesem Grund wird als konservative Annahme für alle Radionuklide mit Ausnahme von C-14 und – in einigen Grubenbauen – von Ra-226 die Rückhaltung in den Einlagerungsgrubenbauen vernachlässigt.“

Aus [P 278], Kapitel 7.10.4, geht hervor, dass für den Streckenstummel im Ostfeld (Radiumkammer) und das Sohlenbohrloch angenommen wird, dass Radium am Salzbeton sorbiert, da sich das mobilisierte Radium aus der Radium-VBA auf dem Weg zu den übrigen Grubenbauen im Ostfeld diffusiv durch diesen Salzbeton bewegen muss. Der K_d -Wert wird auf 0,01 m³/kg geschätzt („*ungünstige Schätzung*“). Für andere Einlagerungsgrubenbaue, z. B. des Westfeldes, wird angenommen, dass der Salzbeton und dessen Korrosionsrückstände keine Sorptionsfähigkeit besitzen. Diese ungünstige Annahme trägt gemäß [P 278] einerseits der Tatsache Rechnung, dass über die Sorptionseigenschaften von korrodiertem Salzbeton unter möglichen reduzierenden Bedingungen wenig bekannt ist und andererseits, dass die Transportwege des Radiums in diesen Einlagerungsgrubenbauen nur zu einem sehr geringen Teil an den Salzbeton-Oberflächen vorbeiführen.

Es ergeben sich aus der LSA [P 278] folgende Annahmen zum Salzbetonversatz:

- geringe Kompaktionsfähigkeit, die möglichst lange erhalten bleibt;
- äußerst steif, unmittelbar wirksame Stützwirkung bzgl. Konvergenz;
- Beständigkeit gegenüber NaCl-Lösungen;
- Sorptionsfähigkeit für ²²⁶Ra am Salzbeton, K_d -Wert von 10 cm³/g;
- äußerst geringe Durchlässigkeit;
- Porosität ca. 20 %;
- Porenraum praktisch nicht zugänglich.

4.2.2. Bewertung

In den Modellen zur LSA nimmt das Porenwasser im Salzbeton nicht [P 278] bzw. praktisch nicht [P 277] am Grubenwasserhaushalt und am Stofftransport nach einem Volllaufen der Grube teil. Die entsprechenden Parameter (Gesamtporosität und wirksame Porosität) haben deshalb keinen Einfluss auf die Modellergebnisse.

Die Argumentation in [P 277] und [P 278], weshalb das Porenwasser des Salzbetons nicht am Grubenwasserhaushalt und am Stofftransport teilnehmen wird, ist plausibel. Es kann allerdings zu

²⁵ = Unterlage [NN 317]

Flüssen entlang von Vorzugsfließwegen wie spannungsbedingten Rissen in den Versatzkörpern und entlang der Firste von unvollständig verfüllten Grubenbauen kommen. Wir gehen jedoch davon aus, dass sich auch bei einer deutlichen Variation der Parameter Gesamtporosität und wirksame Porosität die berechneten Stoffausträge und Strahlenexpositionen nur wenig verändern. Dies wird Teil der Prüfung der LSA sein. Die Modellergebnisse des alternativen Szenarios „Korrosion des Salzbetons“ aus [P 277] sind ebenfalls plausibel. Sie werden Teil der Prüfung der LSA sein.

In beiden LSA wird die Beständigkeit des Salzbetons gegenüber NaCl-gesättigten Lösungen vorausgesetzt. Wir vermuten, dass hieraus vom BfS die Forderung nach Steinsalz als Zuschlag (vgl. A8) abgeleitet wurde²⁶. Spätestens beim Anmachen des Salzbetons würde sich das Anmachwasser durch Lösen des Zuschlags gegenüber NaCl aufsättigen. Die beim Abbinden entstehenden Mineralphasen wären gegenüber NaCl-gesättigter Lösung stabil.

Als zusätzliche Annahme verbleibt das Sorptionsvermögen gegenüber Radium, was zu einer entsprechenden Anforderung an den Salzbeton mündet. Diese Anforderung besteht jedoch nur für eine verglichen mit dem gesamten Verfüllvolumen sehr kleine Materialmenge, die im Bereich des Standorts des Radiumfasses eingesetzt werden soll. Wir sehen es nicht als zweckmäßig an, hieraus eine allgemeine Anforderung an den Salzbeton abzuleiten. Stattdessen sollte dies als eine spezielle Anforderung an Salzbeton mit besonderen Aufgaben (analog zu speziellen Anforderungen an Salzbeton zum Bau von Abdichtungen) behandelt werden.

Zusammenfassend kommen wir zu dem Ergebnis, dass sich – vorbehaltlich der oben erwähnten Überprüfung zum Einfluss der Parameter Gesamtporosität und wirksame Porosität auf die Modellergebnisse der LSA – aus den LSA über die Anforderungen aus den „Standortsicherheits- und Integritätsnachweisen“ hinaus nur die Forderung nach Steinsalzgrus als Zuschlagsstoff ergibt (ähnlich A8).

Wir weisen darauf hin, dass in beiden LSA die implizite Annahme enthalten ist, dass aus dem Versatz keine signifikanten Mengen natürlicher Radionuklide freigesetzt werden. Diese Annahme und die sich hieraus ergebende Anforderungen an das Freisetzungsvermögen der Nuklide aus dem Versatz rechnen wir dem Langzeitsicherheitsnachweis im Hinblick auf den Gewässerschutz zu.

4.3. Bewertung der Anforderungen

Im Folgenden bewerten wir die in Kapitel 3.1.7 zusammengestellten Anforderungen aus [G 228] hinsichtlich (vermutetem) Ursprung, Begründung und Zweckmäßigkeit. Aufgrund des Fehlens der abschließenden Sicherheitsnachweise, des Herstellungsnachweises und des Nachweises der Optimierung ist diese Bewertung vorläufig.

(A1) Das Verfüllmaterial soll zu einem Versatzkörper erstarren.

Nach unserem Verständnis leitet das BfS diese Forderung aus einer Optimierung ab. Weiterhin ist sie Voraussetzung für den Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere und des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen. Ob sie auch Voraussetzung für den Nachweis der berg-

²⁶ Da das BfS die Forderung (A8) nicht begründet, ist unklar, ob diese Forderung aus den LSA abgeleitet wurde. Im Folgenden unterstellen wir, dass mit (A8) als Zuschlag ausschließlich Steinsalz gefordert wird und hierdurch die chemische Beständigkeit des Salzbetons gegenüber NaCl-gesättigter Lösung erreicht werden soll.

männischen Sicherheit untertage ist, ist gegenwärtig unklar, da es zu diesem Nachweis widersprüchliche Angaben gibt (vgl. [BS 11b]).

In [BS 13] kamen wir zu dem Ergebnis, dass vom BfS begründet werden sollte, weshalb auch solche Hohlräume mit Salzbeton (und nicht mit einem Material mit gas- oder wasserzugänglichem Porenraum) verfüllt werden sollen, die zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit keiner stützenden Vollverfüllung bedürfen.

Für die Hohlräume, die aus Gründen der Langzeitsicherheit einer stützenden Vollverfüllung bedürfen, ist die Anforderung A1 erforderlich und sachgerecht.

(A2) Es sollte möglichst keine Verwendung von Zusatzmitteln erfolgen. Falls doch, dann müssen sie der DIN EN 934 Teil 2 entsprechen.

Vom BfS wird diese Forderung nicht begründet. Wir vermuten, dass sie aus Gründen der besseren Prognosefähigkeit der chemischen Langzeitbeständigkeit erhoben wird. Dies wäre dann eine Anforderung aus dem Herstellbarkeitsnachweis. Wir empfehlen, dass das BfS diese Anforderung begründet und bzgl. der Einschränkung „möglichst“ präzisiert.

Ein Vorteil dieser Anforderung ist es, dass sich durch den Ausschluss oder die Einschränkung von Zusatzmitteln der Umfang der erforderlichen Erst-/Eignungsprüfungen verringert. Sofern dies die einzige Begründung für diese Anforderung ist, wäre die Anforderung eine zusätzliche, nicht genehmigungsrelevante Anforderung.

Die Anforderungen (A3), (A4) und (A5) betreffen den konventionellen Arbeitsschutz und werden von uns nicht bewertet.

(A6) Grundsätzlich sind Betonzusatzstoffe des Typs II einsetzbar.

Sofern unsere Lesart („Grundsätzlich sind auch (*und nicht nur*) Betonzusatzstoffe des Typs II einsetzbar.“) zutreffend ist, ist dies keine Anforderung.

(A7) Bei Bindemitteln oder Zusatzstoffen, die nicht den DIN- oder europäischen Normen entsprechen, ist die Unbedenklichkeit des Verfüllmaterials im Hinblick auf sein Elutionsverhalten nachzuweisen (Ausnahme: Chlorid).

Diese Anforderung resultiert aus dem Langzeitsicherheitsnachweis hinsichtlich des Schutzes des Grund- und Oberflächenwassers. Dieser Nachweis wurde vom BfS zurückgezogen und es liegt bislang keine revidierte Fassung vor. Der zurückgezogene Nachweis basierte auf Annahmen zu maximal eluierbaren Stoffgehalten des Verfüllmaterials. Unter der Annahme, dass vom BfS diese Art der Nachweisführung auch künftig gewählt wird, wären folgende Ergänzungen erforderlich:

- In der Nachweisführung müsste dargelegt werden, wie der langfristige Stoffaustrag aus dem Versatzmaterial in der vollgelaufenen Grube mit im Labor zu messenden Größen korreliert ist.
- Die im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung und ggf. der Qualitätssicherung im Labor zu messenden Größen müssten präzisiert werden (z. B. durch Verweis auf eine DIN, in der die Durchführung der Messungen festgelegt wird).
- Für die zulässigen Messwerte am Verfüllmaterial sind konkrete Zahlenwerte anzugeben.

Die Zweckmäßigkeit der Vorgehensweise und der resultierenden Anforderungen können wir erst nach deren Darlegung bewerten.

(A8) Die Gesteinskörnung („Zuschlag“) muss Salzgrus enthalten.

Diese Anforderung bedarf der Präzisierung und Begründung.

Wir vermuten, dass hier gefordert wird, dass die Gesteinskörnung ausschließlich aus Salzgrus bestehen soll und dass dieser praktisch vollständig aus Steinsalz bestehen soll. Ausgehend von dieser Vermutung vermuten wir weiter, dass diese Anforderung zum Nachweis der chemischen Langzeitbeständigkeit im Fall eines Volllaufens der Grube dienen soll. Beim Anmachen des Salzbetons würde sich das Anmachwasser durch Lösen des Zuschlags gegenüber NaCl aufsättigen. Die beim Abbinden entstehenden Mineralphasen wären gegenüber NaCl-gesättigter Lösung stabil. Dies würde im Fall eines Volllaufens der Grube die Wahrscheinlichkeit und Umfang einer chemischen Zersetzung des Salzbetons verringern. Über die Bedeutung dieses Sachverhalts hinsichtlich der Langzeitsicherheit können wir gegenwärtig keine Aussagen machen, wir schätzen sie jedoch eher gering ein.

Wir halten es für möglich, dass die Forderung nach Einsatz von Salzgrus als Gesteinskörnung (auch) dazu dienen soll, die mechanischen Eigenschaften des Salzbetons (z. B. Kriechvermögen und thermische Ausdehnung) an die des Salzgebirges anzupassen und dass die geomechanischen Berechnungen auf diesen Annahmen beruhen.

Weiterhin könnte der Einsatz von Salzgrus zu einer Verringerung der Kosten und des Verbrauchs an natürlichen mineralischen Rohstoffen führen.

Wir erwarten, dass eine Anforderung ähnlich (A8) von Vorteil ist und aus dem Optimierungsgebot abgeleitet werden kann. Es könnte jedoch erforderlich sein, die Anforderung auf Steinsalz zu beschränken oder – ggf. in Abhängigkeit vom Bindemittel – einen Höchstgehalt an Mg-haltigen Salzmineralen zu fordern.

Eine Bewertung dieser Anforderung ist erst auf der Basis der oben geforderten Präzisierung und Begründung möglich.

(A9) Als Zugabewasser darf Trinkwasser oder in der Natur vorkommendes Wasser verwendet werden. Salzlösungen, Grubenwasser sowie Reinigungswässern aus der Misch- und Förderanlage dürfen verwendet werden, sofern sie nicht Bestandteile enthalten, die die Versatzeigenschaften verschlechtern.

Wir gehen davon aus, dass diese Anforderung aus dem Herstellbarkeitsnachweis resultiert. Wir vermuten, dass der zweite Teil der Anforderung aus Optimierungsüberlegungen im Zusammenhang mit der Entsorgung untertägiger Lösungen (z. B. den Grubenzuläufen an Lager H) resultiert. Dieser Teil der Anforderung bedarf der Präzisierung. Nach unserem Verständnis ist hier eine Verschlechterung relativ zu mit Trinkwasser hergestelltem Versatz gemeint. Es wird nicht angegeben, wie eine entsprechende Überprüfung zu erfolgen hat und welche Parameter im Einzelnen zu überprüfen sind. Wir halten es für möglich, dass sich die chemische Beständigkeit und ggf. auch die mechanischen Eigenschaften beim Einsatz von Wässern mit einem hohen Mg-Gehalt ungünstig verändern können.

(A10) Die Ausgangsstoffe müssen sich mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ dosieren lassen.

Wir vermuten, dass diese Anforderung aus dem Herstellbarkeitsnachweis resultiert. Die Anforderung ist keine reine Materialanforderung, sondern eine kombinierte Anforderung an Material und Dosiertechnik.

Nach unserem Verständnis ist im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung zu zeigen, dass die dort geprüften Ausgangsstoffe und die dort geprüfte Technik die zuverlässige Herstellung von Material mit den geforderten Eigenschaften ermöglichen. Sofern sich bei der Erst-/Eignungsprüfung herausstellt, dass nur bei Einhaltung der Anforderung A10 die Herstellung von Material mit den in den übrigen Anforderungen genannten Eigenschaften gewährleistet werden kann, ist sie genehmigungsrelevant. Andernfalls ist sie eine zusätzliche, nicht genehmigungsrelevante Anforderung (vgl. Kapitel 3.3.1.1).

(A11) Das Verfüllmaterial muss eine Konsistenz der Ausbreitklasse F4 nach DIN EN 206 oder fließfähiger aufweisen.

Gemäß [G 228] resultiert diese Anforderung aus dem Nachweis der Herstellbarkeit. Da dieser bislang nicht vorliegt, ist die Genehmigungsrelevanz dieser Anforderung nicht prüfbar.

In Kapitel 3.3.2 wiesen wir darauf hin, dass die Formulierung dieser Anforderung in [G 228] zu präzisieren ist (entweder ist dort die Konsistenz „fließfähig“ (entsprechend Ausbreitungsstufe F5) oder die Ausbreitungsstufe F4 (Konsistenz „sehr weich“) zu fordern).

Die geforderte Ausbreitungsstufe sollte begründet werden. Wir vermuten, dass sie aufgrund von entsprechenden Erfahrungen im Rahmen der bGZ gefordert wird.

(A12) Das Verfüllmaterial muss hydraulisch förderbar sein.

Diese Anforderung resultiert aus dem Nachweis der Herstellbarkeit. Sie ist erforderlich und sachgerecht (vgl. Kapitel 4.1.2.2).

(A13) Es ist nachzuweisen, dass Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen während des Förderprozesses sowie bei ruhender Suspension auszuschließen sind.

