

STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)

INHALT

1	Hintergrund	3
2	Beratungsauftrag	3
3	Beratungshergang	4
4	Bewertungsmaßstäbe	5
4.1	Von der ESK zugrundegelegte Bewertungsmaßstäbe.....	5
4.2	Anwendbarkeit der Regelwerke auf das ERAM	5
4.3	Einschlussvermögen des Endlagersystems	8
4.4	Dosis-Schutzziel.....	10
5	Bewertung	12
5.1	Standortcharakterisierung	12
5.1.1	Aufgabenstellung	12
5.1.2	Einzelaspekte der Standortcharakterisierung	12
5.1.3	Zusammenfassende Bewertung.....	20
5.2	Modellierung	22
5.2.1	Aufgabenstellung	22
5.2.2	Geometrische Modellstrukturen und verwendete Rechencodes	22
5.2.3	Korrosion der Abdichtungen	27

5.3	Szenarientwicklung	28
5.4	Unsicherheiten/Ungewissheiten	30
5.4.1	Aufgabenstellung	30
5.4.2	Umgang mit Ungewissheiten	31
5.4.2.1	Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten	32
5.4.2.2	Umgang mit Ungewissheiten in den Sicherheitsanalysen.....	33
6	Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen	39
	u. a. Beantwortung der Fragen im Beratungsauftrag	
7	Unterlagen	47

1 Hintergrund

In der Zeit zwischen 1971 und 1998 wurden insgesamt ca. 37.000 m³ schwach- und mittelradioaktive Abfälle, überwiegend Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken, mit einer Gesamtaktivität von ca. $6 \cdot 10^{14}$ Bq (Stichtag: 30.06.2005) im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) eingelagert. Zuvor diente die Doppelschachtanlage Marie/Bartensleben am Rande der Gemeinde Morsleben (Sachsen-Anhalt) u. a. der Kali- und Steinsalzgewinnung.

Im Zuge der Wiedervereinigung ging die Zuständigkeit für das ERAM am 03.10.1990 auf das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) als Betreiber über. Aus der „Dauerbetriebsgenehmigung“ für das ERAM wurde dabei eine befristete Errichtungs- und Betriebsgenehmigung. Aufgrund einer einstweiligen Verfügung des Obergerichtes Magdeburg vom 25.09.1998 wurde die Einlagerung im Ostfeld des Endlagers ausgesetzt. Mit der Atomgesetznovelle vom 22.04.2002 wurde der § 57a AtG dahingehend geändert, dass zwar der Offenhaltungsbetrieb des ERAM möglich bleibt, eine weitere Annahme radioaktiver Abfälle zur Endlagerung aber ausgeschlossen ist.

Das BfS hat am 09.05.1997 das am 13.10.1992 beantragte Planfeststellungsverfahren nach § 9b AtG auf die Stilllegung beschränkt. Auf der Grundlage des vom Betreiber vorgelegten Stilllegungskonzepts soll durch umfangreiche Baumaßnahmen zum Verschluss und zur Sicherung der unterirdischen Hohlräume sowie durch weitgehende Verfüllung des Bergwerks ein Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre über mindestens 1 Mio. Jahre gewährleistet werden. Diese Maßnahmen müssen in einem atomrechtlichen Planfeststellungsverfahren geprüft werden. Die formale Öffentlichkeitsbeteiligung wurde am 22.10.2009 eingeleitet. Vom 22.10.2009 bis 21.12.2009 wurden der Plan des BfS zur Stilllegung des ERAM und weitere Unterlagen zur Einsicht ausgelegt. Das Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt führte den Erörterungstermin in der Zeit vom 13.10.2011 bis 25.10.2011 durch.

Der langzeitsichere Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre soll mit dem Konzept der weitgehenden Verfüllung des Bergwerks und der Abdichtung der Einlagerungsbereiche West-Süd-Feld und Ostfeld erreicht werden. Dazu wird der Hohlraum mit Salzbeton verfüllt, es werden Abdichtungen errichtet und die Schächte Bartensleben und Marie verfüllt und verschlossen.

2 Beratungsauftrag

Vor dem Hintergrund der beantragten Stilllegung des ERAM hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) mit Schreiben vom 16.12.2011 [1] die Entsorgungskommission (ESK) um eine Stellungnahme zum Langzeitsicherheitsnachweis für das ERAM gebeten. Unter Zugrundelegung der SSK-Empfehlung „Radiologische Anforderungen an die Langzeitsicherheit des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben“ vom 02./03.12.2010 [2] bittet das BMU um Beantwortung der Frage, ob der vom BfS geführte Langzeitsicherheitsnachweis für das ERAM methodisch dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Insbesondere wird um Stellungnahme zu folgenden Punkten gebeten:

- Gibt es weitere Anforderungen, die im Langzeitsicherheitsnachweis neben den radiologischen Anforderungen in der genannten SSK-Empfehlung zu beachten sind, und wurden diese Anforderungen beachtet?
- Kann aufgrund des vom BfS geführten Langzeitsicherheitsnachweises – soweit weitergehende Anforderungen bestehen – die Erfüllung dieser Anforderungen hinreichend geprüft werden?
- Sind die Modelle für den Langzeitsicherheitsnachweis begründet und erscheinen sie im Hinblick auf das Ziel adäquat?
- Werden die Unsicherheiten im Langzeitsicherheitsnachweis angemessen berücksichtigt und im Ergebnis entsprechend gewürdigt?

3 Beratungshergang

Der ESK-Ausschuss ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) wurde bereits in seiner 7. Sitzung am 09.09.2009 vom BfS mit einem Übersichtsvortrag über das beantragte Stilllegungskonzept für das ERAM informiert. Der Ausschuss hat daraufhin eine Liste von Fragen formuliert, die dem BfS zur Vorbereitung auf die 9. EL-Sitzung am 08.02.2010 zur Verfügung gestellt wurde. Im Rahmen dieser 9. Sitzung fand eine Befahrung des ERAM (Westfeld, Südfeld, Zentralteil, Untertagemessfeld und Ostfeld) und die Behandlung der vom Ausschuss gestellten Fragen zu den Themenschwerpunkten Geologie und Hydrologie, Stilllegungskonzept und geotechnische Komponenten sowie Nachweis der Langzeitsicherheit statt.

Mit BMU-Schreiben vom 17.03.2011 wurden der ESK und dem Ausschuss EL bereits Beratungsunterlagen mit der Bitte um vorbereitende Kenntnisnahme zugänglich gemacht. In der 16. EL-Sitzung am 12.04.2011 informierte sich der Ausschuss über den aktuellen Antragsstand im Planfeststellungsverfahren und über die vom BfS eingebrachten Verfahrensunterlagen. In der 17. Sitzung am 24.05.2011 prüfte der Ausschuss die in den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ [3] formulierten Anforderungen auf die Anwendbarkeit auf das ERAM als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle.

Nach Erhalt des schriftlichen Beratungsauftrags vom 16.12.2011 [1] richtete der Ausschuss EL in seiner 23. Sitzung am 19.01.2012 eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe ein. Der dort erarbeitete erste Entwurf einer Stellungnahme wurde in der 26. Sitzung am 25.04.2012 im Ausschuss beraten und an drei weiteren Sitzungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe am 15.06.2012, 05.07.2012 und 16.08.2012 überarbeitet. Der dabei erarbeitete Entwurf wurde im Ausschuss EL in der 27. Sitzung am 20.09.2012, in der 28. Sitzung am 25.10.2012 und in der 29. Sitzung am 28.11.2012 diskutiert und in der 30. Sitzung am 23.01.2013 verabschiedet. Er lag der ESK in ihrer 31. Sitzung am 31.01.2013 zur Beschlussfassung vor.

4 Bewertungsmaßstäbe

4.1 Von der ESK zugrundegelegte Regelwerke

Die „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ [4] wurden für die Endlagerung aller radioaktiven Abfälle aufgestellt. Gemäß der RSK/SSK-Stellungnahme vom 05./06.12.2002 [5] entsprechen diese Sicherheitskriterien aus dem Jahre 1983 jedoch nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik und müssen deshalb weiterentwickelt werden. Die Anwendbarkeit der einzelnen Anforderungen wird daher in Tabelle 1 überprüft.

Die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ [3] stellen aus Sicht der ESK Anforderungen nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar, wurden aber für ein neu zu errichtendes Endlagerbergwerk für Wärme entwickelnde Abfälle formuliert. Das ERAM ist eine Anlage mit gegebenen Randbedingungen, in die keine Wärme entwickelnden Abfälle eingelagert wurden. Nach Auffassung der ESK ergeben sich daraus zunächst grundsätzlich keine Einschränkungen hinsichtlich der Anforderungen an das Sicherheitsniveau oder an die Qualität der Nachweisführung. Daher wurde die Anwendbarkeit der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver“ Abfälle [3] auf ein bestehendes Endlager mit radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung geprüft (Tabelle 2). Danach sind einige Anforderungen nicht oder nur eingeschränkt übertragbar, weil sie sich auf für das ERAM nicht gegebene materielle Sachverhalte (etwa bezüglich der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit Wärme entwickelnder Abfälle) beziehen bzw. auf den Entwicklungs- und Optimierungsprozess für eine neu zu errichtende Anlage zielen.

Für die übertragbaren Anforderungen an das Sicherheitsniveau oder an die Qualität der Nachweisführung ist zu überprüfen, ob sie im Falle des ERAM erfüllt sind. Ist dies nicht oder nur teilweise der Fall, so ist unter Berücksichtigung der Ausgangslage (Anlage mit gegebenen Randbedingungen, geringes Inventar) abzuwägen, ob Alternativen hinsichtlich des Sicherheitskonzepts bzw. der Nachweisführung in Frage kommen („graded approach“ im Sinne von ICRP 101 [6]: „A graded approach is necessary to take into account both the level of exposure and the complexity involved.“ bzw. von IAEA Safety Standards Series No SSG-23 [7]: „A graded approach to the safety case and supporting safety assessment is, therefore, required to be used to take into account of the different levels of hazard and risk“). Die von der SSK formulierten radiologischen Anforderungen an die Langzeitsicherheit des ERAM [2], die in der vorliegenden Stellungnahme Berücksichtigung finden, sind Ergebnis eines solchen Abwägungsprozesses.