Gemäß [G 228] resultiert diese Anforderung aus dem Nachweis der Herstellbarkeit. Da dieser bislang nicht vorliegt, ist die Genehmigungsrelevanz dieser Anforderung nicht prüfbar.

Diese Anforderung ist zu präzisieren. Es ist nicht ersichtlich, wie der hier geforderte Nachweis erbracht werden soll.

(A14) Die Maximalkorngröße ist auf 20 mm begrenzt.

Wir vermuten, dass diese Anforderung aus dem Nachweis der Herstellbarkeit resultiert. Da dieser bislang nicht vorliegt, ist die Eignung der Anforderung nicht prüfbar. Der Zahlenwert sollte begründet werden. Wir vermuten, dass er aufgrund von entsprechenden Erfahrungen im Rahmen der bGZ gewählt wurde.

(A15) Der Fließwinkel muss beim Versturz in den Grubenbau geringer als 4° sein.

Gemäß [G 228] resultiert diese Anforderung aus dem Nachweis der Herstellbarkeit. Da dieser bislang nicht vorliegt, ist die Genehmigungsrelevanz dieser Anforderung nicht prüfbar.

Der Zahlenwert sollte begründet werden. Wir vermuten, dass er aufgrund von entsprechenden Erfahrungen im Rahmen der bGZ gewählt wurde.

(A16) Anlöse- und Umlöseprozesse an den Konturen der Abbaue durch den Versatzstoff müssen weitgehend vermieden werden.

Gemäß [G 228] resultiert diese Anforderung aus dem Nachweis der Herstellbarkeit. Da dieser bislang nicht vorliegt, ist die Genehmigungsrelevanz dieser Anforderung nicht prüfbar.

Diese Anforderung ist zu präzisieren. Es ist nicht ersichtlich, wie (oder nach welchen Kriterien) der Begriff „weitgehend“ auszulegen ist und wie die Erfüllung dieser Forderung zu zeigen ist.

Beim Einsatz von Salzbeton auf Zementbasis mit Steinsalzgrus als Körnung und NaCl-gesättigter Flüssigphase im angemachten Zustand kann ein An- und Umlösen an den Konturen in Steinsalzabbauen ausgeschlossen werden. In diesen Fällen würde die Erfüllung der Anforderungen (A8) und (A9) ausreichen, um auch (A16) zu erfüllen. Bei Abbauen im Kali lassen sich Löseprozesse bei Einbringen des Salzbetons nicht ausschließen. Eine Sättigung der Flüssigphase im angemachten Salzbeton gegenüber Kalisalzen dürfte nicht möglich sein, da dies die Eigenschaften des abgebundenen Salzbetons (auf Zementbasis) verschlechtern dürfte.

Sofern Maßnahmen zur Abdeckung aufgeschlossener Kalisalze ergriffen werden sollen (z. B. durch einen entsprechenden Anstrich), wäre dies keine Anforderung an das Verfüllmaterial.

(A17) Das Verfüllmaterial muss über eine ausreichende Kapazität verfügen, die Menge an Zugabewasser bzw. enthaltener Lösung vollständig chemisch und physikalisch zu binden.

Der Grund für diese Anforderung ist uns unklar. Denkbar sind die Gewährleistung der Arbeitssicherheit (Reduzierung von Feuchtekröchen), das Gebot zur Vermeidung unnötiger Kontaminationen gemäß § 6 Abs. 1 StrlSchV und der Herstellbarkeitsnachweis (Vermeidung von Löseprozessen an den Konturen der Abbau, siehe (A15)).

Eine Bewertung, ob die Anforderung genehmigungsrelevant ist, kann erst nach ihrer Ableitung aus dem Regelwerk und der Vorlage der erforderlichen Nachweise (Optimierung, Langzeitsicherheit, Herstellbarkeit und Einhaltung der gesetzlichen Sicherheitsanforderungen während der Stilllegung) erfolgen.

Die Anforderung müsste zudem präzisiert werden, da offen ist, wie die Erfüllung dieser Forderung zu zeigen ist.

(A18) Die adiabatische Temperaturerhöhung, die in Folge der Reaktionsprozesse auftritt, ist für den Versatz bei einem theoretischen Hydratations- bzw. Erhärtingsgrad von 100 % auf 55 K zu begrenzen.

(A19) Es sind Bindemittel zu verwenden, die im Sinne der DIN EN 197-1 eine niedrige Hydratationswärmeentwicklung aufweisen.

Gemäß [G 228] resultieren diese Anforderungen aus dem Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere und dem Nachweis des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen oder Hebungen („Schutz der Tagesoberfläche“ [G 228]). Nach unserer Einschätzung sind die beiden

Anforderungen für den Schutz von Personen und Sachgütern vor Senkungen oder Hebungen nicht erforderlich.

Aus [P 218] geht hervor, dass diese Anforderungen aus einem „*Nachweis der Geringfügigkeit von Temperaturerhöhungen am Salzspiegel*“ und einem „*Nachweis der Geringfügigkeit der Temperaturerhöhung in der jeweils obersten Anhydritscholle, wenn der Anhydrit ein potentieller Lösungspfad ist*“ resultieren.

Als Kriterium für die zulässige Temperaturerhöhung am Salzspiegel wird 1 K angegeben²⁷. Diese Begrenzung soll dazu dienen, „*eine Beeinflussung der Deckgebirgswässer von vorneherein zu vermeiden*“. Es bleibt unklar,

- ob durch diese Anforderung die Bildung neuer Wasserwege am Salzspiegel ausgeschlossen werden sollen (sie wäre dann den Nachweisen der Langzeitsicherheit hinsichtlich der Einhaltung der Dosiskriterien und hinsichtlich des Schutzes des Grund- und Oberflächenwassers zuzurechnen) oder
- ob eine Temperatur von über 1 K als nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit (i. S. von § 48 WHG) angesehen wird, die zu vermeiden ist (die Anforderung wäre dann dem Nachweis des Schutzes des Grund- und Oberflächenwassers zuzurechnen).

Als Kriterium für die „ertragbare“ Temperaturerhöhung in der Anhydritscholle werden 2 K angegeben²⁸. Diese Begrenzung soll dazu dienen, „*die Schaffung neuer Wegsamkeiten zu vermeiden*“.

Da es in den Antragsunterlagen kein Dokument gibt, in dem die aus Sicht des BfS bestehenden Nachweiserfordernisse und die Führung der entsprechenden Nachweise zusammengefasst werden, bleibt unklar, welche Rolle die hier geforderten Begrenzungen der Temperaturerhöhung in der Nachweisführung des BfS spielen. Es ist möglich, dass das BfS diese Anforderungen als zwar aus qualitativen Überlegungen resultierende, aber dennoch verbindliche Anforderungen ansieht, um den bestehenden Ungewissheiten hinsichtlich der tatsächlichen geologischen Verhältnissen und der ablaufenden Prozesse (die in den Modellen stark idealisiert beschrieben werden) Rechnung zu tragen. Dann wären diese Anforderungen als verbindlich festzuschreiben.

Es ist jedoch auch möglich, dass das BfS die Temperaturerhöhungen nur als Indikatoren ansieht, die vorsorglich möglichst geringe Werte annehmen sollten. Die angegebenen Kriterien wären dann als Orientierungsgrößen anzusehen, die nicht streng eingehalten werden müssen, bei deren Einhaltung aber ein zusätzliches qualitatives Argument für die Sicherheit des ERAM bestünde. Dann wären die Anforderungen unverbindlich und nicht genehmigungsrelevant.

In [BS 11a] kamen wir zu der Empfehlung, dass im Rahmen des Nachweises zur Integrität der geologischen Barriere ein rechnerischer Nachweis geführt werden sollte, dass die Spannungszustände in den relevanten Anhydritschollen unter Berücksichtigung thermischer Effekte zu keiner Rissbildung führen können (F 9). Weiterhin empfehlen wir eine systematische Zusammenstellung

²⁷ „[.]. wird konservativ die Temperaturerhöhung am Salzspiegel in Folge der Hydratationswärme begrenzt. Ein Wert von ca. 1 K ist sinnvoll ...“ [P 218] S. 16

²⁸ „Im Anhydrit wird eine Temperaturerhöhung von unter 2 K als ertragbar angesehen.“ ([P 218], S. 16)

aller aus Sicht des BfS bestehenden Nachweiserfordernisse und ihre Ableitung aus bzw. Einordnung in die Anforderungen aus dem gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerk (F1 bis F4).

Im Plan [A 281], Kapitel 5.1, wird angegeben, dass der Nachweis der Standsicherheit während des Stilllegungsbetriebs auf der Basis von numerische Berechnungen erfolgte. „*Diese Berechnungen berücksichtigen die Bereiche [...] mit dem größten Wärmeeintrag durch abbindenden Baustoff. Dadurch können die rechnerischen Nachweise mittels Plausibilitätsbetrachtungen auf die anderen Feldsteile übertragen werden [...]*“. Diese Ausführung legt nahe, dass die Forderungen (A18) und (A19) auch zur Gewährleistung der Standsicherheit der Grube während des Stilllegungsbetriebs dienen. Sie wären dann in jedem Fall genehmigungsrelevante Anforderungen.

Da die Empfehlungen F1 bis F4 bislang nicht umgesetzt wurden und uns die überarbeiteten Nachweise zu F9 noch nicht vorliegen, können wir nicht bewerten, ob es sich bei den Anforderungen A18 und A19 um genehmigungsrelevante oder um zusätzliche Anforderungen handelt.

- (A20) **Der statische Elastizitätsmodul des Versatzes muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) einen Mittelwert von mindestens 6.000 MPa aufweisen.**
- (A21) **Das Verfüllmaterial muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) mindestens der Festigkeitsklasse C8/10 gemäß DIN EN 206 bzw. DIN 1045 Teil 1 entsprechen.**
- (A22) **Die einaxiale Zugfestigkeit des Versatzes muss nach einer Erhärtungs- bzw. Abbindezeit von 56 Tagen (Lagerung bei Raumtemperatur) einen Mittelwert von mindestens 0,7 MPa aufweisen.**

Gemäß [G 228] resultieren diese Anforderungen aus dem Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere und dem Nachweis des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen. Allerdings weichen die geforderten Materialparameter von denen in den Nachweisen ab. Diese Abweichungen sollten begründet werden bzw. die Nachweise sollten entsprechend erweitert werden.

- (A23) **Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient des Verfüllmaterials darf im Durchschnitt nicht höher als der des Steinsalzes ($4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) sein.**

Gemäß [G 228] resultiert diese Anforderung aus dem Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere. Allerdings weicht der geforderte Materialparameter von dem in den Nachweisen ab. Diese Abweichung sollte begründet werden bzw. die Nachweise sollten entsprechend erweitert werden.

5. EIGNUNG DES SALZBETONS M3 ALS VERFÜLLMATERIAL

Gemäß Kapitel 3 wurde vom Antragsteller eine Reihe von Anforderungen an das Verfüllmaterial vorgegeben und laut Plan Stilllegung wurde mit Salzbeton der Rezeptur M3 ein definiertes Material(gemisch) als Verfüllmaterial ausgewählt. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Auswahl auf der Grundlage der Ergebnisse einer Erst-/Eignungsprüfung²⁹ zum Verfüllmaterial erfolgte. Eine solche Erst-/Eignungsprüfung wird dementsprechend im Plan Stilllegung [A 281] angekündigt, in [G 228] gefordert und in [P 229] vorausgesetzt.

Allerdings liegt nach unserer Kenntnis keine vollständige Dokumentation zu dieser Erst-/Eignungsprüfung vor. Daher werden nachfolgend die vorliegenden Angaben zu den Eigenschaften des Versatzbetons M3 zusammengestellt. Dazu liegen uns die Unterlagen [P 221], [U 2], [U 3] und [U 4] vor. Die aktuellste dieser Unterlagen ist [P 221]. Sie fasst den Kenntnisstand von Materialparametern des Baustoffes zusammen, enthält eine Beschreibung der Ausgangsstoffe sowie der Rezeptur des Salzbetons M3 und verschafft einen Überblick über die Durchführung und die Resultate von rheologischen, physikalischen und thermodynamischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 5.1).

Die Unterlagen [U 2], [U 3] und [U 4] beziehen sich auf Untersuchungen an Salzbetonmischungen zur Verwendung bei der bGZ (vgl. Abschnitte 5.2 bis 5.4).

5.1. Angaben in [P 221]

Gemäß [P 221] Kapitel 3 hält der Salzbeton als Trockenmischung und unter Zusatz von Wasser die in den Prüfbestimmungen des Landesoberbergamtes Nordrhein-Westfalen aufgeführten Grenzwerte ein. Vom Bergamt Staßfurt wurde für den Salzbeton eine allgemeine Zulassung gemäß § 4 Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung, GesBergV) mit der Zulassungsnummer 34001-4841-GesBergV-M5300 erteilt.

5.1.1. Ausgangsstoffe und Rezeptur

Der Salzbeton nach der Rezeptur M3 besteht gemäß [P 221] und [A 281] aus folgenden Komponenten:

- 9,9 Massen-% Zement CEM III/B 32,5 - NW/HS/NA nach DIN EN 197 Teil 1
- 23,0 Massen-% Steinkohlenflugasche (Elektrofilterasche) HKV nach DIN EN 450
- 12,6 Massen-% Leitungswasser
- 54,5 Massen-% Salzgrus (Salzzuschlag).

²⁹ Unter Berücksichtigung der Angaben in den Unterlagen [G 228] und [P 229], denen zufolge die Bestimmung der Materialeigenschaften sowie die Überwachung der Versatzqualität – soweit möglich – auf Normen und Richtlinien aus den Bereichen der Betontechnologie bzw. der Prüfung und Überwachung von Baustoffen basiert, verwenden wir nachfolgend anstelle der in den Planunterlagen enthaltenen Bezeichnung ‚Eignungsprüfung‘ den Begriff ‚Erst-/Eignungsprüfung‘, da u. a. in der DIN EN 406 Teil 1 und der DIN 1045 Teil 2 nicht die Eignungsprüfung, sondern die Erstprüfung geregelt wird.

Der Salzzuschlag stammt aus dem laufenden Aufbereitungsbetrieb des Kaliwerkes Zielitz. Er zeigt bei Verwendung von Material unterschiedlicher Körnung einen veränderlichen Wasseranspruch. Es handelt sich um einen Rückstand der Flotation (Körnung 1, enges Körnungsband, Größtkorn von 2 mm) oder um eine Mischung von Flotations- und Heißlösebetriebsrückständen (Körnung 2, breites Körnungsband, Größtkorn von 5 bis 16 mm). Der Anteil des Heißlöserückstands beträgt ca. 30 %.

5.1.2. Rheologische Untersuchungen

An Frischbeton mit Salzzuschlag der Körnung 2 wurden Untersuchungen zum Fließ- und Förderverhalten des Salzbetons durchgeführt:

- Mit einem Rotationsviskosimeter wurde die Viskosität bzw. das Fließverhalten bestimmt. Es erfolgte jeweils 1 Messung nach 0, 30, 60 und 90 Minuten. Gemäß [P 221] belegen die erzielten Werte für den Strukturexponenten von < 1 (max. 0,55) ein strukturviskoses bzw. pseudoplastisches Fließverhalten der Suspension. Die Förderung der Suspension ist gemäß [P 221] nach einer Stationierungsdauer von 90 Minuten noch möglich.