4.2 Anwendbarkeit der Regelwerke auf das ERAM

Das Problem der fehlenden Bewertungsmaßstäbe für das ERAM (mit Ausnahme der SSK-Stellungnahme vom 02./03.12.2010 [2]) liegt darin, dass die Sicherheitskriterien aus dem Jahr 1983 [4] nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, wohingegen die kürzlich verabschiedeten Sicherheitsanforderungen [3] nicht auf Anlagen mit gegebenen Randbedingungen und die Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung ausgerichtet sind. Im Folgenden hat die ESK daher eine auf diese beiden letztgenannten Dokumente bezogene Analyse zu deren Anwendbarkeit vorgenommen (Tabellen 1 und 2).

Die Analyse zeigt, dass eine Reihe von Anforderungen aus [4] noch aktuell ist. Insbesondere die Anforderungen an den Endlagerstandort, die von einer Standortauswahl ausgehen, sind für das ERAM jedoch nicht anwendbar. Gleiches gilt für die Charakterisierung der Abfälle und die Bestimmungen zum Betrieb der Anlage, die nur noch hinsichtlich der beabsichtigten Stilllegung (Kapitel 9 in [4]) und der Nachbetriebsphase (Kapitel 10 in [4]) Anwendung finden. Anlehnend an die Kapitelstruktur in [4] wird die Anwendbarkeit der Sicherheitskriterien in Tabelle 1 kapitelweise dargestellt.

Tabelle 1: Anwendbarkeit der „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ [4] auf das für die Stilllegung vorgesehene ERAM.

Kapitel 1 „Einführung“	Dieses Kapitel enthält keine Anforderungen.
Kapitel 2 „Schutzziele“	Die Schutzziele sind gültig. Bzgl. der anzuwendenden Dosischutzziele berücksichtigt die ESK Anforderungen der SSK [2].
Kapitel 3 „Maßnahmen zur Verwirklichung der Schutzziele“	Die Anforderungen in den Kapiteln 3.2 und 3.3 sind anzuwenden.
Kapitel 4 „Standortanforderungen“	Der Standort des ERAM ist gegeben, damit sind die Anforderungen nicht mehr anwendbar. Die durch den Standort gegebenen geologischen Rahmenbedingungen sind im Langzeitsicherheitsnachweis zu berücksichtigen.
Kapitel 5 „Voraussetzungen für Errichtung und Betrieb eines Endlagers“	Für das ERAM sind nur die Anforderungen an die Sicherheitsanalysen zur Stilllegung (Kapitel 5.2) zu beachten.
Kapitel 6 „Standorterkundung“	Eine Anwendung dieser Anforderungen entfällt.
Kapitel 7 „Errichtung und Betrieb“	Eine Anwendung dieser Anforderungen entfällt.
Kapitel 8 „Abfälle“	Die Charakterisierung der Abfälle im ERAM ist nicht Gegenstand des Beratungsauftrags an die ESK.
Kapitel 9 „Stilllegung“	Diese Anforderungen sind vollumfänglich anwendbar.
Kapitel 10 „Nachbetriebsphase“	Diese Anforderungen sind vollumfänglich anwendbar.

Die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ [3] enthalten eine Reihe von Festlegungen, beispielsweise hinsichtlich der radiologischen Schutzziele oder der Sicherheitsprinzipien, die sich nicht explizit auf wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle beziehen und daher auch auf die Endlagerung vernachlässigbar wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle anwendbar sind. Anforderungen betreffend Themen der Standortauswahl und Lagerkonzeptentwicklung sind für das bestehende ERAM und den Beratungsauftrag erneut nicht relevant. In Anlehnung an die Kapitelstruktur in [3] und unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Anlage mit gegebenen Randbedingungen, fehlende Planbarkeit) wird die Anwendbarkeit der Sicherheitsanforderungen in Tabelle 2 kapitelweise dargestellt.

Tabelle 2: Anwendbarkeit der „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ [3] auf das für die Stilllegung vorgesehene ERAM.

Kapitel 1 „Zielsetzung und Geltungsbereich“	Die in diesem Kapitel genannten Zielsetzungen sind mit Einschränkungen auf das ERAM anwendbar.
Kapitel 2 „Begriffsdefinitionen und -erläuterungen“	Diese Definitionen und Erläuterungen sind vollumfänglich anwendbar.
Kapitel 3 „Zweckbestimmung und allgemeine Schutzziele“	Diese Anforderungen sind vollumfänglich anwendbar.
Kapitel 4 „Sicherheitsprinzipien“	Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.3 formulierten Ziele stellen allgemeine Grundsätze dar und können daher in dieser Form übernommen werden. Die Kapitel 4.4 und 4.5 greifen nicht. Die in den Kapiteln 4.6 bis 4.8 formulierten Ziele sind im übertragenen Sinn im Hinblick auf die angestrebte Stilllegung anzuwenden.
Kapitel 5 „Schrittweises Verfahren und Optimierung“	Eine sinnngemäße Übertragung des Gedankens der Optimierung ist insbesondere im Hinblick auf das gewählte Stilllegungskonzept und dessen Realisierung möglich. Für Kapitel 5.3 ist eine sinnngemäße Übertragung anzustreben, unter Berücksichtigung der bereits bestehenden Forderung, die sich aus der Dauerbetriebsgenehmigung ergibt (Gesamtüberprüfung im Abstand von fünf Jahren), und u. a. unter besonderer Berücksichtigung der Überprüfung der Schachtverschlüsse (z. B. Konstruktionsausführungen).
Kapitel 6 „Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“	Bezüglich der in den Sicherheitsanforderungen formulierten Grenzwerte für wahrscheinliche bzw. weniger wahrscheinliche Entwicklungen (0,01 bzw. 0,1 mSv im Jahr als zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung) verweist die ESK auf die von der SSK für das ERAM vorgeschlagenen Grenzwerte ([2], siehe Kapitel 4.4 der Stellungnahme). Das in Kapitel 6.1 (und Kapitel 7.2.1) beschriebene Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist – soweit anwendbar – zu berücksichtigen; Genaueres siehe Kapitel 4.3 und Kapitel 6 der Stellungnahme. Die in den Kapiteln 6.2 bis 6.5 beschriebene Einordnung der Szenarien in die verschiedenen Wahrscheinlichkeitsklassen ist anzuwenden.
Kapitel 7 „Sicherheitsnachweise“	Die Kapitel 7.1 und 7.2 sind – soweit anwendbar – zu berücksichtigen, insbesondere die Aussagen zum Verschluss bzw. zu den geotechnischen Barrieren in Kapitel 7.2.3 sind zu beachten. Für die Kapitel 7.3, 7.4 und 7.5 ist eine sinnngemäße oder auch wortgleiche Übertragung angebracht, wohingegen die Kapitel 7.6 und 7.7 für das ERAM nicht relevant sind. Kapitel 7.9 kann wortgleich auf das ERAM angewendet werden.
Kapitel 8 „Endlagerauslegung“	Da es sich beim ERAM um ein bereits bestehendes Endlager handelt, sind die Inhalte dieses Kapitels größtenteils nicht übertragbar; ansatzweise ist eine sinnngemäße Übertragung von Aspekten zur Stilllegung sinnvoll (z. B. Kapitel 8.7 und 8.8).
Kapitel 9	Die Anforderungen sind anwendbar. Der Schwerpunkt für die Beurteilung

„Sicherheitsmanagement“	des ERAM liegt auf den für die Langzeitsicherheit relevanten Vorrichtungen wie auf der Konstruktion und Ausführung von Barrieren.
Kapitel 10 „Dokumentation“	Diese Anforderungen sind vollumfänglich anwendbar.

Ergänzend zu den in [3] und [4] formulierten Sicherheitsanforderungen verweist die ESK außerdem auf frühere Stellungnahmen von der RSK, ESK und SSK [2, 8, 9].

4.3 Einschlussvermögen des Endlagersystems

Sachverhalt

Das Sicherheitskonzept gemäß BfS [10] beschreibt und legt fest, in welcher Weise das Gesamtsystem des stillgelegten Endlagers den dauerhaften Einschluss der Radionuklide bzw. die Begrenzung ihrer Freisetzung bewirkt. Das Sicherheitskonzept nennt dazu die maßgebenden Prozesse für die Rückhaltung der Radionuklide, führt die relevanten Eigenschaften am Standort an, bezeichnet die Art der Maßnahmen für das Verfüllen und Verschließen des Endlagers und legt qualitativ deren Ziele fest.

Gemäß den Angaben des BfS [10] müssen „radioaktive Abfälle so gehandhabt und eingelagert werden, dass Mensch und Umwelt in allen Phasen der Endlagerentwicklung geschützt sind. Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen hat die Isolation der radioaktiven Abfälle im Endlagersystem über lange Zeiten sicherzustellen, um damit langfristig Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu schützen und zu verhindern, dass zukünftigen Generationen unzumutbare Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden. Insbesondere darf sich die Sicherheit des Endlagers in der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht auf aktive Maßnahmen nach dem Verschluss abstützen“. „Die Einhaltung der radiologischen Schutzziele erfordert den Einschluss der mit den Abfällen in das Endlager eingebrachten Radionuklide im Endlager (genauer im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers) oder wenigstens die Begrenzung ihrer Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und in die Biosphäre auf unbedenkliche Raten“ [10].