Bemerkung:

Eine Flüssigkeit wird als strukturviskos bezeichnet, wenn ihre Viskosität (Zähigkeit) η bei zunehmender Schubspannung τ abnimmt. Eine pseudoplastische Flüssigkeit ist eine Flüssigkeit, deren Viskosität unterhalb einer gewissen Grenze für die Schubspannung konstant ist (die sich unterhalb dieser Grenze wie eine „normale“ (newtonsche) Flüssigkeit verhält), deren Viskosität aber oberhalb dieser Grenze abnimmt.

Teilweise (und auch in [P 221]) wird zur empirischen Beschreibung der Schubspannung in einer nicht-newtonschen Flüssigkeit ein Potenzansatz („Herschel-Bulkley-Beziehung“) verwendet:

$$\tau(\dot{\gamma}) = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

mit der Fließgrenze τ_0 , dem Konsistenzfaktor k , der Schergeschwindigkeit³⁰ $\dot{\gamma}$ und dem Fließindex n . Elastoplastisches Verhalten entspricht in diesem Ansatz $n < 1$.

In [P 221] wird für die Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ der veraltete Begriff Schergefälle und das Symbol γ verwendet. Für den Fließindex wird dort die Bezeichnung Strukturexponent verwendet.

- Der Salzbeton wurde in einem Rohrviskosimeter untersucht mit dem Ziel, die Fließeigenschaften unter Berücksichtigung unterschiedlicher Stationierungszeiten und variierender Wassergehalte zu ermitteln.
 - Es wurden 6 Suspensionen getestet, die einen Wasseranteil von 12,2 bis 13,7 Massen-% aufwiesen, d. h. eine Abweichung des Wassergehaltes vom Sollwert von -4 bis +10 %. Gemäß [P 221], Tabelle 10-2, erfolgte eine Messung je Suspension.

³⁰ Die Schwergeschwindigkeit $\dot{\gamma} \equiv \partial v / \partial r$ gibt den Gradienten der Fließgeschwindigkeit senkrecht zur Fließrichtung an.

Die Ergebnisse belegen gemäß [P 221] das pseudoplastische (strukturviskose) Fließverhalten sowie eine Fließgrenze zwischen 5,5 bis 12,7 Pa. Die Druckverluste steigen bei abnehmendem Wassergehalt der Suspension überproportional an und scheinen sich bei zunehmendem Wasseranteil einem Grenzwert anzunähern. Gemäß [P 221] ist die hydraulische Förderung der Suspension bei den vorgesehenen Rohrnennweiten und Wassergehaltsabweichungen unproblematisch.

- Gemäß [P 221] war für eine Förderleistung von 55 m³/h keine Abhängigkeit der Fließgrenze und der Druckverluste von der Stationierungszeit nachweisbar. Für eine Förderleistung von 45 m³/h war nach 5-stündiger Stationierung im Vergleich zu der Messung nach 20- bis 30-minütigem Förderprozess gemäß [P 221] nur eine für den praktischen Betrieb unkritische Erhöhung der Druckverluste festzustellen.
- Das Ausbreitmaß des Frischbetons, mit dem die Konsistenz des Salzbetons beurteilt werden kann, wurde mit 3 Versuchsreihen für unterschiedliche Luftfeuchtigkeitsbedingungen bestimmt. Es entspricht gemäß [P 221] in Bezug auf die DIN EN 206 Teil 1 bis zu einer Abbindezeit von 45 Minuten der Ausbreitklasse F6, nach 60 Minuten den Ausbreitklassen F5 und F4 und nach 90-minütiger Abbindezeit der Ausbreitklasse F4.
- Der Fließwinkel wurde gemäß [P 221] in einer 2 m langen Plexiglasrinne zu 2,15 %, d. h. 1,2°, ermittelt. Wir vermuten, dass es sich dabei um einen Einzelversuch handelt.

5.1.3. Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten

Im Rahmen der Förderversuche bei variierendem Wassergehalt wurden am Salzbeton mit Salzzuschlag der Körnung 2 Untersuchungen zur Kornsedimentation durchgeführt. Die 6 Suspensionen wurden in Standzylinder eingefüllt und diese abgedeckt. Nach dem Abbinden wurden die Probenkörper in der Längsachse aufgeschnitten und visuell beurteilt. Gemäß [P 221] wurde ein einheitliches Korngefüge der Proben festgestellt. Anzeichen für Kornsedimentation bzw. Absetzerscheinungen lagen nicht vor.

5.1.4. Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung

Es erfolgten Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung, bei denen 6 Suspensionen mit unterschiedlichem Zugabewasseranteil und unterschiedlichen Mischzeiten in 1000-ml-Standzylinder eingefüllt wurden. Nach 24 Stunden wurde visuell die Höhe der Überstandswasserschicht bestimmt. Die Höhe der Flüssigkeitsschicht lag bei den untersuchten Suspensionen zwischen 0 und 13 mm bei einer Probenhöhe von 36 cm. Gemäß [P 221] nimmt die Menge an Überstandslösung mit dem Anteil der Anmischflüssigkeit nahezu proportional zu. Für den Wasseranteil der Originalrezeptur betrug der Messwert 5 mm.

Des Weiteren sind in [P 221] Ergebnisse von Untersuchungen zur Abhängigkeit der Bildung der Überstandslösung von der Mischzeit im Labormischer angegeben. Diese Untersuchungen liefen über mehr als 9 Tage, um Aussagen über die Bindung der Überstandslösung im Salzbeton zu erhalten. Gemäß [P 221], Tabelle 10-3, wurde die Originalrezeptur mit drei Mischzeiten (2, 4 und 8 Minuten) getestet.

Gemäß [P 221] belegen die Ergebnisse, dass

- die Menge an Überstandslösung mit zunehmender Mischzeit und damit mit zunehmendem Eintrag von Scherenergie ansteigt,
- die Bildung von Überstandslösung unabhängig von der Mischzeit spätestens nach 5 Stunden abgeschlossen ist und
- die Überstandslösung im weiteren Verlauf des Hydratationsprozesses vom Salzbeton vollständig gebunden wird.

Anmerkung: Es wird in [P 221] nicht angegeben, welcher Körnung der dem Salzbeton zugesetzte Salzgrus entsprach. Da die Versuche mit Suspensionen der gleichen Wassergehalte durchgeführt wurden, die auch bei den rheologischen Untersuchungen und zum Sedimentationsverhalten verwendet wurde, vermuten wir, dass auch bei den hier betrachteten Untersuchungen Salzgrus der Körnung 2 (Größtkorn zwischen 5 mm und 16 mm) verwendet wurde.

5.1.5. Übertragung von Untersuchungsergebnissen des Salzbetons M2

Gemäß [P 221] können die Ergebnisse ergänzender Untersuchungen zu Rheologie, Sedimentationsverhalten und Bildung von Überstandslösung, die mit Salzbeton der Rezeptur M2 durchgeführt wurden, auf Salzbeton M3 übertragen werden, da sich die beiden Salzbetone lediglich im Verhältnis von Zement und Flugasche unterscheiden.

Auch die während der Durchführung der bGZ erfolgten Messungen zur Quantifizierung der Menge an Überschusswasserlösung können gemäß [P 221] zur Bewertung des Salzbetons M3 herangezogen werden, da die Rezeptur nahezu identisch ist und die verwendeten (nicht identischen) Steinkohlenflugaschen beide der DIN EN 450 entsprechen.

Rheologische Untersuchungen im Rohrviskosimeter

Zusätzliche Versuche am Salzbeton M2 zum Einfluss unterschiedlicher Korngrößenverteilungen des Salzzuschlages auf das rheologische Verhalten des Frischbetons zeigten gemäß [P 221], dass der Einfluss der Korngröße des Salzzuschlages von untergeordneter Bedeutung ist. Suspensionen, die ausschließlich Flotationsrückstand (< 2 mm) enthielten, wiesen tendenziell etwas höhere Druckverluste auf, die gemäß [P 221] aber fördertechnisch ohne Relevanz sind. Suspension, zu deren Herstellen ausschließlich grobkörniger Heißlöserückstand (< 20 mm) verwendet wurde, war nicht förderbar. Dies war gemäß [P 221] jedoch auf die versuchstechnischen Rahmenbedingungen (Rohrleitung der Nennweite DN 40) zurückzuführen.

Untersuchungen zum Sedimentationsverhalten

In [P 221] wird dargestellt, dass bei einer Anwendung einer Berechnungsmethode zur „Sedimentationsstabilen Korngröße“ unter Berücksichtigung der bekannten Korngrößenverteilungen von Salzzuschlag, Steinkohlenflugasche und Zement sowie der für die Salzbetone ermittelten Fließgrenzen, die auch bei einem um 10 % erhöhten Wassergehalt nicht unter 6 Pa lagen, eine Sedimentation von Salzbetonbestandteilen bzw. deren Entmischung ausgeschlossen werden kann.

Die zusätzlich mit den Salzbetonen M2 und M3 durchgeführten Versuche zur Kornsedimentation ergaben gemäß [P 221] keine Anzeichen für Sedimentations- bzw. Absetzerscheinungen. Proben des Salzbetons M2 mit feinkörnigem Flotationsrückstand als Salzzuschlag (Körnung 1) zeigten gemäß [P 221] ebenso ein einheitliches Korngefüge und bestätigen diesen Befund.

Zur Untersuchung möglicher Entmischungserscheinungen der Salzbetonkomponenten im Verlauf der Verfüllung untertägiger Hohlräume erfolgte ein Freifallversuch im ERAM mit Salzbeton der Rezeptur M2. Die Untersuchung von in die Stöße des Versatzkörpers gestoßenen Bohrungen zeigte gemäß [P 221] eine formschlüssige Anbindung des Versatzkörpers am Steinsalzstoß und am Mauerwerk. Visuelle und labortechnische Untersuchungen an den Bohrkernen bzw. daraus gewonnenen Proben ergaben gemäß [P 221], dass Entmischungen der Salzbetonkomponenten auszuschließen sind.

Untersuchungen zur Bildung von Überschusslösung

Gemäß [P 221] ergaben Untersuchungen zur Bildung von Überstandslösung, dass sich bei Salzbetonen der Rezepturen M2 und M3 vergleichbare Mengen an Überstandslösung bilden.

Aus Untersuchungen zum Absetzverhalten der Rezeptur M2 (Salzzuschlag der Körnung 2) ergab sich, dass die maximalen Schichthöhen der Überstandslösungen nach Standzeiten von 8 bis 24 Stunden ermittelt wurden und nach 4 Tagen in 9 von 12 Versuchen keine Lösungsschicht mehr nachweisbar war.

Das Ergebnis der chemischen Analyse der Überstandslösung zeigt gemäß [P 221], dass die Lösung gesättigt an Halit (NaCl), Anhydrit (CaSO_4) und Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sowie übersättigt an Calcit (CaCO_3) ist. Aufgrund der Sättigungsverhältnisse sind gemäß [P 221] Anlöseerscheinungen von Anhydrit- und Carbonatgesteinen sowie von Steinsalz im Rahmen der Verfüllung untertägiger Hohlräume vernachlässigbar.

Des Weiteren wurde an Proben des bei der bGZ verwendeten Salzbetons die Gesamtmenge an Überschusslösung ermittelt. Die Messungen begannen unmittelbar nach dem Anmischen der Suspensionen, es wurde keine zusätzliche Scherenergie in den Salzbeton eingebracht.

Gemäß [P 221] ergaben die Messungen, dass

- Überstandslösung nicht auftrat, d. h. die Menge an Dränagelösung der Gesamtmenge an Überschusslösung entsprach,
- der Anteil der Dränagelösung am Salzbeton von 0,7 Massen-% (Wassergehalt der Suspension 6 % unter Sollwert) auf ca. 1,4 Massen-% (Wassergehalt der Suspension 10 % über Sollwert) anstieg und
- die Menge im Salzbeton verbleibender Lösung (Differenz der Gesamt- und Dränagelösung) von 16,8 Massen-% auf 18,6 Massen-% zunahm.

Weitere Untersuchungen ergaben gemäß [P 221], dass mit zunehmendem Eintrag von Scherenergie (z. B. infolge eines Transportes der Suspension in Rohrleitungen) die Menge an Überschusslösung (Dränagelösung) ansteigt.

Es erfolgten Modifikationen des Salzbetons mit dem Ziel, die Menge an Überschusslösung signifikant zu reduzieren. Gemäß [P 221] belegen die Ergebnisse von Untersuchungen zum Einsatz von Calciumchlorid-Lösung (ca. 15 bis 25 kg/m³ 34 %ige CaCl₂-Lösung), dass bei Gewährleistung der Materialanforderungen an den Salzbeton

- mit zunehmender Menge an Calciumchlorid ein Trend zur Abnahme der Menge an Dränagelösung festzustellen ist und
- infolge der Verwendung von Calciumchloridlösung im Vergleich zum nicht modifizierten Salzbeton die Menge der Dränagelösung um mehr als die Hälfte reduziert werden kann.

Gemäß [P 221] ergaben zusätzliche Indexversuche auch beim Einsatz weiterer Betonzusatzmittel und -stoffe vergleichbare Resultate.

5.1.6. Physikalische Untersuchungen

Bemerkung: Gemäß [G 228] sind bei der Bestimmung von physikalischen Materialeigenschaften unverdichtete Probekörper zu untersuchen, die 56 Tage bei Raumtemperatur lagerten. Nach den Angaben in [P 221] erfolgte die Lagerung allerdings nur zum Teil bei Raumtemperatur, häufig auch bei Temperaturen von 40 °C. Zudem liegen nur wenige Ergebnisse für den Prüfzeitpunkt „56 Tage“ vor.

Festmaterialdichte

Mittels Bestimmung der Festmaterialdichte (je 1 Messwert nach 7, 14, 28, 42, 56, 90 und 245 Tagen) wurde gemäß [P 221] ermittelt, dass keine Beeinflussung der Betondichte in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen (Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit) erkennbar ist.

Statischer E-Modul

Gemäß [P 221] wurden weitgehend nach DIN 1048 Teil 5 die Elastizitätsmoduli nach 7, 14, 28, 90, 270 und 530 Tagen Abbindezeit und unterschiedlichen Lagerungstemperaturen ermittelt. Es erfolgten jeweils drei Messungen mit Ausnahme der Messungen nach 270 Tagen (6 Stück) und 530 Tagen (5 Stück³¹). Die E-Moduli nehmen mit der Abbindedauer deutlich zu von i. M. 500 N/mm² bzw. 500 MPa nach 7 Tagen auf i. M. 20.900 N/mm² bzw. 20.900 MPa bei einem Prüfalter von 530 Tagen.

Bemerkung: Die Versuchsergebnisse sind in [P 221] in zwei Messreihen dargestellt. Reihe 1 reicht von 7 bis 28 Tagen Abbindedauer, Reihe 2 von 28 bis 530 Tagen Abbindedauer. Die Wahl dieser Messreihen wird nicht näher erläutert. Gemäß der Ergebnisdarstellung unterscheiden sie sich hinsichtlich der Lagerungstemperaturen, wobei diese Temperaturen bei der Reihe 2 voneinander abweichen. Es wird nicht deutlich, ob weitere Unterschiede hinsichtlich der Proben bzw. der Versuchsbedingungen bestehen.

Messergebnisse für den gemäß [G 228] vorgesehenen Zeitpunkt von 56 Tagen werden nicht angegeben.

³¹ Die Einzelergebnisse der Messungen nach 530 Tagen sind in [P 221] nicht enthalten.

Eine weitere Versuchsreihe erfolgte nach Abschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter für 4 Salzbetone mit unterschiedlichen Wassergehalten. 2 Salzbetone wurden nach einer Abbindezeit von 14 Tagen geprüft, alle 4 Betone nach 28 Tagen. Zusätzlich wurde eine Probe nach einer Abbindezeit von 28 Tagen getrocknet und nach einer Abbindezeit von 177 Tagen geprüft, nachdem sie zuvor 7 Tage in gesättigter NaCl-Lösung gelagert wurde.

Gemäß [P 221] ist keine Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Menge des Anmachwassers festzustellen.

Bemerkung: Im Rahmen der Erläuterung der physikalischen Untersuchungen wird in [P 221] nicht angegeben, welche Körnung der Salzzuschlag des untersuchten Salzbetons aufwies. Aufgrund des Verweises auf das Rohrviskosimeter vermuten wir, dass zumindest für die hier genannten Versuchsreihe Salzbeton mit einem Salzgruszuschlag der Körnung 2 verwendet wurde.

Die Messungen erfolgten nicht systematisch und die Messergebnisse streuen sehr stark. Sie lassen u. E. die in [P 221] enthaltenen Schlussfolgerungen nicht zu. Aus den genannten Gründen ist auch ein Einfluss der Lagerung in NaCl-Lösung nicht einschätzbar.

Messergebnisse für den gemäß [G 228] vorgesehenen Zeitpunkt von 56 Tagen werden nicht angegeben.

Querkontraktionszahl

Im Rahmen der Bestimmung der E-Moduli wurden gemäß [P 221] auch die Querkontraktionszahlen ermittelt³². Die Proben wurden bei 20 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach 7 Tagen Abbindezeit wurden 2 Proben geprüft, nach 14 und 28 Tagen Abbindezeit jeweils 3 Proben. Die Querkontraktionszahl reicht von i. M. 0,21 nach 7 Tagen bis i. M. 0,26 nach 28 Tagen.

Zusätzlich wurden nach 177 Tagen 2 Proben³³ untersucht, die in den ersten 28 Tagen bei 100 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert, anschließend getrocknet und 7 Tage vor der Prüfung in gesättigter NaCl-Lösung gelagert wurden. Diese Proben wurden nach Abschluss der Förderversuche im Rohrviskosimeter hergestellt, die Zugabewassermenge entsprach der Originalrezeptur. Die Querkontraktionszahl dieser Proben betrug i. M. 0,26.

Bemerkung: Die Ergebnisse bzw. die daraus zu ziehenden Schlussfolgerungen werden in [P 221] nicht kommentiert.

Einaxiale Druckfestigkeit

Es wurden zwei Versuchsserien zur Ermittlung der **Zylinderdruckfestigkeit** durchgeführt. Eine Serie umfasst die Untersuchung von je 4 Prüfkörpern nach 7 bis 28 Tagen Abbindedauer, die andere Serie je 3 (28, 42, 56, 90³⁴ und 245 Tage), 6 (270 Tage) bzw. 5 Prüfkörper (530 Tage³⁵).

³² Es wird nicht angegeben, welche Zugabewassermengen bei der Herstellung der geprüften Salzbetonproben verwendet wurden.

³³ In [P 221], Tabelle 10-5, ist für eine Abbindezeit von 177 Tagen nur ein Messwert angegeben.

³⁴ In [P 221], Tabellen 8.4-1 und 10-6, ist für die Abbindezeit von 90 Tagen zudem ein weiterer Mittelwert von 21,6 N/mm² dargestellt, zu dem keine Einzelwerte angegeben werden.

Die Ergebnisse reichen gemäß [P 221] von i. M. 1,46 N/mm² (7 Tage) bis i. M. 30 N/mm² (530 Tage). Nach 56 Tagen Abbindezeit wurden i. M. 19,6 N/mm² gemessen (Bandbreite 18,9 bis 20,1 N/mm²).

Zur Bestimmung der **Würfeldruckfestigkeit** diente gemäß [P 221] Material, das zuvor im Rohrviskosimeter gefördert wurde, d. h. 4 Salzbetonsuspensionen mit unterschiedlichen Zugabewassergehalten. Die Probenlagerung erfolgte bis 28 Tage bei einer Luftfeuchtigkeit von 100 % (relativ). Danach wurden die für die Messung nach 177 Tagen vorgesehenen Proben (3 Stück³⁶) getrocknet, und 7 Tage vor der Prüfung in gesättigter NaCl-Lösung gelagert. Gemäß [P 221] ist eine Zunahme der Würfeldruckfestigkeit auf maximal 16,7 N/mm² (Abbindezeit 28 Tage) festzustellen und es liegt keine eindeutige Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Wasseranteil der Salzbetonsuspension vor.

Bemerkung: Die Ergebnisse streuen stark. Dadurch werden eindeutige Schlussfolgerungen zur Abhängigkeit vom Zugabewasseranteil erschwert.

Zugfestigkeit

Gemäß [P 221] wurden an jeweils 3 Prüfkörpern Zugfestigkeiten nach einer Lagerungsdauer von 56 und 90 Tagen ermittelt. Die Ergebnisse liegen bei i. M. 1,35 N/mm² nach 56 Tagen (Bandbreite 1,31 bis 1,40 N/mm²) und i. M. 1,44 N/mm² nach 90 Tagen.

5.1.7. Thermodynamische Untersuchungen

Adiabatische Temperaturerhöhung beim Abbinden

Es erfolgten zwei Bestimmungen der Hydratationstemperaturen unter adiabatischen Bedingungen (Anstieg der Temperatur der hydratisierenden Probe proportional zur Wärmemenge). Gemäß [P 221] erreichte die ca. 7-tägige Bestimmung bei einer Starttemperatur von 30,1 °C eine adiabatische Temperaturerhöhung von 34,5 K. Bei einem weiteren Versuch mit einer Starttemperatur von 21,0 °C wurde nach 13 Tagen eine Temperaturerhöhung von 33,4 K festgestellt.

Bemerkung: In [G 228] wird der Nachweis gefordert, dass der Temperaturverlauf zu ermitteln ist unter adiabatischen Bedingungen bei einer Starttemperatur von 20 °C, bis die Temperaturerhöhung in einem Zeitraum von 2 Tagen geringer als 0,5 K ist. Der erste o. g. Versuch entspricht dieser Forderung nicht, da er eine zu hohe Starttemperatur aufweist und – gemäß [P 221], Tabelle 10-7 – im Zeitraum von 2 Tagen vor dem Versuchsabbruch eine Temperaturerhöhung von deutlich > 0,5 K zeigte.

Spezifische Wärmekapazität

Gemäß [P 221] wurde die isobare spezifische Wärmekapazität mittels Differentialthermoanalyse zu i. M. 0,92 J/(g•K) bestimmt.

³⁵ Die Einzelwerte der Messungen nach 530 Tagen sind in [P 221] nicht enthalten.

³⁶ In [P 221], Tabelle 10-6, ist für eine Abbindezeit von 177 Tagen nur ein Messwert angegeben.

Wärmeleitfähigkeit

Als Mittelwert von 4 Proben³⁷ wurde gemäß [P 221] eine Wärmeleitfähigkeit von 0,87 W/(m•K) ermittelt.

Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten erfolgte gemäß [P 221] an 90 Tage alten Prismen. Es ergab sich für die Aufheizphase (3 Messwerte) ein mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient von $2,85 \cdot 10^{-5}$ 1/K und für die Abkühlungsphase (60 °C bis 0 °C; 3 Messwerte) von $2,40 \cdot 10^{-5}$ 1/K.

Temperaturstabilität

Gemäß [P 221] wurden Salzbetonproben hinsichtlich Temperaturstabilität untersucht. Nach der Trocknung einer Probe wurde ein Massenverlust von 0,02 % berechnet. Bei Erhitzung einer Probe auf 800 °C trat gemäß [P 221] ein Massenverlust von $10,5 \pm 0,7$ % auf. Gemäß [P 221] sind die Massenverluste auf das Verdunsten bzw. Austreiben von Wasser zurückzuführen.

5.2. Angaben in [U 2]

In der Unterlage „Ergänzende Untersuchungen – Referenzmaterial Salzbeton M2“ [U 2] werden die Ergebnisse von Materialuntersuchungen vorgestellt, die im Vorfeld der bGZ-Maßnahmen an Salzbeton durchgeführt wurden. Die Rezeptur des untersuchten Salzbetons entspricht – wie bereits aus dem Titel von [U 2] hervorgeht – dem im Rahmen der Stilllegung für die qualifizierte Abdichtung von Strecken vorgesehenen Salzbeton M2. Die Übertragbarkeit der für diesen Salzbeton gewonnenen Ergebnisse auf den im vorliegenden Bericht betrachteten Salzbeton M3 wird in der Unterlage [P 221] diskutiert (vgl. Abschnitt 5.1.5).

5.3. Angaben in [U 3]

Die Unterlage „In-situ-Versuch zum Entmischungsverhalten der Salzbetonrezeptur M2“ [U 3] gibt die Ergebnisse wieder, die im Rahmen eines Freifallversuchs zur Beurteilung des Entmischungsverhaltens von Salzbeton M2 gewonnen wurden. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den im vorliegenden Bericht betrachteten Salzbeton M3 wird in der Unterlage [P 221] diskutiert (vgl. Abschnitt 5.1.5).

5.4. Angaben in [U 4]

In der Unterlage „Salzbetonrezeptur für die bGZ – Beschreibung der Rezeptur und Rezepturmodifikationsmöglichkeiten“ [U 4] werden Untersuchungsergebnisse zur Bildung von Überstandslösung vorgestellt und Möglichkeiten aufgezeigt, die das Ausfließen von Lösungen aus dem frischen Salzbeton reduzieren könnten. Resultate von Laborversuchen mit unterschiedlichen Betonzusatzmitteln und -zusatzstoffen werden zusammengefasst.

³⁷ Die Einzelwerte sind in [P 221] nicht enthalten.

Die Untersuchungen erfolgen an einem Salzbeton der Rezeptur Z1 HM, die sich von der Rezeptur M2 durch die Verwendung einer anderen Steinkohlenflugasche mit höherem Wasseranspruch unterscheidet. Bei den Versuchen wurde das Anmischwasser (Frischwasser) zudem z. T. durch eine Salzlösung ersetzt.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind u. E. nicht ohne weiteres auf den Salzbeton M3 übertragbar. Im Hinblick auf den Prüfgegenstand des vorliegenden Berichts sind der Unterlage [U 4] allerdings folgende Hinweise auf mögliche beeinflussende Prozesse bzw. Effekte im Zusammenhang mit der Herstellung der Salzbetonmischung zu entnehmen, die im Rahmen von Eignungsfeststellungen zu berücksichtigen sind:

- Der Wasseranspruch der Ausgangsstoffe, insbesondere der Steinkohlenflugasche und des Salzzuschlags, kann im Verlauf des Produktionsbetriebs variieren.
- Weitere Parameter wie z. B. die Salzbetontemperatur können das Fließvermögen des Salzbetons beeinflussen.
- Die Einhaltung einer definierten Fließfähigkeit des Frischbetons ist bei vollständiger Einhaltung der Rezepturvorgaben nicht möglich. Die Einstellung des Setzfließmaßes kann durch eine Korrektur der Menge der Anmischlösung erfolgen.
- Zusatzmittel (z. B. Stabilisierer, Fließmittel, Luftporenbildner, Erstarrungsbeschleuniger) können einige Betoneigenschaften günstig, andere jedoch ungünstig beeinflussen. Daher ist die Betonzusammensetzung bei Verwendung von Zusatzmitteln stets auf Grund einer Erst-/Eignungsprüfung festzulegen.
- Zusatzstoffe werden nach Typ I (inert) und Typ II (reaktiv) unterschieden. Zu Typ I zählen Anhydrit-, Basalt-, Bims-, Kalkstein-, Dolomit- oder Quarzmehle sowie Diatomeenerde. Ihre Wirkung auf das Abbindeverhalten des Betons ist gering oder vernachlässigbar. Reaktive Zusatzstoffe (Typ II; Flugaschen, Mikrosilica, Metakaolin oder Trassmehl) verändern das Abbindeverhalten des Betons.
- Labor- und Technikumsversuche ergaben, dass die Mischintensität und -dauer die Konsistenz des frischen Salzbetons beeinflusst.

5.5. Bewertung

Der Umfang und der Detailliertheitsgrad der erforderlichen Erst-/Eignungsprüfung hängen maßgeblich von den an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen ab. Die nachfolgenden Erläuterungen zum Umfang einer Erst-/Eignungsprüfung erfolgen unter Berücksichtigung der vom Antragsteller angegebenen Anforderungen. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, ist mangels ausführlicher Begründung derzeit allerdings offen, ob diese Anforderungen erforderlich, vollständig und sachgerecht sind.

Das Führen der erforderlichen Nachweise, dass die für das Verfüllmaterial geltenden Anforderungen mit dem vorgesehenen Material erfüllt werden, sollte im Rahmen einer vollständigen Erst-/Eignungsprüfung für das Verfüllmaterial erfolgen.

Wir unterstützen daher die in [G 228] enthaltene Forderung

„Im Rahmen der Eignungsprüfung ist nachzuweisen, dass sämtliche [...] Anforderungen an den Baustoff erfüllt werden.“

Dabei ist zu berücksichtigen und zu unterscheiden, ob sich die einzelnen Anforderungen auf den in die Grubenbaue eingebrachten Versatz (In-situ-Anforderungen) oder auf die Ausgangskomponenten der Materialmischung bzw. die hergestellte Materialmischung des Verfüllmaterial beziehen.

Bei der im Plan Stilllegung genannten Rezeptur M3 handelt es sich nach unserem Verständnis lediglich um eine Grundrezeptur mit den Zielwerten der verschiedenen Komponenten. Es ist u. E. nicht möglich, die gesamte Verfüllung des ERAM mit einem Salzbeton durchzuführen, der exakt diese fixe Zusammensetzung bei gleichbleibenden Eigenschaften aufweist³⁸. Die konkrete Zusammensetzung des zulässigen Verfüllmaterials einschließlich aller Bandbreiten, innerhalb derer die Anforderungen an das Verfüllmaterial erfüllt werden, sollte in der Erst-/Eignungsprüfung ermittelt und festgeschrieben werden.

Es liegt uns jedoch keine vollständige Dokumentation zur Erst-/Eignungsprüfung des als Verfüllmaterial vorgesehenen Salzbetons der Rezeptur M3 (oder einer anderen Rezeptur) vor. Die in der Unterlage [P 221] zusammengestellten und in Kapitel 5.1 dieses Gutachtens ausführlich wiedergegebenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass einige, ggf. auch alle, Anforderungen an das Verfüllmaterial mit dem untersuchten Material erfüllt werden können. Allerdings sehen wir eine inhaltliche Prüfung der Unterlage [P 221] derzeit als nicht zielführend an, da die in [P 221] enthaltenen Informationen nicht ausreichend konkret sind und nicht dem erforderlichen Detailliertheitsgrad einer Erst-/Eignungsprüfung entsprechen. Es liegen uns beispielsweise keine Informationen vor, inwieweit das bei den verschiedenen Untersuchungen verwendete Material jeweils ausreichend mit dem vorgesehenen Verfüllmaterial übereinstimmt und inwiefern die möglichen bzw. zulässigen Abweichungen/Materialbandbreiten abgedeckt werden.