Aufgrund der natürlichen und der bergbaubedingten Gegebenheiten können beim ERAM der Zutritt von Lösung an Abfälle und der Austrag belasteter Lösung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich langfristig nicht zuverlässig ausgeschlossen werden (z. B. [11]). Die Einhaltung der radiologischen Schutzziele soll daher durch die geplanten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen gewährleistet werden, und zwar dadurch, dass sie den Erhalt der Funktionstüchtigkeit der Salzbarriere sichern, wo diese noch nicht geschädigt ist, und zu ausreichender Verringerung bzw. Verzögerung des Zutritts von Lösungen an die Abfälle und des Austrags von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen sowie ihres Transports in das oberflächennahe Grundwasser und damit in die Biosphäre führen.

Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept sind eine Reihe von Prozessen von potenzieller Bedeutung, darunter das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in das Endlager oder in den einschlusswirksamen

Gebirgsbereich, was zusätzliche Wegsamkeiten schaffen und zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre führen kann.

Bewertung

Die vom Antragsteller z. B. in [10] formulierten Anforderungen an den Einschluss der Abfälle bzw. die Begrenzung der Radionuklidfreisetzung entsprechen den in den Sicherheitsanforderungen des BMU [3] formulierten Ansprüchen an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Die ESK erachtet diesen vom Antragsteller selbst formulierten Anspruch als sehr ambitioniert, weil die Konfiguration der am Aufbau der Allertal-Struktur beteiligten Gesteinsfolgen und ihre barrierewirksamen Eigenschaften sowie insbesondere die frühere Nutzung der Anlage zum Salzabbau das Einschlussvermögen der Salzbarrieren des Endlagersystems einschränken. Auch mit nachträglichen baulichen Maßnahmen dürfte ein dem Gedanken des ewG entsprechendes Konzept im vollen Umfang für das ERAM nicht umzusetzen sein. Dies kann auch aus den Ergebnissen von Modellrechnungen zum Radionuklidtransport gefolgert werden, wonach unter den dafür vorausgesetzten Bedingungen wesentliche Beiträge zur Einhaltung der radiologischen Schutzziele nicht aus dem Einschluss der Abfälle in der Salzbarriere, sondern aus der Verdünnung der Stoffkonzentrationen bei Eintrag freigesetzter Lösung in das Grundwasser und beim Transport im Grundwasser des Deckgebirges über dem Endlager resultieren.

Eine intensive Auseinandersetzung mit den Leitgedanken der Sicherheitsanforderungen [3] zum ewG findet weder in [10] noch in [12] statt. In [10] wird der Begriff im Zusammenhang mit der Betrachtung menschlichen Eindringens und im Sicherheitskonzept erwähnt, genauere Ausführungen zur räumlichen Ausdehnung und zu den Konsequenzen der Einführung eines ewG auf die Nachweisführung werden nicht gemacht.

Der Leitgedanke des ewG ist ein zentrales Element der Sicherheitsanforderungen des BMU [3]. Der materielle Geltungsbereich dieser Anforderungen bezieht sich ausschließlich auf neu zu errichtende Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Beim ERAM handelt es sich um eine Anlage mit gegebenen Randbedingungen ohne Wärme entwickelnde Abfälle. Insbesondere aufgrund des wesentlich geringeren Inventars in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{14}$ Bq können die dargelegten Anforderungen an den ewG und an den Nachweiszeitraum nicht unmittelbar auf das ERAM übertragen werden. Für einen dem nach Stand von Wissenschaft und Technik geführten Langzeitsicherheitsnachweis ist von grundlegender Bedeutung, dass wesentliche Anteile der Radionuklide in tiefen geologischen Strukturen eingeschlossen werden. Aus Sicht der ESK ist daher eine inhaltliche Auseinandersetzung mit dem Konzept des ewG erforderlich um darzulegen, in welchem Umfang die Nachweisführung an diesen Grundgedanken angelehnt werden kann.

Vor allem auf der Basis von Spannungsmessungen und gebirgsmechanischen Modellrechnungen [13, 14] werden in [10] Aussagen zur Integrität der Salzbarriere getroffen. Diese Aussagen bzw. die ihnen zugrunde liegenden Sachverhalte sollten nach Auffassung der ESK den Ausgangspunkt für die Auseinandersetzung mit dem ewG-Gedanken bilden. Die Ausführungen in Abschnitt 5.1.3 dieser Stellungnahme, Absatz „Salzbarriere“, sind dabei zu berücksichtigen. Auf der Basis von Szenarienbetrachtungen sollte dann die

Belastbarkeit von Integritätsaussagen für den Nachweiszeitraum gezeigt werden. Schließlich sollte eine Diskussion der Freisetzungs- und Transportverhältnisse für Radionuklide erfolgen. Insbesondere stellt sich die Frage, inwieweit Schadstoffe in den Bereichen des Systems zurückgehalten werden, deren Entwicklung sich langfristig prognostizieren lässt. Diese Diskussion kann sich nur eingeschränkt auf die durchgeführten Modellrechnungen stützen, da diese auf starken Vereinfachungen hinsichtlich der Modellgeometrie beruhen. Darüber hinaus ist die chemische Rückhaltung der die berechnete effektive jährliche Dosis dominierenden Radionuklide im Endlagerbergwerk nicht berücksichtigt.

Können die mit dem ewG-Konzept verbundenen Anforderungen nicht oder nur in beschränktem Maße eingehalten werden, ist die Frage zu beantworten, inwiefern bei der Beurteilung der Auswirkungen von Radionuklidfreisetzung und -transport die Berücksichtigung von Radionuklidverdünnung oder -rückhaltung in nicht oder nur eingeschränkt prognostizierbaren Systembereichen zulässig ist und, wenn ja, in welchem Ausmaß. Wenn diese Prozesse für die Einhaltung der Schutzziele notwendig sind, ist aufzuzeigen, dass sie über den gesamten Betrachtungszeitraum wirksam sind. Gelingt dies nicht, ist unter Berücksichtigung der ERAM-spezifischen Ausgangslage im Sinne von [6, 7] abwägend darzustellen, ob bzw. welche Alternativen hinsichtlich der Führung des Langzeitsicherheitsnachweises bestehen und gegebenenfalls umzusetzen sind.

Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er sich in einem Dokument inhaltlich mit dem Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem Nachweiszeitraum auseinandersetzt und darlegt, in welchem Umfang die Nachweisführung an diesen Grundgedanken angelehnt werden kann (Empfehlung 1). Weitere, sich daraus ergebende Aspekte zum ewG werden in den Kapiteln 5.3 und 5.4 bewertet. Ein mögliches Vorgehen zur Auseinandersetzung mit dem ewG-Konzept wird in Kapitel 6 skizziert.

4.4 Dosis-Schutzziel

Sachverhalt

Die aus der dauerhaften Aufbewahrung resultierenden potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt dürfen auch in Zukunft das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen. Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland dürfen gemäß BfS [10] auch in Zukunft außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig. Jede Strahlenexposition und Kontamination von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten. Die aus der dauerhaften Aufbewahrung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt soll im Vergleich zur natürlichen Strahlung niedrig sein. Die erforderlichen Sicherheitsnachweise sind nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu führen.

Diese Anforderungen entsprechen – mindestens im Grundsatz – den Schutzkriterien in [4]. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit des ERAM wird als quantitatives radiologisches Schutzziel für den Menschen der Wert von 0,3 mSv im Jahr für die effektive Dosis entsprechend § 47 StrlSchV herangezogen.

Dieser Wert ist in Übereinstimmung mit jüngeren Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission [15].

Die möglichen künftigen radiologischen Auswirkungen des ERAM werden gemäß international anerkanntem Vorgehen mit Modellrechnungen ermittelt. Diese unterstellen jeweils eine mögliche zukünftige Entwicklung des Systems und decken eine Zeitspanne bis weit in die Zukunft ab. Die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Systems werden Szenarien genannt. Gewisse Szenarien sind wahrscheinlicher als andere Szenarien. Die Wahrscheinlichkeiten von Szenarien können jedoch nicht quantitativ ermittelt werden, sie lassen sich höchstens auf der Basis von Bewertungen durch Experten qualitativ ansprechen. Das von SSK und RSK empfohlene Konzept der Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers anhand eines Richtwertes wird vom BfS für die Analyse der Langzeitsicherheit des ERAM so interpretiert, dass im Rahmen der durchgeführten probabilistischen Modellrechnungen auch vereinzelte Überschreitungen der Bewertungsgröße von 0,3 mSv im Jahr akzeptiert werden können, wenn 90 % der Ergebnisse mit einem Vertrauensgrad von 90 % unterhalb dieses Wertes liegen.

Bewertung

In der Empfehlung der SSK [2] wurde folgendes radiologische Schutzziel formuliert:

- „Die potenziellen Strahlenexpositionen in der Nachbetriebsphase sollen eine effektive Individualdosis in Höhe von 0,1 mSv im Jahr bei wahrscheinlichen und 1 mSv im Jahr bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen nicht überschreiten. Auch unterhalb dieser Werte ist eine Optimierung im Sinne des § 6 StrlSchV erforderlich.“

Dabei hält die SSK [2] fest, dass die genannten Dosiswerte als Referenzwerte (und somit nicht als Grenzwerte) zu verstehen sind, da es sich um die Stilllegung eines existierenden Endlagers mit eingeschränkten planerischen Möglichkeiten handelt.