Nach unserer Kenntnis wird vom Antragsteller derzeit diskutiert, die gemäß Plan Stilllegung vorgesehene Rezeptur des Salzbeton M3 zu modifizieren. Bislang durchgeführte Untersuchungen könnten damit hinfällig und zu ersetzen sein, sofern nicht die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf den Salzbeton der neuen Rezeptur z. B. durch vergleichende Untersuchungen nachgewiesen wird. Dies gilt z. B. dann, wenn (wie im Rahmen der bGZ praktiziert) der bislang vorgesehene Zusatzstoff vom reaktiven Typ II (Steinkohlenflugasche) durch einen Zusatzstoff vom inerten Typ I (z. B. Sand, Kalkmehl) ersetzt würde³⁹.

Im Anschluss an die behördliche Prüfung und Bestätigung der Anforderungen an das Verfüllmaterial sollte vom Antragsteller eine auf diese Anforderungen abgestimmte Erst-/Eignungsprüfung

³⁸ Dies wäre auch nicht konsistent mit der in [G 228] genannten Anforderung, dass sich die Ausgangsstoffe des Verfüllmaterials mit einer Genauigkeit von (lediglich) $\pm 3\%$ dosieren lassen müssen.

³⁹ Gemäß [P 221] verfügt die Steinkohlenflugasche über latent hydraulische bzw. puzzolanische Eigenschaften und es werden ihr eine Verbesserung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons sowie eine Steigerung der Sulfatbeständigkeit und Erhöhung der Endfestigkeit des Betons zugeschrieben. Es wäre zu zeigen, dass auch Verfüllmaterial mit einem anderen Zusatzstoff die Anforderungen erfüllt.

für das Verfüllmaterial vorgelegt werden, wie dies auch im Plan Stilllegung angekündigt⁴⁰, in [G 228] gefordert und in [P 229] vorausgesetzt wird. Mit der Erst-/Eignungsprüfung sollte nachgewiesen werden, dass die vorgesehenen Materialien/Materialmischungen geeignet sind, die an das Verfüllmaterial gestellten Anforderungen zu erfüllen. Gegenstand dieses Nachweises sollten auch ggf. erforderliche Untersuchungen und Festlegungen zum Transport und zur Lagerung der Ausgangsmaterialien, zum Mischvorgang, zum Transport der hergestellten Betonmischung sowie zum Verfüllvorgang sein, da sie Einfluss auf die Eigenschaften des Verfüllmaterials und damit auf die Erfüllung der Anforderungen an dieses Material haben könnten.

Die für die Verfüllung des ERAM zu verwendenden Ausgangsmaterialien und Mischungen sollten im Ergebnis dieser Nachweise begründet ausgewählt und konkretisiert werden. Dies erfordert i. d. R. präzise Angaben zu Herkunft, Bezeichnung und Eigenschaften der Ausgangsmaterialien einschließlich aller Zusatzstoffe und -mittel sowie zur Rezeptur der Mischung. Mit „präzise Angaben“ ist dabei beispielsweise hinsichtlich der Herkunft eines Materials gemeint,

- ob dieses Material hinsichtlich der Herkunft eingeschränkt ist (nur von einem bestimmten Hersteller/aus einer bestimmten Anlage bzw. von mehreren bestimmten Herstellern/Anlagen) oder
- ob diesbezüglich keine Einschränkungen bestehen (wenn z. B. die Verwendung eines normgerechten Materials ausreicht; diese Norm und die dort geregelten entscheidenden Eigenschaften des Materials wären eindeutig zu benennen).

Für die im Ergebnis der Erst-/Eignungsprüfung vorgesehenen Materialien bzw. Materialmischungen sind Schwankungen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung (Rezeptur) und/oder ihrer Eigenschaften bzw. der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien nicht auszuschließen bzw. sogar zu erwarten. Sofern dies infolge der Anforderungen an das Verfüllmaterial erforderlich ist, sollten mit der Erst-/Eignungsprüfung begründet – d. h. unter Darlegung von entsprechenden Untersuchungsergebnissen – Material- und Rezepturbandbreiten festgelegt werden, bei deren Einhaltung die Erfüllung aller Anforderungen gewährleistet ist. Die labor- und großmaßstäblichen Versuche und Nachweise der Erst-/Eignungsprüfung sollten daher im Bedarfsfall unter Berücksichtigung dieser Schwankungen bzw. Bandbreiten geführt werden.

Aus der Erst-/Eignungsprüfung muss die Begründung der Zulässigkeit der dort genannten Bandbreiten hervorgehen. Zu diesem Zweck ist die Materialeignung für das gesamte Spektrum der zugelassenen Ausgangs- und Zielmaterialien nachzuweisen. Es ist daher auch zu zeigen, dass alle Salzbetonmischungen geeignet sind, deren verschiedene Ausgangskomponenten Eigenschaften aufweisen, die sich in den Randbereichen der jeweils zulässigen (Einzel-)Materialbandbreiten bewegen, d. h. bei denen alle Ausgangskomponenten die höchstzulässige Abweichung vom jeweiligen Zielwert zeigen.

Um den erforderlichen Untersuchungsumfang zu begrenzen, ist zu empfehlen, die zulässigen Bandbreiten bestmöglich einzuschränken.

⁴⁰ [A 281], Kap. 2.7.2: „Für den Baustoff Salzbeton M3 wird eine Eignungsprüfung durchgeführt, die den Nachweis erbringt, dass die Auslegungsanforderungen [...] für das Material Salzbeton M3 erfüllt werden.“.

Hierzu geben wir folgende Beispiele:

- Sofern die Körnungsbandbreite des Salzgruses nicht eingeschränkt werden soll, ist der gesamte zulässige Körnungsbereich durch Untersuchungen abzudecken. Daher wären neben Mischungen mit diversen Salzgrus-Kornverteilungen auch Mischungen zu berücksichtigen, bei denen der Salzgrusanteil vollständig aus Grobkorn besteht und zudem Mischungen, bei denen der Salzgrusanteil vollständig aus Feinkorn besteht. Diese Materialvarianten wären mit entsprechenden Varianten in den zulässigen Bandbreiten der übrigen Ausgangsmaterialien zu kombinieren und würden eine Vielzahl von zu untersuchenden Mischungen ergeben. Dieser Untersuchungsumfang ließe sich signifikant reduzieren, wenn die zulässige Körnung des Salzgruses auf ein begrenztes Körnungsband und/oder durch eine andere geeignete Vorgabe (z. B. der Ungleichförmigkeit) beschränkt würde und entsprechende Einschränkungen auch für die anderen Ausgangsmaterialien der Salzbetonmischung erfolgen würden.
- Sofern die mineralogische Zusammensetzung des Salzgruses nicht eingeschränkt wird, wären alle Salzarten und Mischungen zwischen diesen Salzarten auf ihre Eignung als Zuschlagsstoff zu prüfen.
- Als Anmischflüssigkeit sind nach den Angaben in Antragsunterlagen neben Wasser u. a. auch Reinigungswässer und Salzlösungen zulässig. Um den Untersuchungsaufwand im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung zu reduzieren, könnte hier eine Einschränkung zur chemischen Zusammensetzung der Anmischflüssigkeit (beispielsweise denkbar für die Magnesiumkonzentration im Hinblick auf die chemische Stabilität des Betons) erfolgen. Die Eignung der Anmischwässer wäre dann nur innerhalb dieser zulässigen Bandbreiten nachzuweisen.

Im Anschluss an die Erst-/Eignungsprüfung im Labormaßstab ist der Nachweis erforderlich, dass die bis dato erzielten Ergebnisse auf den Großmaßstab und auf die In-situ-Verhältnisse übertragbar sind. Ob und in welchem Umfang dies für das Verfüllmaterial erforderlich sein wird, hängt maßgeblich von den an dieses Material zu stellenden Anforderungen ab. Auf diesen Teil der Nachweisführung gehen wir bereits näher in Kapitel 3.3.1 dieses Gutachtens ein.

Schließlich sollten in der Erst-/Eignungsprüfung auf der Basis der labor- und großmaßstäblichen Versuche diejenigen Parameter bzw. Kriterien identifiziert und angegeben werden, die im Rahmen der Qualitätssicherung/Produktionskontrolle zu überprüfen bzw. zu kontrollieren sind, damit die Einhaltung der Anforderungen an das Verfüllmaterial im Rahmen der Bauausführung nachgewiesen werden kann. Es sollten auch die einzuhaltenden Werte und Bandbreiten dieser Parameter begründet angegeben werden.

6. QUALITÄTSSICHERUNG

Angaben zu der im Zusammenhang mit den Verfüllarbeiten vorgesehenen Qualitätssicherung sind im Plan Stilllegung [A 281] und in den Unterlagen [G 92], [G 228] und [P 229] enthalten. Sie werden nachfolgend dargestellt.

6.1. Plan Stilllegung [A 281]

Gemäß Kapitel 2.7.2 des Plan Stilllegung werden die qualitätssichernden Maßnahmen

„in den Planungs- und Ausführungsunterlagen (z. B. in Form von QM-Plänen und Prüfplänen) dargelegt und ihre Einhaltung u. a. gemäß den Forderungen des QM-Systems gewährleistet. [...] Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen und Nachweisführungen wurden notwendige Qualitätskriterien, einzuhaltende Parameter einschließlich zulässiger Schwankungsbreiten sowie Überwachungs- und Beweissicherungsmaßnahmen festgelegt.

Diese Parameter unterliegen der Eigen- und Fremdüberwachung. Die für die sicherheitlichen Nachweise relevanten Parameter werden entsprechend den in den Planungsunterlagen festgelegten Intervallen anhand von Proben aus den angelieferten Ausgangsstoffen und/oder aus dem bereits angemischtem Versatzbaustoff geprüft.

Die Beschaffung, Herstellung und Verwendung aller Materialien sowie die Durchführung der Stilllegungsmaßnahmen (z. B. Verfüllung von Strecken, Rolllöchern und anderen Grubenbauen; Herstellung von Verschlüssen für die Grubenhohlräume; Errichtung von Abdichtungsbauwerken in Strecken und Rolllöchern sowie in den Schachtröhren Bartensleben und Marie) unterliegen qualitätssichernden Maßnahmen.

Die Eignung der im Rahmen der Stilllegungsmaßnahmen verwendeten Materialien (Ausgangsstoffe, Mischungen usw.) ist vor der Durchführung der jeweiligen Maßnahme durch das bauausführende Unternehmen durch eine Eignungsprüfung nachzuweisen.

Bei der Verfüllung der untertägigen Grubenbaue wird vorwiegend Salzbeton M3 [...] als Massenbaustoff eingesetzt. Beispielhaft wird deshalb nachfolgend die QS für den Salzbeton M3 dargestellt:

Für den Baustoff Salzbeton M3 wird eine Eignungsprüfung durchgeführt, die den Nachweis erbringt, dass die Auslegungsanforderungen (Kapitel 2.4) für das Material Salzbeton M3 erfüllt werden.

Da aufgrund der Unzugänglichkeit der versetzten Grubenbaue die Überprüfung des abgebundenen Versatzes mit großen Schwierigkeiten verbunden bzw. unmöglich ist, sind die Überwachungsmaßnahmen für die Herstellung des Salzbetons M3 derart ausgestaltet, dass die Qualitätsparameter des Salzbetons M3 nach dem Versatz in die Grubenhohlräume sicher eingehalten werden. Besondere Bedeutung kommen deshalb bei Herstellung des Salzbetons M3 der Überwachung der Qualität der Ausgangsstoffe, dem Dosier- und Mischvorgang und Prozessparametern zu. Für den Herstellungsprozess und die relevanten Materialparameter sind Soll- und Grenzwerte festgelegt, die die Qualität des Salzbetons M3 ausreichend beschreiben und deren Einhaltung die notwendige Qualität des Salzbetons M3 sichert.“

6.2. Qualitätssicherungsprogramm zur Stilllegung des ERAM [G 92]

In [G 92] werden die im Plan Stilllegung enthaltenen allgemeinen Angaben zur Qualitätssicherung untersetzt. Es werden das Qualitätsmanagementsystem und das Qualitätssicherungsprogramm für die Stilllegung des ERAM beschrieben.

Spezifische Angaben zur Qualitätssicherung der Verfüllmaßnahmen sind in [G 92] nicht enthalten.

6.3. Systembeschreibung: Material für die Stilllegung [G 228]

Gemäß [G 228], Kapitel 3, wird bei der Qualitätssicherung der Verfüllmaßnahmen unterschieden zwischen

- der Erstprüfung des Verfüllmaterials und
- der routinemäßigen Überwachung der Qualität der Ausgangsstoffe, des Mischprozesses und der Qualität des Verfüllmaterials (Güteüberwachung).

Die Erstprüfung dient gemäß [G 228] dem Nachweis, dass die geforderten Materialeigenschaften des Verfüllmaterials eingehalten werden. Es wird dazu u. a. angegeben:

„Sie wird auch erforderlich bei wesentlichen Änderungen der Ausgangsstoffe und Modifizierungen der Rezeptur.“

Gemäß [G 228] sind bei der Erstprüfung folgende Materialeigenschaften zu prüfen, wenn Bindemittel bzw. Zusatzstoffe verwendet werden, die den nationalen oder europäischen Normen entsprechen:

- Ausbreitmaß,
- Fließwinkel,
- rheologische Materialparameter (Nachweis der Förderfähigkeit),
- Temperaturverlauf unter adiabatischen Bedingungen bei einer Starttemperatur von 20 °C bis die Temperaturerhöhung in einem Zeitraum von 2 Tagen geringer als 0,5 K ist,
- linearer Wärmeausdehnungskoeffizient,
- einaxiale Druck- und Zugfestigkeit und
- statischer Elastizitätsmodul.

Bezieht sich die wesentliche Änderung auf eine Verwendung von Bindemitteln oder Zusatzstoffen, die nicht nationalen oder europäischen Normen entsprechen, sind zusätzlich hinsichtlich der Umweltverträglichkeit verfüllmaterialspezifische Eluate zu prüfen.

Bemerkung: Nach unserer Auffassung ist die „Erstprüfung“ einer „Eignungsprüfung“ gleichzusetzen, auf die allerdings bereits in [G 228], Kapitel 2.6, eingegangen wird. Wir vermuten, dass in [G 228, Kapitel 3.1, lediglich dargestellt werden soll, dass bei wesentlichen Änderungen der Ausgangsstoffe und Modifizierungen der Rezeptur entsprechende Ergänzungen der Erst-/Eignungsprüfung erforderlich werden.

Die Güteüberwachung des Verfüllmaterials umfasst gemäß [G 228] die Eigenüberwachung (Fertigungskontrolle) und den Gütenachweis.

Unter Eigenüberwachung fallen dabei gemäß [G 228] alle Maßnahmen zur Erzielung einer den Anforderungen entsprechenden Versatzqualität, unter Gütenachweis Maßnahmen und Entscheidungen zur Überprüfung der Konformität (Übereinstimmung) einer definierten Probe mit den festgelegten Anforderungen.

6.4. Überwachungskonzept Salzbeton [P 229]

In der Unterlage [P 229] werden der Salzbeton charakterisiert und die qualitätssichernden Maßnahmen konzeptionell dargestellt. Es wird in [P 229] darauf hingewiesen, dass detaillierte Beschreibungen der Überwachungstätigkeiten sowie die dazugehörigen Überwachungsabläufe und Verantwortlichkeiten in Qualitätsmanagementplänen (QMP) zusammengestellt werden sollen, die nicht Gegenstand des Überwachungskonzepts in [P 229] sind.