Die Empfehlungen der SSK wurden in den vorliegenden Dokumenten nicht umgesetzt. Das für alle Szenarien herangezogene - und damit wahrscheinlichkeitsunabhängige - radiologische Schutzziel von 0,3 mSv im Jahr (effektive Jahresdosis) entspricht dem von der ICRP für Endlager geforderten Wert [15], bedeutet aber im Vergleich zu den von der SSK formulierten Empfehlungen [2] ein anspruchsvolleres Schutzziel für weniger wahrscheinliche Entwicklungen, hingegen ein weniger anspruchsvolles Schutzziel für wahrscheinliche Entwicklungen. Aus Sicht der ESK entspricht das vom Antragsteller gewählte Vorgehen nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die ESK schließt sich dem Bewertungsmaßstab und der Begründung der SSK an und empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu verlangen, dass für diejenigen Rechenfälle, die die Dosis-Schutzziele von 0,1 mSv pro Jahr für wahrscheinliche und 1,0 mSv pro Jahr für weniger wahrscheinliche Fälle im SSK-Sinne eines Referenzwertes überschreiten, die wissenschaftliche Plausibilität und das Ausmaß des Überschreitens aufgezeigt werden. Die ESK hält ein Einhalten des Kriteriums mit einer 95 %igen Sicherheit und ein statistisches Vertrauen in diese Aussage von 95 % als noch

akzeptabel. Ebenso sollte das jeweilige Ausmaß des Überschreitens der Dosis-Schutzziele immer unterhalb einer Größenordnung bleiben (Empfehlung 2).

5 Bewertung

5.1 Standortcharakterisierung

5.1.1 Aufgabenstellung

Für die Durchführung einer Sicherheitsanalyse ist eine umfassende Charakterisierung des Endlagersystems erforderlich. Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Sind die Standortkenntnisse grundsätzlich ausreichend, um daraus ein belastbares Standortmodell entwickeln zu können? Welche Informationen fehlen?
- Sind die Ausführungen zur Standortcharakterisierung begründet und nachvollziehbar? Hinweise auf eventuelle Widersprüche bzw. Unstimmigkeiten sollen formuliert werden.

Bei der Standortcharakterisierung des Endlagersystems des ERAM ist zu unterscheiden zwischen den für die Langzeitsicherheit und ihre Beurteilung wichtigen Eigenschaften der geologisch-tektonischen Strukturen im Umfeld der Schachtanlagen Bartensleben und Marie einschließlich ihrer Entwicklungsgeschichte einerseits und den durch den langjährigen Salzbergbau verursachten örtlichen Veränderungen dieser Eigenschaften andererseits. Hinzu kommen diejenigen Maßnahmen und ihre sicherheitstechnischen Auswirkungen, die mit der Umsetzung der geplanten Stilllegungsmaßnahmen im ERAM verbunden sind. Das betrifft insbesondere die Einbringung von stützendem Versatz und den Einbau von Dichtungsbauwerken, mit denen das Gesamtausmaß der Konvergenz in der Salzbarriere reduziert und die Ausbreitung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen in das weitere Grubengebäude und letztlich in die Biosphäre verhindert oder doch behindert werden sollen. Auf diese Maßnahmen und ihre Konsequenzen wird nachfolgend nicht eingegangen.

5.1.2 Einzelaspekte der Standortcharakterisierung

Standortmodell

Sachverhalt

Das aus den für das Untersuchungsgebiet ERAM vorliegenden Informationen abgeleitete Standortmodell umfasst einen etwa 8 km langen und ebenso breiten Abschnitt der Allertalzone sowie der im SW bzw. im NE angrenzenden tektonischen Einheiten Lappwald-Scholle und Weferlinger Triasplatte.

Bei der Allertalzone handelt es sich um eine etwa 50 km lange, NW-SE verlaufende Salzstruktur mit im Bereich des ERAM im Niveau des Salzspiegels rund 1.700 m Breite. Die Strukturentwicklung wurde durch ein ab der Keuperzeit aktives System von NW-SE-verlaufenden und überwiegend nach Südwesten

einfallenden Abschiebungen bestimmt. Das Gesamtausmaß der durch diese Abschiebungen verursachten treppenartigen Absenkung der Oberfläche der subsalinaren Gesteinsserie nimmt von NE nach SW zu. Sie liegt daher im Südwestteil der Struktur mit rund -680 mNN mehr als 200 m tiefer als im Nordostteil (etwa -470 mNN im Ostfeld). Ausgelöst durch die Bewegungen an den Störungen drangen die salinaren Zechsteinserien in die überlagernden mesozoischen Schichten ein und stiegen in ihnen auf.

Der heutige Bauplan der Salzstruktur wird außer durch die tektonischen Initialbewegungen und den nachfolgenden Salzaufstieg auch durch "destruktive" Prozesse, insbesondere intensive kreidezeitliche Erosion in regionalem Maßstab und Subrosion geprägt. Verstärkte Subrosion fand in der Folge der kreidezeitlichen Erosion bzw. unter eiszeitlichen hydrologischen und hydraulischen Bedingungen statt.

Geometrisch bildet das für die Sicherheitsanalysen entwickelte Standortmodell die Konfiguration der das Untersuchungsgebiet aufbauenden tektonischen Einheiten Lappwaldscholle, Allertalzone und Weferlinger Triasplatte mit ihren spezifischen geologischen bzw. hydrogeologischen Einheiten ab. Den hydrogeologischen Einheiten sind – differenziert nach den drei tektonischen Einheiten – für die Grundwasserbewegung und den Radionuklidtransport mit dem Grundwasser charakteristische Durchlässigkeits- bzw. Permeabilitätswerte und/oder Bandbreiten dieser Werte zugeordnet [12, 16]. An einem Teil dieser Einheiten sind im Zuge der Standortcharakterisierung gezielte Untersuchungen zur Erhebung ihrer transportrelevanten Eigenschaften durchgeführt worden. Insbesondere für die Haupt-Strukturelemente der Allertalzone, nämlich Salzstruktur (deren oberster Bereich als Barriere fungiert), Hutgestein und Deckgebirge, und die diese aufbauenden Elemente werden diese Angaben unten durch die Darstellung und Diskussion spezifischer Sachverhalte mit sicherheitlicher Bedeutung ergänzt.

Bewertung

Zu den genannten Entwicklungsphasen der Salzstruktur Allertal und zu ihrem strukturellen Aufbau enthalten die Übersichtsdarstellungen nur wenige Angaben, die über die obige Darstellung hinausgehen (diesbezüglich wird auf [17] verwiesen). Die für die Strukturentwicklung maßgeblichen Prozesse und ihr Zusammenwirken bleiben daher undeutlich.

Ausführlicher werden dagegen der Bau der Haupt-Strukturelemente der Allertalzone, nämlich Salzstruktur, Hutgestein und Deckgebirge, bzw. deren als einschlusswirksame bzw. transporthemmende Barrieren wirkenden Anteile, und die benachbarten Bereiche der Lappwaldscholle und der Weferlinger Triasplatte dargestellt. Insbesondere werden diejenigen Eigenschaften herausgestellt, die die Bewegung des Grundwassers und den etwaigen Radionuklidtransport aus dem Endlager in die Biosphäre betreffen.

Die Standortdaten, die Grundlage für die Modellentwicklung sind, beruhen auf Erkundungsmaßnahmen, die sich über mehrere Kampagnen in einem Zeitraum von insgesamt einigen Jahrzehnten erstreckt haben. Im Hinblick auf die angewendeten Erkundungsmethoden repräsentieren sie daher unterschiedliche Stände der Erkundungstechnik.

Soweit aus den grafischen Darstellungen in den zu bewertenden Unterlagen ablesbar, steht die Konfiguration der genannten Einheiten, also ihre Ausdehnung, Form und Anordnung, grundsätzlich in Einklang mit den vorliegenden regionalen Informationen zu Mächtigkeit und Verbreitung dieser Einheiten. Aus den Darstellungen zur Bedeutung der Integrität der Salzbarriere im oberen Bereich der Salzstruktur in [10] bzw. zu ihrem Nachweis in den Schachtanlagen Bartensleben [13] und Marie [14] ist zu schließen, dass die durch die Auswirkungen des Bergbaus nicht geschädigten Zonen des Salzgesteinskörpers zwischen den hoch gelegenen ehemaligen Abbauen der Schachtanlagen und dem Salzspiegel als wichtigster Teil der einschlusswirksamen Salzbarriere angesehen werden. Der Nachweis ihrer aktuellen und künftigen Einschlusswirkung für den Nachweiszeitraum ist daher ein Kernelement des Langzeitsicherheitsnachweises.

Die Betrachtungen und Modellrechnungen zum Radionuklidtransport im Rahmen der Sicherheitsanalysen sind vor allem auf bereits bestehende bzw. potenzielle künftige Schwächezonen innerhalb der Salzbarriere und der sie überlagernden Gesteinsserien des Hutgesteins und des Deckgebirges sowie die in ihnen ablaufenden Prozesse ausgerichtet. Dabei wird einerseits unterstellt, dass die im Grubengebäude nach Verfüllung und Verschluss verbliebenen Hohlräume volllaufen werden und es andererseits anschließend zum konvergenzgetriebenen Auspressen kontaminierter Lösung über solche Schwächezonen bis ins Deckgebirge kommt.

Bei im Rahmen der Standortcharakterisierung nicht oder nur in geringem Umfang untersuchten Einheiten erscheinen die ihnen zugeordneten Werte plausibel, soweit zu den hydrogeologischen Einheiten Erfahrungswerte aus benachbarten Regionen vorliegen. Für die Einheiten des Neben- und Deckgebirges der Salzstruktur ist das dann der Fall, wenn es sich z. B. um für die Wassergewinnung genutzte Einheiten handelt. Dies gilt nicht für solche Zonen, die zwar aus bekannten Einheiten bestehen, aber durch tektonisch ungewöhnlich stark gestörten Aufbau gekennzeichnet sind, insbesondere die sogenannte Nordostrand-Störungszone der Allertalzone und der Grenzbereich zwischen Allertalzone und Lappwaldscholle (Südweststrandstörung).

Die abdeckende Plausibilitätsprüfung der für die Einheiten angesetzten Durchlässigkeitswerte ist auf Grundlage der hier hauptsächlich herangezogenen Übersichtsunterlagen nicht möglich. Unabhängig davon ist auf Basis dieser Unterlagen allein nicht abschließend beurteilbar, ob die Werte für die einzelnen hydrogeologischen Einheiten repräsentativ sind und inwieweit die verfügbaren Informationen das Untersuchungsgebiet insgesamt zuverlässig beschreiben. Für spezielle Betrachtungen der Radionuklidrückhaltung in bestimmten Modelleinheiten wurden diesen auf Grundlage von Analogieschlüssen und gezielten Untersuchungen im Bereich des ERAM Sorptionskennndaten zugeordnet [10, 12].

Besondere sicherheitstechnische Bedeutung haben diejenigen geologischen Einheiten und technischen Komponenten, die unmittelbar für den Einschluss der Radionuklide (und anderer abfallbürtiger Schadstoffe) im Endlager maßgeblich sind bzw. deren etwaigen Transport mit dem Grundwasser in die Biosphäre in ausreichendem Maße behindern sollen. Ersteres betrifft vor allem die Salzbarriere über den Abbauen. Das die Salzbarriere am Salzspiegel überlagernde Hutgestein und die mit diesem direkt oder indirekt in hydraulischem Kontakt stehenden Einheiten des Deckgebirges der Allertalzone müssen dagegen den

Transport von etwa aus dem Salzgesteinskörper freigesetzten Radionukliden begrenzen. Diesen Einheiten hat der Antragsteller daher seine besondere Aufmerksamkeit bei der Standortcharakterisierung und im Rahmen von Langzeitsicherheitsnachweis und Sicherheitsanalyse gewidmet.

Salzbarriere

Sachverhalt

Die zechsteinzeitliche Salinarabfolge im Bereich des ERAM umfasst die Einheiten der Staßfurt-, Leine- und Aller-Folge. Die Mächtigkeit der Salinarabfolge (bis zum Salzspiegel) beträgt als Folge der Niveauunterschiede ihrer Basis (s. o.: Standortmodell) im SW ca. 540 m, im NE ca. 330 m.

Der interne Bau der Salzstruktur ist durch ausgeprägte NW-SE-verlaufende Falten in den salinaren Schichtfolgen gekennzeichnet. Dabei ist der südwestliche Strukturteil durch isoklinale, NE-vergente Falten geprägt, während im Nordostteil weitspannige Sättel und Mulden vorherrschen. Wegen der besonderen Fließfähigkeit des Staßfurt-Steinsalzes bestehen die Sattelkerne aus dieser Einheit, das Muldeninnere aus den Einheiten der Leine-Folge und der weitgehend auf den Nordostteil der Salzstruktur (Ostmulde) beschränkten Aller-Folge.

Während der Strukturbildung reagierte das Kaliflöz Staßfurt auf die salztektonische Beanspruchung mit Anstau in den Faltenscharnieren und starker Ausdünnung in den Faltenschenkeln. Der Hauptanhydrit über dem Kaliflöz reagierte – wie andere Einschaltungen mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften (Anhydrit, Salzton) auch – aufgrund seiner spröden Eigenschaften bruchhaft auf die salztektonische Beanspruchung. Er ist geklüftet und liegt heute in der Salzstruktur verbreitet in Form einzelner, durch Salz getrennter Schollen oder in Strängen vor. Auf Grund des intensiven und steil stehenden Faltenbaus reichen Kaliflöz und Hauptanhydrit (und benachbarte Einheiten) an mehreren Stellen bis zum Salzspiegel, der Hauptanhydrit auch in das Hutgestein.

Steinsalz und Kalisalz weisen in unverritztem Zustand sehr geringe Permeabilität auf ($< 10^{-20} \text{ m}^2$). Um Auffahrungen bilden sich Auflockerungszonen von bis zu wenigen Metern Ausdehnung, in denen die hydraulische Durchlässigkeit erhöht ist. In den stark durchbauten Bereichen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie können sich die Auflockerungszonen von Abbau zu Abbau erstrecken, d. h. diese hydraulisch miteinander verbinden. Die mechanisch kompetenten Gesteinsfolgen, insbesondere Hauptanhydrit und Serien mit mechanisch vergleichbaren Eigenschaften, können wegen ihrer Klüftigkeit erhöhte Wasserdurchlässigkeit entlang vernetzter Wasserwegsamkeiten aufweisen.

Bewertung

Im durch den Bergbau ungestörten natürlichen Zustand gilt die Salzbarriere als dicht. Natürliche potenziell wasserwegsame Schwachstellen in der Salzbarriere stellen insbesondere Stränge und schollenartige

Einschaltungen von geklüftetem Hauptanhydrit (und mechanisch ähnlichen Einheiten), aber auch natürlich entstandene potenziell wasserwegsamer Klüftzonen in der Salzbarriere selbst dar, und zwar dann, wenn sie direkt oder über klüftige Gesteinseinschaltungen indirekt in Kontakt mit dem Salzspiegel und dem Hutgestein in Verbindung stehen und bis an Endlagerhöhlräume bzw. die umgebende Auflockerungszone reichen. Solche Zonen werden daher als potenzielle Zutritts- oder Austrittswege für Lösungen in das bzw. aus dem Grubengebäude betrachtet.

Eine solche wasserwegsamer Zone im Salzgestein wird für den Lösungszutritt in Lager H der Grube Marie verantwortlich gemacht [14, 16]. Sie soll ihre Ursache nicht in der Destabilisierung durch benachbarte Abbauhöhlräume haben, sondern mit einer offenbar durch Kalisalzeinschaltungen verursachten Rinne verstärkter Subrosion am Salzspiegel über Lager H in Verbindung stehen. Für diese Zone wurden durch Anwendung des Dilatanzkriteriums auf Grundlage der gebirgsmechanischen Modellrechnungen zum Integritätsnachweis für die Zukunft keine Integritätseinbußen festgestellt. Laut [13] und [14] gilt der Nachweis als geführt, wenn mindestens eines der beiden nach Kapitel 7.2.1 in [3] einschlägigen Kriterien (Dilatanzkriterium, Laugendruckkriterium) erfüllt ist. In den Sicherheitsanforderungen [3] wird die Einhaltung beider Kriterien gefordert. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass beim Integritätsnachweis für die Salzbarriere sowohl das Dilatanzkriterium als auch das Laugendruckkriterium umgesetzt werden (siehe Empfehlung 3).

Vor dem Hintergrund der Verhältnisse in Lager H der Grube Marie muss festgestellt werden, dass der rechnerische gebirgsmechanische Integritätsnachweis allein kein Beleg für die verlässliche Einschlusswirkung der Salzbarriere ist. Hierzu wäre neben der Anwendung des Laugendruckkriteriums vielmehr die systematische Erfassung potenzieller Schwachstellen der genannten Typen erforderlich. Darauf hat der Antragsteller verzichtet. Es hat einen potenziellen Zutritt von Wasser aus dem Deckgebirge an verschiedenen Zutrittsorten [11] unterstellt und im Hinblick auf die Konsequenzen beurteilt. Nicht nachvollziehbar aus den zu bewertenden Unterlagen ist, ob dieses Szenarium die Konsequenzen vollständig abdeckt. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass dieser hinsichtlich radiologischer Konsequenzen den abdeckenden Charakter des Szenariums mit einem potenziellen Zutritt von Wasser aus dem Deckgebirge an verschiedenen Zutrittsorten zu belegen hat (siehe Empfehlung 3).

Salzspiegel, Hutgestein

Sachverhalt

Im Bereich der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie liegt der Salzspiegel weitgehend flachsöhlig bis leicht gewellt in einer Tiefe von ca. -140 mNN. An einigen Stellen kommen als Folge selektiver Subrosion des Kaliflözes Staßfurt Eintiefungen bis 35 m unter das allgemeine Niveau vor.

Das Hutgestein besteht aus den durch Lösungs- und Rekristallisationsprozesse überprägten Subrosionsresten der Salzbarriere, insbesondere Anhydrit und Gips, daneben aus Ton- und Karbonatgesteinen. Seine

Verbreitung entspricht der Erstreckung des Salzspiegels. Die Mächtigkeit variiert stark zwischen einigen 10er m und ca. 240 m.

Ungestörtes Hutgestein ist hydraulisch gering durchlässig und wurde – selbst im Bereich offener Klüfte – in der Regel trocken angetroffen. Letzteres gilt auch für den Salzspiegel. Andererseits existieren im Hutgestein örtlich Zonen mit erhöhter Permeabilität. Hierzu gehören insbesondere erhalten gebliebener Hauptanhydrit und die ihn begleitende Gesteinsfolge aus Deckanhydrit, Grauem Salzton und Leine-Karbonat, die unter der Bezeichnung "DGL" zusammengefasst wird. Sie können in Kontakt mit korrespondierenden Serien in der Salzbarriere stehen. Solche Schwächezonen aus potenziell geklüfteten und hydraulisch wirksamen Gesteinsfolgen, die auch das Hutgestein von dessen Obergrenze bis zum Salzspiegel durchziehen, sind nicht belegt. Die mögliche künftige Entstehung einer solchen Zone wurde dennoch in die Sicherheitsbetrachtung einbezogen.

Nach [10] zeigt das Grundwasser im Hutgestein im Allgemeinen diffusionsdominierte Vertikalprofile von NaCl-Konzentration und Grundwasseralter, wobei letztere aus Isotopenuntersuchungen abgeleitet sind. Sie weisen auf eine geringe, nach unten gerichtete Bewegungsrate des Grundwassers hin. Die Ergebnisse von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge passen zu diesem Befund.