Das Überwachungskonzept beschränkt sich auf die routinemäßig durchzuführende Überwachung der Übereinstimmungskriterien bzw. einer Güteüberwachung und setzt voraus, dass für den Salzbeton im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung die grundsätzliche Eignung als Verfüllmaterial nachgewiesen wurde. Diese Erst-/Eignungsprüfung umfasst gemäß [P 229] ebenso eine Zulassung gemäß § 4 der Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV).

6.4.1. Überwachungskonzept

Hinsichtlich der Möglichkeiten einer Überwachung bzw. der daraus resultierenden Anforderungen an das Überwachungskonzept wird in [P 229] angegeben:

„Das Überwachungskonzept sieht vor, die Herstellung und Verarbeitung des Salzbetons derart zu überwachen, dass die Qualitätsparameter des Versatzes nach der Verfüllung sicher eingehalten werden. Auf Grund der Unzugänglichkeit der Grubenbaue ist die Überprüfung der Qualität des abgebundenen Versatzes (nach der Einbringung) mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden bzw. nicht durchführbar. Darüber hinaus kann ein mit nicht ausreichender Qualität eingebrachter Salzbeton nicht bzw. nur mit hohem technischen und bergmännischen Aufwand aus den Grubenbauen entfernt werden. Unzulässige Abweichungen von der Produktqualität müssen daher frühzeitig erkannt und korrigierende Maßnahmen rechtzeitig ergriffen werden.“

Hinsichtlich der Zielstellung der Qualitätssicherungsmaßnahmen wird angegeben:

„Durch die Gesamtheit der Qualitätssicherungsmaßnahmen wird erreicht, dass die erforderliche Salzbetonqualität nachweislich erzeugt wird und somit die in den Systembeschreibungen festgelegten Anforderungen an das Versatzmaterial und den Einbau erfüllt werden.“

Das Überwachungskonzept ist in folgende Schwerpunkte gegliedert:

- Überwachung der Baustoffkomponenten bei der Anlieferung,
- Überwachung des Dosier- und Mischprozesses sowie der Salzbetonqualität und
- Kontrolle des Förder- und Verfüllprozesses.

Gemäß [P 229] ist ein QMP erforderlich:

„Zur Sicherung der Versatzqualität ist es unerlässlich ein Qualitätsmanagement einzurichten. Ein zu erstellender Qualitätsmanagementplan (QMP) enthält detaillierte Angaben zu den folgenden Themen:

- *Zweck und Anwendungsbereich des QMP,*
- *Benennung von Daten und Normtoleranzangaben (Soll- und Grenzwerte), die die Qualität der Ausgangsstoffe und des Salzbetons beschreiben,*
- *Durchführung der qualitätssichernden Maßnahmen (in Art, Umfang, Anzahl) sowie der dazugehörigen Arbeitsabläufe,*
- *eindeutige Definition der Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten,*
- *Datenerfassung und -dokumentation.“*

Zur Überwachung der Versatzqualität wird in [P 229] angegeben:

„Die Überwachung der Versatzqualität basiert, soweit möglich, auf Normen und Richtlinien aus den Bereichen der Betontechnologie bzw. der Prüfung und Überwachung von Baustoffen [...], die soweit erforderlich an die Charakteristika des Salzbetons angepasst werden. Sollten bei einzelnen Prüfverfahren Normen und Richtlinien aus diesen Bereichen nicht zur Verfügung stehen, werden die Untersuchungen in Anlehnung an geeignete Normen aus anderen Bereichen durchgeführt.“

Gemäß [P 229] ist der Wartung der technischen Einrichtungen besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Die dazu geplante Vorgehensweise wird in [P 229] kurz umrissen.

6.4.2. Überwachung der Ausgangsstoffe

Im Hinblick auf die Überwachung der Ausgangsstoffe ist [P 229] zu entnehmen:

- Zement und Betonzusatzstoffe werden bei der Produktionskontrolle bzw. vor Abgabe dieser Stoffe durch Eigen- oder Fremdüberwachung überwacht. Die Qualitätsmerkmale dieser Stoffe werden z. B. in Normen, Produktdatenblättern oder Prüfprotokollen dokumentiert. Die im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung gewonnenen Daten werden gemäß [P 229] dem Salzbetonhersteller zur Verfügung gestellt und in das Dokumentationssystem integriert.
- Die Qualität des Salzzuschlags wird z. B. im Rahmen der Führung des Gewinnungs- oder Aufbereitungsprozesses bzw. der Produktion durch Eigenkontrollen überwacht.
- Neben Trink-/Leitungswasser, natürlichen Wässern und Spül-/Reinigungswasser der Misch- und Förderanlage können geeignete Salzlösungen zum Anmischen verwendet werden. Vor der Verwendung von Spül- bzw. Reinigungswasser oder von Salzlösungen erfolgen Prüfungen auf Brauchbarkeit.

Bei der Anlieferung der Salzbetonkomponenten erfolgt an der Mischanlage eine Konformitätsprüfung bzw. eine Überprüfung der Übereinstimmungskriterien. Die Konformitätskontrolle hat gemäß [P 229] sicherzustellen, dass ausschließlich Stoffe angenommen und verarbeitet werden, die den vertraglich vereinbarten Materialeigenschaften entsprechen. Die Kontrolle dient der Identifi-

zierung des Materials sowie der Übereinstimmung der vereinbarten Quantitäts- und Qualitätsmerkmale. Die Begleitpapiere (z. B. Lieferscheine) werden auf Richtigkeit und Vollständigkeit geprüft.

Zusätzlich werden der Zement, die Betonzusatzstoffe und der Salzzuschlag gemäß [P 229] regelmäßig beprobt und Rückstellproben angefertigt. Von den Ausgangsstoffen werden ausgewählte physikalische und chemische Parameter stichprobenartig untersucht.

Werden bei der Materialanlieferung unzulässige Abweichungen von den Liefervereinbarungen festgestellt, so wird dem Lieferfahrzeug kein Entladeplatz zugewiesen. Materialien, die nicht eindeutig identifiziert werden können, werden nicht angenommen. Ergeben die stichprobenartigen Kontrollen der Ausgangsstoffe bei einem oder mehreren Überwachungsschritten Werte, die außerhalb der genehmigten Zielbandbreite liegen (Nachweis der Nichtkonformität), wird das Überwachungsintervall gemäß dem QMP verringert. Bestätigen sich bei nachfolgenden Kontrollen die Abweichungen, so wird mit dem Lieferanten/Erzeuger Kontakt aufgenommen, um die Gründe für die Abweichungen zu ermitteln und abzustellen.

6.4.3. Überwachung des Dosier- und Mischprozesses sowie der Salzbetonqualität

Gemäß [P 229] erfolgt die Überwachung der Versatzqualität in erster Linie über die Einhaltung der Dosierung der Ausgangsstoffe, die i. d. R. nach Masse dosiert werden. Zugabewasser kann auch volumetrisch dosiert werden. Bei der Dosierung werden die Stoffmengen ständig erfasst, so dass Abweichungen von den Rezepturvorgaben frühzeitig erkannt werden können und die Zusammensetzung des verpumpten Salzbetons über längere Zeiträume nachvollzogen werden kann.

Wenn das Einwiegen bzw. Dosieren der Feststoffkomponenten und der Anmischlösungen im zugelassenen Toleranzbereich nicht möglich ist, erfolgen eine Unterbrechung des Dosier-/Mischbetriebs bis zur Ursachenermittlung und Fehlerbeseitigung.

Die Konsistenz bzw. das rheologische Verhalten des Frischbetons wird bei Anlieferung bzw. nach Übergabe des Salzbetons überwacht, z. B. mittels eines in die Förderanlage integrierten Viskosimeters durch die Ermittlung des spezifischen Druckverlusts (Druckgradienten). Zusätzliche Informationen liefern der Systemdruck in der Förderleitung, der Pumpendruck und der Durchsatz der Förderanlage (Förderleistung).

Bei Bedarf können Proben des Salzbetons z. B. aus dem Vorlagebehälter entnommen und auf die Frischbetoneigenschaften wie Konsistenz und Abbindeverhalten geprüft werden.

Werden bei der Förderung der Suspension die Toleranzgrenzen für den Druckgradienten (spezifischer Druckverlust in der Rohrleitung) über- oder unterschritten, so wird die Mischung unter Berücksichtigung der Toleranzgrenzen des W/B-Wertes korrigiert. Bei einer deutlichen Überschreitung des Druckgradienten (z. B. bei Verstopfungsgefahr) ist es zur Gefahrenabwehr zulässig, den W/B-Wert kurzzeitig gegenüber dem vorgegebenen Toleranzbereich zu erhöhen.

6.4.4. Überwachung der Verfüllung

In [P 229] wird angegeben, dass Voraussetzung für die Wirksamkeit der Verfüllmaßnahmen ist, dass der Salzbeton mit ausreichendem Verfüllgrad oder ausreichendem Füllstand in die Grubenbaue eingebracht wird.

Der erreichte Verfüllgrad wird über den Abgleich zwischen dem Hohlraumvolumen eines Grubenbaus und dem eingebrachten Salzbetonvolumen bilanziert.

Bei Grubenbauen, für die Vorgaben hinsichtlich des zu erreichenden Füllstands bestehen, wird der Füllstand des Salzbetons z. B. durch Messsensoren überwacht, die durch die Entlüftungs- und/oder Verfüllbohrungen geführt werden. Ggf. werden Nachverfüllungen vorgenommen, bis das Verfüllziel erreicht ist.

6.4.5. Dokumentation der Überwachung

Neben der konventionellen Ablage der im Rahmen der Überwachung des Qualitätsmanagement erhobenen Daten und Nachweise ist ein EDV-gestütztes Dokumentationssystem einzurichten (datenbankgestütztes Informations- und Managementsystem).

6.5. Bewertung

Der Umfang der im Rahmen der Verfüllung erforderlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen hängt – wie bereits bei den für die Erst-/Eignungsprüfung notwendigen Untersuchungen und Nachweisen – maßgeblich von Art und Umfang der an das Verfüllmaterial begründet zu stellenden Anforderungen ab. Die nachfolgenden Einschätzungen erfolgen unter Berücksichtigung der vom Antragsteller angegebenen Anforderungen an das Verfüllmaterial, wobei derzeit offen ist, ob diese Anforderungen erforderlich, vollständig und sachgerecht sind.

Die vorgesehenen Qualitätssicherungsmaßnahmen werden in den gesichteten Antragsunterlagen lediglich konzeptionell dargestellt. Dies gilt auch für die umfangreichste dieser Darstellungen, die der Unterlage [P 229] zu entnehmen ist. Für eine Beurteilung der Vollständigkeit und inhaltlichen Richtigkeit reicht diese Qualität der Angaben nicht aus. Maßgeblich für eine solche Beurteilung wäre ein Qualitätsmanagementplan, der auch gemäß [P 229] erforderlich ist. Nach unserer Kenntnis wurde bislang allerdings noch kein detaillierter QMP für die Verfüllmaßnahmen vorgelegt.

Auf der Basis der Ergebnisse der Erst-/Eignungsprüfung zum Verfüllmaterial sollte ein detaillierter QMP aufgestellt werden, aus dem explizit (d. h. als konkrete Angabe und nicht als Verweis auf begleitende Unterlagen o. ä.) sämtliche einzuhaltende Vorgaben (z. B. Parameterwerte bzw. -bandbreiten, Bauabläufe) und Maßnahmen (insbesondere Untersuchungen/Überwachungen in Art, Umfang und Häufigkeit sowie Maßnahmen bei festgestellten Abweichungen von den Vorgaben) hervorgehen. Dies schließt die Überwachung der Arbeitsabläufe ein. Die Ergebnisse der in Umsetzung dieses QMP durchgeführten Untersuchungen und Prüfungen müssen den Nachweis ermöglichen, dass bei den Verfüllmaßnahmen nur erst-/eignungsgeprüftes Material verwendet wird.

Es ist i. d. R. mindestens die Überwachung vorzusehen

- der Ausgangsmaterialien bei der Produktion/Herstellung,
- der Ausgangsmaterialien bei der Anlieferung,
- der Lagerung und des Transportes der Ausgangsmaterialien,
- der Dosierung der Ausgangsmaterialien und des Mischprozesses,
- des angemischten Salzbetons,

- der Salzbetonförderung und
- der Verfüllung.

Diese Überwachungsschritte schließen die Untersuchung von Probenmaterial der Ausgangsmaterialien vor dem Mischprozess, der Salzbetonsuspension nach dem Mischprozess und des abgebundenen Salzbetons ein.

In [P 229], Kapitel 3, wird ausgeführt, dass die Überwachung der Versatzqualität – soweit möglich – auf Normen und Richtlinien aus den Bereichen der Betontechnologie bzw. der Prüfung und Überwachung von Baustoffen basiert. Die Angaben zur Überwachung des Versatzmaterials sollten daher auch die in diesen Normen und Richtlinien (insbesondere der DIN EN 406 Teil 1 und der DIN 1045 Teil 2) verwendeten Begriffe und Bezeichnungen aufgreifen (z. B. Produktionskontrolle, Konformitätsprüfung, Identitätsprüfung etc.). So sollte beispielsweise angegeben werden, welche Maßnahmen, Untersuchungen und Prüfungen im Rahmen der Konformitäts- und Identitätsprüfungen vorgesehen sind und wer für die Durchführung dieser Prüfungen verantwortlich ist. Sofern inhaltsgleiche Begriffe parallel verwendet werden, sollte dies erläutert werden. Wir empfehlen generell, die bei Erläuterungen zur Qualitätssicherung/Produktionskontrolle verwendeten Begriffe eindeutig zu definieren.

Im Hinblick auf den für den QMP erforderlichen Detailliertheitsgrad der Regelungen kommen wir unter Berücksichtigung der Angaben aus [P 229] zu folgenden Anmerkungen:

- Gemäß [P 229] ist auf die Verwendung von Zusatzmitteln nach Möglichkeit zu verzichten.
 - In der Erst-/Eignungsprüfung sollte auf der Basis von Untersuchungsergebnissen festgelegt werden, ob bzw. welche Zusatzmittel und in welcher Menge verwendet werden dürfen. Entsprechende Kontrollmaßnahmen sollten in den QMP aufgenommen werden.
- Hinsichtlich der beim Hersteller durchzuführenden Produktkontrolle der Ausgangsstoffe ist die zu überwachende Chargengröße materialspezifisch festzulegen.
 - Die Übergabe dieser Vorgaben für und an den Salzbetonhersteller sollte geregelt werden. Die Vorgaben bzgl. der zu überwachenden Chargengrößen sollten begründet angegeben werden.
- Die Überwachung der Qualität des Salzzuschlags soll im Rahmen der Gewinnung, Aufbereitung oder Produktion durch Eigenkontrollen überwacht werden.
 - Es sollten Parameter festgelegt werden, die geeignet sind für Kontrollen zur Gewährleistung der Qualität des Salzzuschlags (z. B. Kornverteilung, Feuchtegehalt, Salzart, Mineralbestand o. ä.).
- Vor der Verwendung von Spül- oder Reinigungswässern der Misch- und Förderanlage oder Salzlösungen als Anmischflüssigkeit sollen Prüfungen auf die zulässige Zusammensetzung dieser Lösungen erfolgen.
 - Es sollten mindestens die Art der Prüfungen, die zulässigen Kennwerte, die Prüfhäufigkeit und die Größe der zu prüfenden Chargen festgelegt werden. Die zulässigen Bandbreiten hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung der Flüssigkeiten sind anzugeben (ein Ergebnis der Erst-/Eignungsprüfung).