Die Hutgesteinsbildung war in der geologischen Vergangenheit unterschiedlich intensiv. Phasen erhöhter Subrosion lagen insbesondere in der Oberkreide als Folge starken Salzaufstiegs und intensiver Erosion und im Quartär bei eiszeitlichen Bedingungen vor. Nach [10] findet gegenwärtig aufgrund der tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse praktisch keine Subrosion statt. In den kommenden 150.000 Jahren könne selbst bei Unterstellung extremer Szenarien (Permafrost) nur eine Steinsalzschiebt mit der Mächtigkeit von ca. 2 m aufgelöst werden.

Bewertung

Der Salzspiegel wurde bei Erkundungsbohrungen verbreitet trocken und ohne erhöhte Permeabilität angetroffen. Hydraulische Tests ergaben nur örtlich erhöhte Durchlässigkeit. Das Hutgestein gilt als im Allgemeinen sehr gering permeabel. Diese Beobachtungen werden in nachvollziehbarer Weise im Sinne derzeit geringer Subrosion interpretiert und schließen einen entsprechenden flächenhaften Grundwasserstrom im Salzspiegelbereich (und gegebenenfalls Radionuklidtransport) aus.

Hinsichtlich der flächenhaften Subrosion ist diese Befundinterpretation plausibel, auf etwaige aktuelle oder künftige "lineare" Subrosionsprozesse ist sie jedoch nicht ohne Weiteres übertragbar: Mit Bezug zur erwähnten dargestellten Schwächezone in der Salzbarriere bei Lager H in Schachanlage Marie als Folge selektiver Subrosion des Kaliflözes Staßfurt wird in [16] eine Modellvorstellung dargestellt, nach der Bereiche mit selektiver Subrosion bei Kalisalzausbissen am Salzspiegel zumindest potenzielle Migrationspfade darstellen können. Im Bereich solcher Pfade ist lineare rezente Subrosion a priori nicht auszuschließen, Belege gibt es dafür aber offenbar nicht.

Der Salzspiegel weist örtlich Vertiefungen auf, die im Sinne selektiv vorauseilender Subrosion des Kalisalztes Staßfurt interpretiert werden [10]. An der tiefsten bekannten Stelle reicht eine solche Zone bis 35 m unter das Normalniveau des Salzspiegels. Das Lager H in Schachanlage Marie befindet sich unter einer solchen Zone, wodurch der dortige Lösungszutritt seine Erklärung erfährt. Beim Integritätsnachweis [10] wird die beschriebene Situation als Schwachstelle in der Barriere beispielhaft berücksichtigt.

Auch für das Auftreten potenziell wasserwegsamere klüftiger Gesteine im Salzspiegelbereich und im Hutgestein wird in [10] ein modellhaftes Beispiel dargestellt. Es handelt sich um einen aus der Salzbarriere über den Salzspiegel in das Hutgestein hineinreichenden Hauptanhydritstrang, der von Deckanhydrit, Grauem Salzton und Leine-Karbonat begleitet wird (s. o.). Für Modellbetrachtungen zum Radionuklidtransport ist ihnen gegenüber der "Normalausbildung" des Hutgesteins erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit zugeordnet. Grundlage dafür sind Ergebnisse hydraulischer Tests, die örtlich Indikationen bzw. Belege für Wasserwegsamkeiten in diesem Schichtabschnitt geliefert haben [16]. Es wird unterstellt, dass eine solche, den Salzspiegel und das Hutgestein durchschlagende Zone eine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Salzspiegel und oberflächennahem Grundwasser im das Hutgestein überlagernden Deckgebirge bilden kann. Auch diese Situation wird im Sicherheitsnachweis beschrieben und auf der Basis von Modellrechnungen sicherheitlich bewertet.

Den zu bewertenden Unterlagen [10, 12] ist nicht entnehmbar, wie vollständig die Erfassung der beiden beschriebenen Typen von Schwächezonen im Salzspiegelbereich ist, über die einerseits Wasser in die Salzbarriere und Hohlräume im Endlager eindringen kann, andererseits aber auch kontaminierte Lösung in den Salzspiegelbereich und das Hutgestein ausgepresst werden kann. Da eine vollständige Erfassung aller Schwächezonen nicht möglich ist, wurde die Lokation eines möglichen Lösungszutritts an einer beliebigen Stelle außerhalb der abgedichteten Einlagerungsbereiche unterstellt. Ob dieses Vorgehen im Hinblick auf die radiologische Konsequenz einer Freisetzung abdeckend ist, ist aus den zu bewertenden Unterlagen nicht abschließend ableitbar. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er den abdeckenden Charakter des gewählten Vorgehens bzgl. Lösungszutritten belegt (siehe Empfehlung 3).

Deckgebirge

Sachverhalt

Die drei tektonischen Einheiten des Deckgebirges (Lappwaldscholle, Allertalzone, Weferlinger Triasplatte, von SW nach NE) werden durch die beidseitigen Randstörungen von der Allertalzone getrennt. Innerhalb der Lappwaldscholle und insbesondere in der Weferlinger Triasplatte zeigt das Deckgebirge einen im Vergleich zur Allertalzone relativ ruhig gelagerten Aufbau mit außerhalb der Randstörungen weitgehend flach lagernden, hydraulisch weniger und stärker durchlässigen Schichten. In der Weferlinger Triasplatte gehören sie im Wesentlichen dem Buntsandstein an, in der Lappwaldscholle der Schichtfolge Muschelkalk bis Oberer Keuper.

Das Deckgebirge in der Allertalzone weist – vereinfacht ausgedrückt – einen zweigeteilten Aufbau

auf [10, 16, 18]:

In einem strukturparallelen östlichen Streifen mit relativ gering mächtigem Hutgestein besteht das Deckgebirge im Wesentlichen aus flach muldenförmig lagernden Gesteinsserien des Mittleren Keupers. Mit Ausnahme von sandigen Einschaltungen im sogenannten Schilfsandstein ist die Gebirgsdurchlässigkeit der hydrostratigraphischen Einheiten relativ gering. Den Ostrand dieses Streifens bildet die oben (Standortmodell) erwähnte Nordostrand-Störungszone, an die sich östlich die flach lagernden Nebengebirgsserien des Unteren und Mittleren Buntsandstein der Weferlinger Triasplatte anschließen.

Der an die Lappwaldscholle grenzende westliche Streifen des Deckgebirges ist über der zentralen Allertalzone durch mächtiges Hutgestein mit ausgeprägter Kulmination der Hutgesteinsoberfläche gekennzeichnet. In diesem Bereich befinden sich die oben erwähnten Schwächezonen am Salzspiegel und im Hutgestein. Westlich der Kulmination nimmt die Mächtigkeit des Hutgesteins in Richtung Lappwaldscholle rasch ab. Das Hutgestein wird hier von muldenförmig verformten Gesteinen des Unteren Jura und vor allem der Oberkreide überlagert, diese wiederum von Quartärsedimenten ("Oberkreide-Trog"). In der Ostflanke des Oberkreide-Troges liegt die Basis der Kreideserien örtlich offenbar direkt dem Hutgestein auf. Seine Westflanke stößt an die in Einzelschollen zerlegten Gesteine der Lappwaldscholle, die hier überwiegend aus Schichten des Mittleren Keuper bestehen [16, 18]. Die Jura- bzw. Oberkreidesedimente an der Basis des Oberkreide-Trogs sind schluffig bis tonig entwickelt und weisen demnach relativ geringe Wasserdurchlässigkeit auf. Die überlagernden Oberkreideserien sind nach oben zunehmend sandig und entsprechend durchlässiger ausgebildet.

Die Grundwasserbewegung im Deckgebirge der drei Einheiten ist generell auf die Aller ausgerichtet – das Allertal bildet die regional dominierende Exfiltrationszone. In relativ höher durchlässigen Schichten kann die Grundwasserbewegung auch eine nennenswerte Komponente längs des Allertals aufweisen. Sie nimmt mit der Tiefe wegen versalzungsbedingt zunehmender Dichte des Grundwassers deutlich ab.

Dies wird auch durch isopenhydrologische Untersuchungen gestützt. Danach weist das Grundwasser in den oberen Schichten bis ca. 120 m unter Gelände Alter jünger als 10.000 Jahre auf. Darunter folgen Grundwässer mit Altern zwischen 15.000 und 100.000 Jahren bis ca. 300 m unter Gelände. In den Tiefen darunter wurden, insbesondere in Gesteinen geringer Wasserdurchlässigkeit, Millionen Jahre alte Wässer gefunden. Abweichungen von diesem übergeordneten Muster können in Zonen erhöhter Wasserdurchlässigkeit auftreten. Dies gilt insbesondere für Sandsteineinschaltungen in dominierend feinkörnigen Serien (z. B. Schilfsandstein) [16]. Örtlich wurden zudem Grundwässer nachgewiesen, die auf Grund ihrer hydrochemischen Zusammensetzung und ihrer Isotopensignatur als Indikatoren für den Aufstieg von Tiefenwasser interpretiert werden.

Der oberflächennahe verdünnende Grundwasserfluss in einem 200 m langen Abschnitt des Allertals liegt im Mittel pro Talflanke im Bereich von etwa 15.000 m³ pro Jahr, entsprechend knapp 30 l/min [10].

Bewertung

Die in [10, 12] dargestellten Ergebnisse von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge der Allertalzone und im benachbarten Nebengebirge zeigen, dass über die erwähnten Schwächezonen im Bereich von Salzspiegel und Hutgestein ins Deckgebirge freigesetzte Radionuklide die tektonischen Nachbareinheiten der Allertalzone entweder gar nicht (Lappwaldscholle) oder nur über relativ lange Wege erreichen (Weferlinger Triasplatte). Dabei wurde vorausgesetzt, dass die im Standortbereich beobachtete tiefengesteuerte Versalzung des Grundwassers in Deck- und Nebengebirge die natürliche Grundwasserbewegung mit zunehmender Tiefe nachhaltig behindert. Voraussetzung für einen in Richtung auf oberflächennahe Grundwasserleiter gerichteten Schadstofftransport aus dem Endlager in die Biosphäre ist daher die Auspressung kontaminierter Lösung in das Hutgestein.

Für die Entwicklung einer belastbaren Modellvorstellung zur Grundwasserbewegung im und zum Schadstofftransport durch das Deckgebirge der Allertalzone ist vor allem dessen Gliederung in Zonen mit unterschiedlichen hydrostratigraphischen Einheiten mit unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften bei gleichzeitig unterschiedlichem Grad der Beanspruchung der beteiligten Gesteinsserien durch tektonische Vorgänge oder Subrosion entscheidend. Bei schwacher Beanspruchung führt der heterogene Aufbau der Zonen zu stockwerkartig differenzierten Strömungsverhältnissen und damit zur "Kanalisation" von Grundwasserbewegung und Stofftransport in mehr oder weniger horizontaler Richtung. Tektonische oder andere Störungen oder Klüfte verursachende Beanspruchung kann zu lokal erhöhter Wasserdurchlässigkeit in eher vertikaler Richtung und entsprechenden Aufstiegswegen für tiefes Grundwasser führen.

Im Hinblick auf die zuverlässige Beschreibung und Beurteilung eines etwaigen Grundwassertransports von Radionukliden im Deckgebirge der Allertalzone ergeben sich aus diesen Zusammenhängen Ungewissheiten bei den randlichen Störungszonen im Grenzbereich zur Weferlinger Triasplatte und zur Lappwaldscholle sowie im Bereich des Oberkreide-Trogs westlich der Kulmination der Hutgesteinsoberfläche. Der Oberkreide-Trog ist offenbar vor allem durch die kumulative Wirkung von Salzaufstieg und Subrosion entstanden, wobei subrosionsbedingte Vertikalbewegungen bis in die Quartärzeit belegt sind [19, 20]. Auch hier können sich Aufstiegswege für tiefes Grundwasser [16] gebildet haben, die bei Anbindung an eine der oben dargestellten Schwächezonen in Salinar- und Hutgestein als Transportpfad für Radionuklide in Frage kommen.

5.1.3 Zusammenfassende Bewertung zur Standortcharakterisierung

Die Standortkenntnisse sind grundsätzlich ausreichend, um daraus das geologisch-hydrogeologische Standortmodell des Antragstellers entwickeln zu können. Dies gilt sowohl hinsichtlich der Konfiguration der tektonischen Einheiten (Lappwald-Scholle, Allertalzone und Weferlinger Triasplatte) und der sie aufbauenden geologisch-hydrogeologischen Elemente als auch - in der Regel - hinsichtlich der diesen zugeordneten Eigenschaften. Einschränkungen bestehen bei solchen Elementen, zu denen aus der Standortcharakterisierung oder Erkenntnissen aus Untersuchungen mit anderer Zielsetzung – auch aus Nachbarregionen mit vergleichbaren geologischen Verhältnissen – nur lückenhafte Erkenntnisse vorliegen.

Einschränkungen bestehen nach Auffassung der ESK in den ausgewerteten Übersichtsunterlagen [10, 12] im Hinblick auf die Konfiguration und die für Sicherheitsanalysen wichtigen barrierewirksamen bzw. transportrelevanten Eigenschaften der ausgeschiedenen Einheiten, insbesondere Permeabilität bzw. Gebirgsdurchlässigkeit. Aussagen über den räumlichen Deckungsgrad der vorhandenen Daten und ihre Repräsentativität für die jeweiligen Einheiten sind auf Grundlage der Übersichtsdarstellungen nicht möglich. Teilweise ist die Datenbasis in dieser Hinsicht eingeschränkt [16]. Das wirkt sich auch auf die Aussagekraft des Standortmodells aus.

Diese Einschränkungen gelten teilweise auch für die Modelleinheiten mit besonderer Bedeutung für den Einschluss der Radionuklide, namentlich Salzbarriere, Salzspiegel, Hutgestein und benachbartes Deckgebirge. Besonders betroffen sind diejenigen Strukturbereiche, die durch spezielle hydrogeologische und hydraulische Gegebenheiten gekennzeichnet sind. Bei Salzbarriere und Hutgestein gehören dazu insbesondere die wasserwegsamem Bereiche um Zonen selektiver Subrosion am Salzspiegel sowie Stränge der Schichtenfolge "DGL" (bzw. von Hauptanhydrit), die aus der Salzbarriere bis in das Hutgestein hineinreichen und sich möglicherweise bis an die Grenze zum Deckgebirge erstrecken. Beim Deckgebirge betrifft dies die während der Entwicklung der Allertalzone tektonisch stark beanspruchten Grenzbereiche zur Weferlinger Triasplatte und zur Lappwaldscholle sowie insbesondere den an die Lappwaldscholle angrenzenden Bereich der Allertalzone mit dem Oberkreide-Trog.

Als Folge davon kann das Einschlussvermögen des Endlagersystems allein auf Grundlage der materiellen Standortgegebenheiten, wie sie in den Übersichtsdarstellungen deutlich werden, nicht zuverlässig beurteilt werden. Der eingeschränkten Datenbasis wird vom Antragsteller dadurch begegnet, dass Bandbreiten plausibler Parameterwerte eingesetzt oder Sachverhalte unterstellt werden, die die Berechnung des Radionuklidtransportes in bestimmten Schwächezonen erlauben. Die Realitätsnähe bzw. Plausibilität dieser Vereinfachungen ist für die ESK anhand der zu bewertenden Unterlagen nur eingeschränkt bewertbar. Die ESK empfiehlt dem BMU vom Antragsteller zu fordern, dass er seine Strategie zum Umgang mit den etwa verbleibenden Ungewissheiten darlegt und diese Ungewissheiten systematisch bewertet (siehe Empfehlung 3).

Zur Beurteilung eines etwaigen Radionuklidtransportes mit aus der Salzbarriere ausgepresster kontaminierter Lösung über Subrosionszonen und/oder Hutgestein ins Deckgebirge und der resultierenden radiologischen Konsequenzen werden Modellrechnungen eingesetzt, mit denen unter Berücksichtigung der angenommenen hydraulischen und hydrochemischen Gliederung von Deckgebirge und Nebengebirge Trajektorienverläufe zwischen Salzspiegel bzw. dem Austrittsort ausgepresster Lösung aus dem Hutgestein und oberflächennahem Grundwasser bestimmt werden. Die Ergebnisse erscheinen plausibel, ihre Realitätsnähe bzw. ihr abdeckender Charakter ist aber - wie bei den einfließenden Werten für die Gebirgsdurchlässigkeit der beteiligten hydrogeologischen Einheiten und der sonstigen hydraulischen Rahmenbedingungen - auf Grundlage der Übersichtsdarstellungen [10, 12] nicht im Detail nachvollziehbar. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, die für die Berechnung der Konsequenzen von Radionuklidfreisetzung und -transport zugrunde gelegten Sachverhalte und Parameterbandbreiten zu begründen und den Realitätsbezug bzw. den abdeckenden Charakter seiner Modellierungsansätze und der Ergebnisse der Modellrechnungen darzustellen und zu belegen (siehe Empfehlung 3).

Die Ausführungen in den Übersichtsberichten zur Standortcharakterisierung, insbesondere zu sicherheitsrelevanten Sachverhalten, werden mit bereits bekannten Sachverhaltsdarstellungen bzw. Verweis auf im Zuge der Standortcharakterisierung erhobene Informationen begründet. Offenkundige Widersprüche oder Unstimmigkeiten in der Standortcharakterisierung sind den Übersichtsdarstellungen nicht zu entnehmen.

5.2 Modellierung

5.2.1 Aufgabenstellung

Im vorliegenden Kapitel werden das Konzept des Sicherheitsnachweises und die Berechnungsmethode bewertet. Der Langzeitsicherheitsnachweis wird mit Hilfe von deterministischen und probabilistischen Modellrechnungen mit den Programmen PROSA (AF Colenco AG) und EMOS (GRS) geführt und in den Berichten [21] und [22], auf die sich der Beratungsauftrag bezieht, dokumentiert: Zusätzlich existiert die Unterlage [10], die die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalysen zusammenfassend darstellt.

Im Einzelnen wird gemäß der auf der 23. Sitzung des ESK-Ausschusses EL am 19.01.2012 getroffenen Festlegungen folgenden Fragestellungen nachgegangen:

- Ist der strategische Aufbau der Modellierung sinnvoll, angemessen und nachvollziehbar?
- Sind die verwendeten Abstraktionen grundsätzlich gerechtfertigt?
- Sind die Begründungen für Vereinfachungen (z. B. eindimensionale statt mehrdimensionale Betrachtung) plausibel?

Im Folgenden werden Anmerkungen gemacht, die sich auf das Konzept des Langzeitsicherheitsnachweises generell beziehen.

5.2.2 Geometrische Modellstrukturen und verwendete Rechencodes

Sachverhalt

Die Grube Bartensleben weist in der Realität eine komplexe Kammer-Strecken-Netzwerkstruktur auf, die sich über sieben Sohlen erstreckt. In beiden Langzeitsicherheitsanalysen [21] und [22] wird diese Struktur durch stark abstrahierte eindimensionale Kompartiment-Modelle wiedergegeben.