- Bei der Anlieferung der Salzbetonkomponenten an der Mischanlage ist eine Konformitätsprüfung vorgesehen. Es ist gemäß [P 229] sicherzustellen, dass ausschließlich Stoffe angenommen und verarbeitet werden, die den (liefer-)vertraglich vereinbarten Materialeigenschaften entsprechen.
 - Hinsichtlich der Qualitätssicherung sind die Liefervereinbarungen nur insoweit von Bedeutung, wie sie die im Ergebnis der Erst-/Eignungsprüfung zulässigen Materialeigenschaften widerspiegeln. Daher sollten entsprechende Vorgaben in erster Linie auf die Konformität mit den gemäß Erst-/Eignungsprüfung zulässigen Materialeigenschaften abzielen. Die Einhaltung darüber hinausgehenden Lieferbedingungen wäre ggf. ein zusätzliches Prüfziel.
- Gemäß [P 229] werden ausgewählte Parameter von Zement, Zusatzstoffen und Salzzuschlag stichprobenartig untersucht. Sofern die Ergebnisse außerhalb der zulässigen Werte liegen, soll das Überwachungsintervall verringert werden. Sofern sich die Abweichungen bei nachfolgenden Kontrollen bestätigen, sollen die Gründe der Abweichungen mit dem Lieferanten/Erzeuger ermittelt und die Abweichungen abgestellt werden.
 - In diesem Zusammenhang wird nicht angegeben, ob und wie bei Ergebnissen wie vorstehend genannt unterbunden wird, dass die (unzulässigen) Materialien für die Herstellung von Salzbeton verwendet werden. Es sollte geregelt werden, dass die Verwendung von Ausgangsmaterialien für die Herstellung des Salzbetons nur dann zulässig ist, wenn für die jeweilige Materialcharge mittels der erforderlichen Untersuchungen dokumentiert ist, dass die zulässigen Werte eingehalten werden.

Es sollten des Weiteren der Verbleib und die Kennzeichnung unzulässiger Materialchargen geregelt werden, um ihre Verwendung zu vermeiden.
- Die Konsistenz bzw. das rheologische Verhalten des Frischbetons sollen z. B. mittels eines in die Förderanlage integrierten Viskosimeters sowie über den Systemdruck in der Förderleitung, den Pumpendruck und den Durchsatz der Anlage (Förderleistung) überwacht werden.
 - Es sollte die Angabe der konkret zu überwachenden Parameter sowie der einzuhaltenden Wertebereiche erfolgen.
- Hinsichtlich der Überwachung der Verfüllung soll für Grubenbaue, für die Vorgaben hinsichtlich des zu erreichenden Füllstands bestehen, der Salzbetonfüllstand z. B. durch Messsensoren überwacht werden und es sollen ggf. Nachverfüllungen vorgenommen werden, bis das Verfüllziel erreicht ist.
 - Um dieses Ziel der Qualitätssicherung zu erreichen, sehen wir es als erforderlich an, dass für jeden zu verfüllenden Grubenhohlraum festgelegt wird, welches Verfüllziel besteht und auf welche Weise das Erreichen dieses Verfüllziels kontrolliert und nachgewiesen werden muss. Diese Festlegung muss u. E. in der Planung der Verfüllmaßnahmen erfolgen (siehe dazu Kapitel 3.3.1.2). Im QMP ist die Durchführung dieser Kontrollen sowie ggf. erforderlicher Korrekturmaßnahmen zu regeln.

7. ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN

Gegenstand des beantragten Plan Stilllegung ist u. a. die Verfüllung von Grubenbauen mit sofort stützendem Material. In den Planunterlagen ist deshalb als Teil der Darstellung des angestrebten Verwahrungszustands des Endlagers und der Darstellung der Vorgehensweise zur Herstellung dieses Verwahrungszustands anzugeben, in welche Grubenbaue welche Materialumfänge mit welcher Technologie eingebracht werden sollen. Weiterhin sind die Anforderungen an das Verfüllmaterial, an dessen Ausgangsstoffe oder/und an die Verfülltechnologie anzugeben.

Diese Anforderungen ergeben sich aus den zu erbringenden Nachweisen. Diese umfassen

- den Nachweis, dass der angestrebte Verwahrungszustand und seine Herstellung den bestehenden Optimierungs- und Minimierungsgeboten genügt (Nachweis der Optimierung),
- den Nachweis, dass der angestrebte Verwahrungszustand langzeitsicher ist⁴¹,
- den Nachweis, dass der angestrebte Verwahrungszustand hergestellt werden kann („Nachweis der Herstellbarkeit“)⁴² und
- den Nachweis, dass während der Herstellung (d. h. im Stilllegungsbetrieb) die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden⁴³.

Zur Gewährleistung der Sicherheit dürfen planmäßig nur solche Materialien eingebaut werden bzw. dürfen nur solche Ausgangsstoffe verwendet werden, die die aus diesen Nachweisen resultierenden Anforderungen erfüllen. Die Materialanforderungen sind somit als Teil des Antragsgegenstands vollständig und nachvollziehbar darzulegen.

Neben der Formulierung der Anforderungen ist

- mittels einer Erst-/Eignungsprüfung nachzuweisen, dass die zur Verwendung vorgesehenen Materialien bzw. die vorgesehenen Spektren an Materialien diesen Anforderungen genügen und

⁴¹ Anforderungen an die Langzeitsicherheit des ERAM ergeben sich aus den Rechtsgebieten Atomrecht, Wasserrecht und Bergrecht. Der Nachweis der Langzeitsicherheit des für das ERAM angestrebten Verwahrungszustands weist deshalb die folgenden wesentlichen Elemente auf:

- Nachweis („Langzeitaussage“ [BMU 10]) zur Integrität der geologischen Barriere,
- Nachweis („Langzeitaussage“ [BMU 10]) hinsichtlich der Einhaltung der Dosiskriterien aus [SSK 10],
- Nachweis hinsichtlich des Schutzes des Grund- und Oberflächenwassers und
- Nachweis des Schutzes von Personen und Sachgütern vor Senkungen sowie des Schutzes von Bodenschätzen und Bergwerken.

⁴² Dies schließt den Nachweis der Funktionstüchtigkeit und Robustheit („Nachweis der Robustheit technischer Komponenten“ [BMU 10]) ein. Ein reiner „Nachweis der Handhabbarkeit“ ist nicht ausreichend.

⁴³ Im Hinblick auf die Sicherheit umfasst dies die Einhaltung bzw. Gewährleistung

- der Dosisgrenzen und des Minimierungsgebots der Strahlenschutzverordnung,
- der sicheren Betriebsführung (Arbeits- und Gesundheitsschutz),
- des Schutzes von Personen und Sachgütern an der Tagesoberfläche vor Senkungen und Hebungen,
- des Immissionsschutzes und
- des Gewässerschutzes.

Weitere, nicht die Sicherheit betreffende gesetzliche Anforderungen können sich aus anderen Rechtsgebieten (Abfallrecht, Naturschutz, Denkmalschutz) ergeben.

- in einem Qualitätsmanagementplan durch detaillierte Angaben zur erforderlichen Qualitätssicherung nachvollziehbar darzustellen, dass die Konformität des verbauten Materials mit dem eignungsgeprüften Material geeignet überprüft wird. Bei Vorliegen der positiven Ergebnisse der Qualitätssicherung kann dann mit ausreichender Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die an das Verfüllmaterial bzw. an die mit diesem Material durchgeführten Maßnahmen gestellten Anforderungen in der Bauphase erfüllt werden.

Im Fall der Verfüllung des ERAM bestehen während und nach dem Verfüllprozess keine bzw. nur eingeschränkte Eingreifmöglichkeiten. Es ist deshalb besonderes Augenmerk auf die Ermittlung und Festlegung der zulässigen Materialkennwerte und technologischen Randbedingungen (Eignungsfeststellung) des Verfüllmaterials zu richten. Diese Besonderheit hinsichtlich der Eignungsfeststellung und der Qualitätssicherung für die Verfüllung des ERAM bzw. das dabei zu verwendende Material gehen aus folgenden Ausführungen aus dem Plan Stilllegung [A 281] hervor:

„Da aufgrund der Unzugänglichkeit der versetzten Grubenbaue die Überprüfung des abgebundenen Versatzes mit großen Schwierigkeiten verbunden bzw. unmöglich ist, sind die Überwachungsmaßnahmen für die Herstellung des Salzbetons M3 derart ausgestaltet, dass die Qualitätsparameter des Salzbetons M3 nach dem Versatz in die Grubenhohlräume sicher eingehalten werden. Besondere Bedeutung kommen deshalb bei Herstellung des Salzbetons M3 der Überwachung der Qualität der Ausgangsstoffe, dem Dosier- und Mischvorgang und Prozessparametern zu.“

Im vorliegenden Bericht werden die im Plan und in verschiedenen Planunterlagen (insbesondere [G 228]) enthaltenen Einzelangaben hinsichtlich der Anforderungen an das Verfüllmaterial, der Spezifizierung des ausgewählten Materials, der Erst-/Eignungsprüfung zu diesem Material und der vorgesehenen Qualitätssicherungsmaßnahmen dargestellt. Unter Würdigung dieser Angaben kommen wir zu der Einschätzung, dass eine abschließende Prüfung und Bewertung von Erfordernis und Vollständigkeit der Anforderungen derzeit nicht möglich ist. Dies begründen wir wie folgt:

- Die zu erbringenden Nachweise liegen gegenwärtig nicht in abschließender Form vor. Teils wurden die entsprechenden Unterlagen zurückgezogen, teils werden die Nachweise gegenwärtig überarbeitet.
- Mangels entsprechender Erläuterungen ist für manche der vom BfS angegebenen Anforderungen an das Verfüllmaterial nicht ersichtlich, weshalb bzw. wie sie sich aus den Nachweisen ergeben.

Hinsichtlich der Eignung der Anforderungen kommen wir zu dem Ergebnis:

- Manche der Anforderungen bedürfen der Präzisierung. Es sollte stets im Detail angegeben werden, wie die Erfüllung dieser Anforderungen im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung überprüft und nachgewiesen werden soll. Hierbei sind die zu messenden Größen, die anzuwendenden Messvorschriften und die anzuwendenden Auswerteverfahren (z. B. Mittelwertbildungen) anzugeben.
- Im Rahmen der Nachweise zu Standsicherheit, Integrität und Langzeitsicherheit werden z. T. Annahmen zu den Eigenschaften des Verfüllmaterials getroffen, die von den an das Verfüllmaterial gestellten Anforderungen abweichen.

Hinsichtlich der Eignung des Salzbetons der Rezeptur M3 kommen wir zu dem Ergebnis:

- Im Plan Stilllegung und in den Planunterlagen wird das zur Verwendung vorgesehene Verfüllmaterial Salzbeton M3 unter Berücksichtigung dieser Anforderungen hinsichtlich der zulässigen Bandbreiten (Materialeigenschaften, Rezepturen etc.) nicht ausreichend spezifiziert.
- Eine vollständige Dokumentation der Erst-/Eignungsprüfung zum Verfüllmaterial M3 einschließlich der zugehörigen Ergebnisse von labortechnischen und großmaßstäblichen Untersuchungen wurde nach unserem Kenntnisstand bislang nicht vorgelegt. Die in [P 221] enthaltenen Informationen sind nicht vollständig und nicht ausreichend konkret. Sie entsprechen nicht dem erforderlichen Detaillierungsgrad einer Erst-/Eignungsprüfung.

Hinzu kommt, dass nach unserer Kenntnis vom Antragsteller derzeit diskutiert wird, die gemäß Plan Stilllegung vorgesehene Rezeptur des Salzbeton M3 zu modifizieren. Bislang durchgeführte Untersuchungen könnten damit hinfällig und zu ersetzen sein, sofern nicht die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf den Salzbeton der neuen Rezeptur z. B. durch vergleichende Untersuchungen nachgewiesen wird.

- Es liegt uns keine umfassende Darstellung der erforderlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen vor, mit denen die Konformität der zu verwendenden Materialien mit der vorstehend genannten Nachweisführung bzw. Erst-/Eignungsprüfung und das Erreichen der Zielstellungen der Verfüllung nachgewiesen werden sollen. Die in den uns vorliegenden Angaben zur geplanten Qualitäts- und Beweissicherung sind nicht ausreichend detailliert. Sie gehen nicht über konzeptionelle Darstellungen hinaus. Bewertungen zur Vollständigkeit und Plausibilität der Qualitäts- und Beweissicherung sind auf dieser Basis nicht möglich.

Im Hinblick auf den Ausgleich der genannten Defizite kommen wir nachfolgend zu drei Empfehlungen.

Im ersten Schritt sollte der Antragsteller – ausgehend von der Unterlage [G 228] – eine überarbeitete Unterlage mit den **Anforderungen an das Verfüllmaterial** und den **Anforderungen an die Baustoffe und die Einbautechnologie** vorlegen (vgl. Kapitel 3.3.1.2). In dieser sollten die einzelnen Anforderungen erläutert werden, d. h., es sollte angegeben werden, aus welchen Nachweisen bzw. Teilnachweisen diese Anforderungen resultieren, und wie die Erfüllung überprüft und nachgewiesen werden soll.

E 01: Basierend auf einer Zusammenstellung aller zu erbringenden Nachweise („Nachweiserfordernisse“; vgl. F1 bis F4 aus [BS 11a]) sollte das BfS der Genehmigungsbehörde eine Unterlage mit der Zusammenstellung und Erläuterung der Anforderungen an die Ausgangsstoffe, das Verfüllmaterial und die Verfülltechnologie vorlegen. Gegenstand dieser Unterlage sollten sein:

- **Zusammenstellung und Begründung/Ableitung aller Nachweiserfordernisse.**
- **Angabe, in welcher Unterlage der jeweilige Nachweis geführt wird.**

- **Systematische Zusammenstellung der Annahmen in den einzelnen Nachweisen, die zu Anforderungen an das eingebaute Verfüllmaterial, an die Baustoffe (Ausgangsstoffe und hieraus hergestellte Stoffe) und an die Technologien zur Herstellung, Transport und Verfüllung der Baustoffe führen.**
- **Präzise Formulierung der Anforderungen unter Angabe der betroffenen Materialeigenschaften und technologischen Parameter.**
- **Detaillierte Angabe, wie die Erfüllung der jeweiligen Anforderung (im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung) gezeigt werden soll.**

Die Erfüllung der Anforderungen sollte im Rahmen einer vollständigen Erst-/Eignungsprüfung für das Verfüllmaterial gezeigt werden, deren Erstellung im Plan Stilllegung [A 281] angekündigt, in [G 228] gefordert und in [P 229] vorausgesetzt wird. Für das im Plan Stilllegung genannte Verfüllmaterial Salzbeton der Rezeptur M3 wäre dabei zu berücksichtigen, dass es sich dabei nach unserem Verständnis lediglich um eine Grundrezeptur mit den Zielwerten der verschiedenen Komponenten handelt. Die konkrete Zusammensetzung des zulässigen Verfüllmaterials einschließlich aller Bandbreiten, innerhalb derer die Anforderungen an das Verfüllmaterial erfüllt werden, sollte in der Erst-/Eignungsprüfung ermittelt und festgeschrieben werden.

Ausgehend von den nach Empfehlung E 01 vorzulegenden Anforderungen an das Verfüllmaterial sollte mit der Erst-/Eignungsprüfung nachgewiesen werden, welche Materialien/Materialmischungen als Verfüllmaterial geeignet sind, diese Anforderungen zu erfüllen. Die Erst-/Eignungsprüfung schließt neben Versuchen im Labormaßstab auch den Nachweis bzw. die Überprüfung ein, dass bzw. wie die im Labor erzielten Ergebnisse auf In-situ-Verhältnisse übertragbar sind.

Schließlich sollten in der Erst-/Eignungsprüfung diejenigen Parameter bzw. Kriterien identifiziert und angegeben werden, die im Rahmen der Qualitätssicherung zu überprüfen bzw. zu kontrollieren sind, damit die Einhaltung der Anforderungen an das Verfüllmaterial im Rahmen der Bauausführung nachgewiesen werden kann. Es sollten auch die einzuhaltenden Werte und Bandbreiten dieser Parameter begründet angegeben werden.

Voraussetzung für Einschätzungen zum Umfang der erforderlichen Erst-/Eignungsprüfung ist die abgeschlossene Prüfung und Bestätigung der begründeten Anforderungen an das Verfüllmaterial. Da diese Prüfung derzeit noch nicht erfolgen kann, kommen wir zu folgender Empfehlung:

E 02: Nach der behördlichen Bestätigung der Anforderungen an das Verfüllmaterial sollte der Antragsteller der Genehmigungsbehörde eine auf diese Anforderungen abgestimmte umfassende Dokumentation zur Erst-/Eignungsprüfung für das im Rahmen der Stilllegung des ERAM vorgesehene Verfüllmaterial vorlegen.

Die Erst-/Eignungsprüfung sollte mindestens folgende Angaben und Nachweise enthalten:

A) Ausgangsmaterialien

- **Begründete Vorauswahl der Ausgangsmaterialien für den Versatzbeton (einschließlich von Anmischlösungen⁴⁴ sowie Zusatzstoffen und -mitteln) und der für die einzelnen Materialien ggf. zu verwendenden Alternativmaterialien.**
- **Nachweis der Eigenschaften dieser Ausgangsmaterialien (einschließlich der Abweichungen innerhalb der zulässigen Bandbreiten) und der Einhaltung der an diese Ausgangsmaterialien gestellten Anforderungen einschließlich detaillierter Angaben zur Durchführung und zu den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen.**

B) Salzbeton

- **Erläuterung der untersuchten Materialmischungen mit konkreten Angaben zu den Rezepturen und Darstellungen von Rezepturabweichungen, die ebenfalls untersucht wurden.**
- **Darstellung der an den Materialmischungen erfolgten Untersuchungen; einschließlich Angabe der anzuwendenden Vorschriften, Normen und Richtlinien sowie Erläuterung der Durchführung der Maßnahmen (Randbedingungen, Versuchsablauf, Auswertung, Ergebnisse).**
- **Begründete Auswahl der bei der Verfüllung des ERAM zu verwendenden Ausgangsmaterialien und Rezepturen sowie der einzuhaltenden technologischen Bedingungen (z. B. bzgl. des Misch-, Transport- und Betoniervorgangs).**
- **Nachweis der Einhaltung der Anforderungen an den Salzbeton für die ausgewählte Rezeptur und die dabei einzuhaltenden technologischen Bedingungen sowie begründete, durch Untersuchungsergebnisse gestützte Erläuterung von Material-, Rezeptur- und technologischen Abweichungen, bei denen die Anforderungen ebenfalls nachweislich eingehalten werden (Angabe zulässiger Bandbreiten).**

C) Übertragbarkeit auf den Großmaßstab und auf die In-situ-Verhältnisse

- **Nachweis der Übertragbarkeit der im Labormaßstab erfolgten Eignungsuntersuchungen auf die In-situ-Verhältnisse.**

D) Ableitung der Parameter und Kriterien für die Qualitätssicherung

- **Begründete Darstellung der Parameter und Kriterien, die zur Gewährleistung der geforderten Material- und technologischen Qualität überwacht werden müssen.**
- **Quantifizierung bzw. Konkretisierung der einzuhaltenden Werte bzw. Eigenschaften. Es sind zulässige Bandbreiten anzugeben, sofern solche im Rahmen der Erst-/Eignungsprüfung nachgewiesen wurden.**

⁴⁴ Die Notwendigkeit solcher Nachweise gilt auch für die Anmischlösungen, da neben Trinkwasser auch Salzlösungen etc. zur Verwendung vorgesehen sind.

Diese Dokumentation bildet eine Grundlage für das Qualitätsmanagement. Sofern bei der Dokumentation z. B. hinsichtlich Untersuchungsergebnissen auf andere Unterlagen verwiesen wird, sollte jeweils angegeben werden, welchem Zweck – d. h. für das Führen von welchem Nachweis – die in der betreffenden Unterlage enthaltenen Angaben dienen und wie diese Unterlage somit in die Erst-/Eignungsprüfung eingeordnet ist.

Nach sorgfältiger Materialauswahl und vollständiger Erst-/Eignungsprüfung ist mittels Qualitätsmanagement/Qualitätssicherung zu gewährleisten, dass die an die Verfüllung zu stellenden Anforderungen bei der Durchführung der Verfüllmaßnahmen eingehalten werden.

Auf der Basis der Ergebnisse einer Erst-/Eignungsprüfung nach Empfehlung E 02 sollte ein detaillierter Qualitätsmanagementplan (QMP) aufgestellt werden, aus dem explizit sämtliche einzuhaltende Vorgaben (z. B. Parameterwerte bzw. -bandbreiten, Bauabläufe) und Maßnahmen (insbesondere Untersuchungen in Art, Umfang und Häufigkeit sowie Maßnahmen bei festgestellten Abweichungen von den Vorgaben) hervorgehen. Der Umfang eines Teils dieser Maßnahmen hängt von dem Umfang der an das Verfüllmaterial zu stellenden Anforderungen ab, während andere Maßnahmen auf die Qualitätssicherung der Verfüllmaßnahme zielen (z. B. Füllstandskontrollen etc.) und weniger von Art und Umfang der Anforderungen beeinflusst werden.

Die Ergebnisse der in Umsetzung dieses QMP durchgeführten Untersuchungen und Prüfungen müssen den Nachweis ermöglichen, dass bei den Verfüllmaßnahmen nur eignungsgeprüftes Material verwendet wird, so dass mit diesem Material die an das Verfüllmaterial bzw. an den Versatz und an die Verfüllmaßnahme gestellten Anforderungen eingehalten werden.

Diese Überwachungsschritte schließen die Untersuchung von Probenmaterial der Ausgangsmaterialien vor dem Mischprozess, der Salzbetonsuspension nach dem Mischprozess und des abgebundenen Salzbetons ein.

Wir kommen zu folgender Empfehlung:

E 03: Nach der behördlichen Bestätigung der Erst-/Eignungsprüfung für das Verfüllmaterial sollte der Antragsteller der Genehmigungsbehörde einen Qualitätsmanagementplan (QMP) für die im Rahmen der Stilllegung des ERAM vorgesehene Verfüllung mit Salzbeton vorlegen, der auf den Ergebnissen der Erst-/Eignungsprüfung aufbaut.

Im QMP sollten u. a. folgende Detailangaben enthalten sein:

- **Darstellung der im Einzelnen zu überwachenden Prozesse von Herstellung, Lieferung/Antransport und Lagerung der Ausgangsmaterialien über Anmischen, hydraulischen Transport und Einbringen des Versatzes bis hin zu Kontrollen am Versatzkörper und an Rückstellproben;**
- **Angabe aller durchzuführenden Überwachungsmaßnahmen und -methoden wie Messungen, Untersuchungen, Prüfungen, Beobachtungen etc., einschließlich Erläuterung der Zielstellung, anzuwendende Vorschriften, Normen und Richtlinien sowie Erläuterung der Durchführung der Maßnahmen (Randbedingungen, Versuchsablauf, Auswertung);**

- **Angabe der einzuhaltenden Parameter und Kriterien einschließlich der im Einzelnen und in Kombination mehrerer Parameter und Kriterien zulässigen Bandbreiten;**
- **Regelungen zum Umgang mit sowie zum Verbleib von Ausgangsmaterialien der Salzbetonmischung, die unzulässige Eigenschaften aufweisen;**
- **Regelungen für den Fall, dass Überschreitungen der zulässigen Parameterbandbreiten der Salzbetonmischung festgestellt werden und der Salzbeton somit nicht dem Eignungsnachweis entspricht;**
- **Regelungen zum Bauablauf⁴⁵;**
- **Regelungen zu Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten;**
- **Regelungen zur Dokumentation der Qualitätssicherung.**

⁴⁵ Es sind insbesondere Regelungen erforderlich, wenn sich einzelne Abläufe wesentlich auf die Qualität des Versatzmaterials auswirken können oder wenn der Bauablauf erst dann fortgesetzt werden darf, sobald bestimmte Überprüfungen stattgefunden haben bzw. bestimmte Untersuchungsergebnisse vorliegen. Es ist beispielsweise möglich, dass die Verwendung von Ausgangsmaterialien beim Mischvorgang erst nach Vorlage der Ergebnisse der Eingangsprüfung oder der Beginn des Betoniervorgangs nach dem Anmischen erst nach Vorlage der Untersuchungen auf Konsistenz/Abbindeverhalten des Salzbetons zulässig sind.

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)
Salzgitter, 15.09.2009
- [A 281Q] Bundesamt für Strahlenschutz
Quellennachweise für Aussagen im Plan zur Stilllegung des Endlagers für radio-
aktive Abfälle Morsleben (einschließlich der Endlagerung bereits zwischengelagerter
radioaktiver Abfälle und noch anfallender betrieblicher radioaktiver Abfälle)
Salzgitter, 31.03.2009
- [BfS 12] Bundesamt für Strahlenschutz
PFV Stilllegung ERAM
Prüfberichte „Brenk Systemplanung“ zum PK9 „Anlagen für die Stilllegung, Wetter-
und Klimatechnik – Phase 1“ vom 28.09.2011 und 21.12.2011
Salzgitter, 09.05.2012
- [BMU 10] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver
Abfälle
Stand 30.09.2010
- [BS 11a] Kisting S. (BS); Düsterloh U. (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] Kisting 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

- [BS 11c] Stollenwerk, R. H.
Ergebnisse zu Prüfungen im Rahmen des Prüfkomples 9 „Anlagen für die Stilllegung, Wetter- und Klimatechnik – Phase 1“
Zwischenbericht
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 28.09.2011
- [BS 13] Kisting S.; Stollenwerk R. H.
Stilllegung des ERA Morsleben
8. Zwischenbericht zur Prüfung des Sicherheitskonzepts (geotechnische Aspekte) – Prüfung des Verfüllkonzepts: Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach Durchführung der bGZ [P 220]
Brenk Systemplanung GmbH, Aachen, 14.10.2013
- [G 92] Bundesamt für Strahlenschutz
Qualitätssicherungsprogramm zur Stilllegung des ERA Morsleben
Salzgitter, 30.10.2000
- [G 188] Müller-Hoeppe; Weidenbach
Überwachungs- und Beweissicherungsprogramm zur den Bauzuständen für die Stilllegung des ERAM
DBE, Peine, 07.05.2004
- [G 216] Müller-Hoeppe, N.
Konzept von Vorsorgemaßnahmen für die Stilllegung
DBE, Peine, 15.12.2005
- [G 217] Hanetzog
Systembeschreibung der Verfüllung
DBE, Peine, 15.12.2005
- [G 228] Engelhardt
Systembeschreibung: Material für die Stilllegung
DBE, 10.08.2006
- [NN 317] Vejmelka, P.
Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) - Abschlussbericht
Forschungszentrum Karlsruhe, 2003

- [P 212] Müller-Hoeppe, N.; Kreienmeyer, M.
Standsicherheits- und Integritätsnachweis – Kriterien zur Auswahl von
Berechnungsschnitten
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 214] Kreienmeyer, M.
Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Westfeld
DBE, Peine, 31.10.2005
- [P 215] Lerch, C.
Standsicherheits- 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 (Standsicherheit und Integrität)
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 220] Fischer, H., Loose; H.-J.; Müller-Hoeppe, N.; Oppitz, J.; Pöhler, M.
Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach vorgezogener Verfüllung von
Grubenbauen des Zentralteils, Konzeptplanung
DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 221] Engelhardt
Salzbeton - Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte
(Referenzmaterial M3)
DBE, 13.01.2006
- [P 224] Kreienmeyer, M.
Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
Grubenteil Marie
DBE, Peine, 01.03.2006
- [P 229] Engelhardt
ERA Morsleben, Stilllegung - Überwachungskonzept Salzbeton
DBE, 01.08.2006

- [P 234] Lerch, C.
 Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
 Grubenteil Nordfeld
 DBE, Peine, 31.01.2006
- [P 243] Kreienmeyer, M.
 Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
 Zentralteil Bartensleben
 DBE, Peine, 24.02.2006
- [P 245] Kreienmeyer, M.
 Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers:
 Grubenteil Ost- und Südostfeld
 DBE, Peine, 15.12.2005
- [P 249] Lerch
 Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten der Gruben Bartensleben
 und Marie
 DBE, Peine, 24.02.2006
- [P 266] Krauke, W.; Fliß, T.
 Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im
 Hauptanhydrit aus Magnesiabinder
 K-UTEK; Sondershausen, 17. 09.2008
- [P 267] Polster
 Standsicherheits- und Integritätsnachweis des zugelaufenen Endlagers
 DBE, 11.04.2008
- [P 277] Niemeyer et al.
 Endlager Morsleben - Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene
 Endlager mit dem Programm PROSA
 Colenco Power Engineering AG, Baden/CH, 27.03.2009
- [P 278] Becker et al.
 Endlager Morsleben - Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene
 Endlager mit dem Programm EMOS
 GRS, Braunschweig, 27.03.2009

- [P 299] Hagemann, S.; Xie, M.; Herbert, H.-J.
Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline
Lösungen
GRS, Braunschweig, März 2009
- [Rus 11] Rust, W.
Nichtlineare Finite Elemente Berechnungen
Verlag Vieweg&Teubner, Wiesbaden, 2. Auflage 2011
- [Sch 14] Schneider
Bautabellen für Ingenieure (21. Auflage)
Bundesanzeiger Verlag GmbH, Köln, 2014
- [SSK 10] STRAHLENSCHUTZKOMMISSION (SSK)
Radiologische Anforderungen an die Langzeitsicherheit des Endlagers für
radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)
Empfehlung der Strahlenschutzkommission
Verabschiedet in der 246. Sitzung der SSK am 02./03.12.2010
Gebilligt am 15.12.2010 im Umlaufverfahren
- [U 2] Engelhardt
Ergänzende Untersuchungen – Referenzmaterial Salzbeton M2
DBE, 14.09.2001
- [U 3] Pettenpohl, H.; Schauenburg, W.; Opitz, D.
Vorgezogene Verfüllung Zentralteil – In-situ Versuch zum Entmischungsverhalten
der Salzbetonrezeptur M2
Deutsche Montan Technologie GmbH, Essen, 18.03.2002
- [U 4] Engelhardt
Salzbetonrezeptur für die bergbauliche Gefahrenabwehrmaßnahem im Zentralteil
(bGZ) des ERAM – Beschreibung der Rezeptur und Rezepturmodifikations-
möglichkeiten
DBE, 05.02.2004