Die Kompartimente werden entsprechend ihrer Funktion in der Nachverschlussphase gegliedert:

Im Fall des **PROSA-Modells** [21] (Abb. 1) werden die Einlagerungsbereiche (ELB) Ostfeld, West-Südfeld (ELB WSF: die Kombination berücksichtigt die Verbindung beider Felder durch ein Entlüftungsbohrloch auf der ersten Sohle), Zentralteil und Nordfeld unterschieden. Alle vier ELB werden durch „Wegsamkeiten“ mit jeweils einem zugehörigen Mischungsbereich verbunden, wobei im Fall des West-Südfeldes und des

Ostfeldes die Streckenabdichtungen, die die beiden ELB auf verschiedenen Sohlen von dem übrigen Grubengebäude abdichten, durch einen homogenisierten hydraulischen Widerstand repräsentiert werden. Diese vier Mischungsbereiche stellen Teilbereiche des übrigen Grubengebäudes dar, wobei offengelassen wird, ob zwei Mischungsbereiche ein und denselben oder verschiedene Grubenbaue repräsentieren. In die Mischungsbereiche werden, angetrieben durch die Hohlraumkonvergenz, Lösungen sowohl aus den ELB als auch aus der Restgrube (Grubenbaue, die nach Auffassung des Antragstellers nicht zur Vermischung beitragen) eingepresst. In den Mischungsbereichen kommt es durch instantane homogene Durchmischung mit den in den Mischungsbereichen anstehenden und den aus der Restgrube ausgepressten Lösungsvolumina zu einer Verdünnung der aus den ELB stammenden Schadstoffkonzentrationen.

Alle vier Mischungsbereiche sind an (örtlich nicht spezifizierte) Lösungswegsamkeiten in Hutgestein und Deckgebirge und nachfolgend an das Verdünnungskompartiment „Oberflächennahes Grundwasser“ angeschlossen. Die Kompartimente, die das Grubengebäude repräsentieren, werden im Hinblick auf ihr Konvergenzverhalten in unverfüllte, kompaktierbar verfüllte und gering bis nicht kompaktierbare Volumina untergliedert. Alle im PROSA-Modell enthaltenen Kompartimente weisen das gleiche Teufenniveau auf. Dies bedeutet, dass alle teufenabhängigen Parameter (insbesondere Gasdrücke sowie hydro- und lithostatische Drücke) auf eine Referenzteufe bezogen werden.

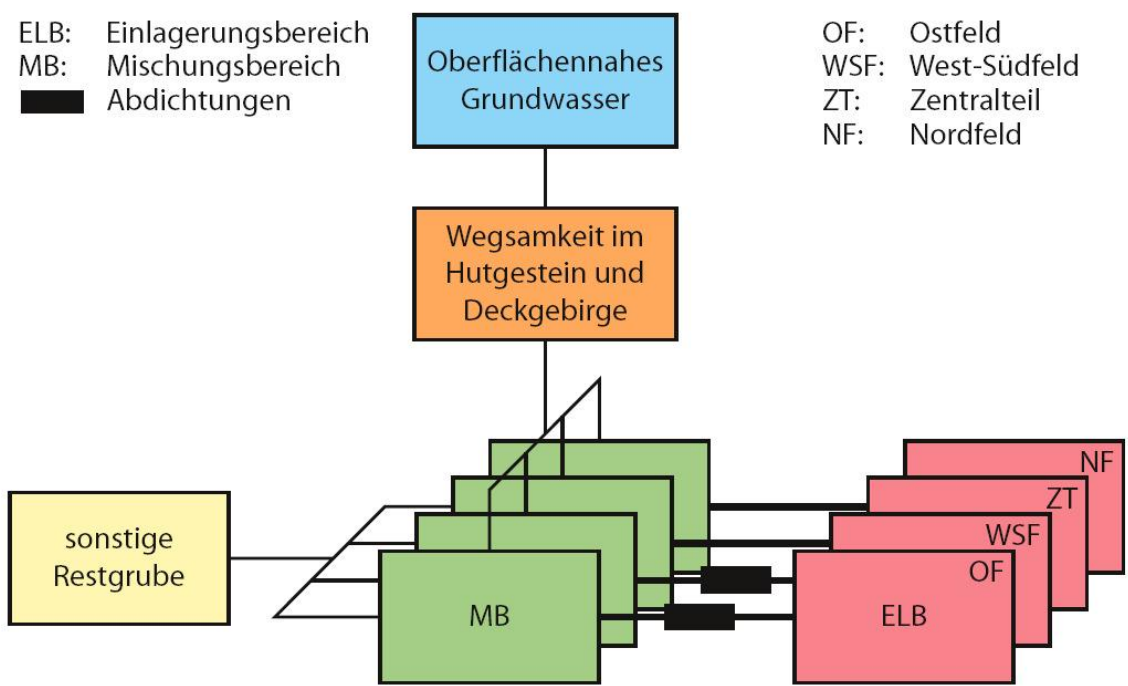


Abb. 1: Strukturmodell des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit PROSA [21].

Etwas komplexer ist das **EMOS-Modell** [22] (Abb. 2) aufgebaut. Zur PROSA-Modellstruktur bestehen folgende Unterschiede:

- Südfeld und Westfeld werden durch zwei separate, miteinander ohne hydraulischen Widerstand

verbundene ELB-Kompartimente repräsentiert.

- Das Ostfeld wird in die Teilkompartimente Streckenstummel mit Sohlenbohrloch (Einlagerungsort Radiumfass) sowie das übrige Ostfeld (nach 1994 eingelagerte schwachradioaktive Abfälle) gegliedert (diese Untergliederung ist in Abb. 2 nicht enthalten).
- Die Mischungsbereiche Bartensleben und Marie werden getrennt ausgewiesen. Sie sind über ein Verbindungskompartiment miteinander verbunden. An den Mischungsbereich Bartensleben sind über hydraulische Widerstände, die die entsprechenden Streckenabdichtungen repräsentieren, das mit dem Westfeld verbundene Südfeld, das Ostfeld, der nicht abgedichtete Zentralteil sowie die „sonstige Restgrube Bartensleben“ angeschlossen. Der Mischungsbereich Marie steht in Verbindung mit der „sonstigen Restgrube Marie“. Direkt an das Verbindungselement zwischen beiden Mischungsbereichen ist der nicht abgedichtete ELB Nordfeld angeschlossen.
- Durch die gewählte Modellgeometrie kann alternativ die Auspressung von schadstoffhaltigen Lösungen aus dem Mischungsbereich Bartensleben in die Übertrittsstelle auf der obersten Sohle oder die Auspressung von schadstoffhaltigen Lösungen aus dem Mischungsbereich Marie in die dortige Übertrittsstelle simuliert werden.

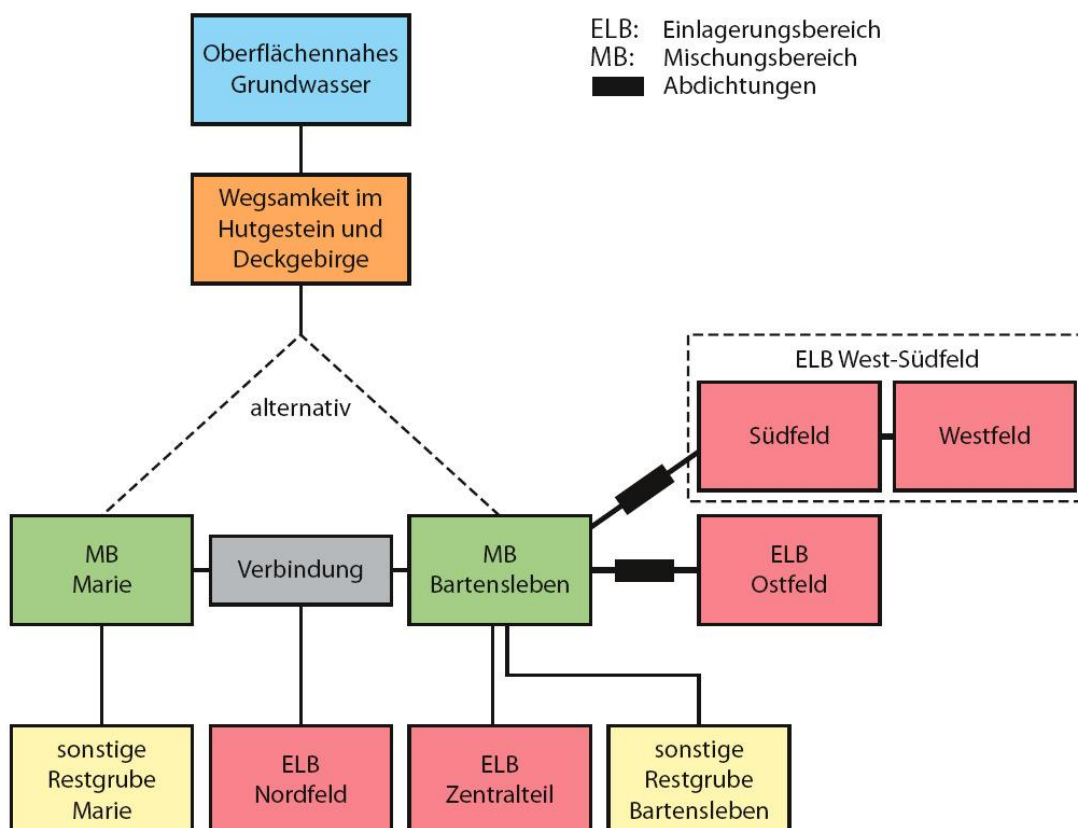


Abb. 2: Strukturmodell des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit EMOS [22].

Bewertung

Unabhängig von den im Nachfolgenden dokumentierten kritischen Anmerkungen begrüßt die ESK, dass der Antragsteller den Sicherheitsnachweis auf der Basis von zwei Langzeitsicherheitsanalysen führt, die auf Modellrechnungen mit unterschiedlichen Programmen (PROSA [21], EMOS [22]) und teilweise unterschiedlichen Modellannahmen unterschiedlicher Institutionen beruhen. Hierdurch wird ein gewisses Maß an Diversität erzielt, was sich positiv auf die Qualitätssicherung der Rechenergebnisse auswirkt.

- 1 Beide Langzeitsicherheitsanalysen werden auf der Grundlage geometrisch **stark vereinfachter und abstrahierter Modelle** durchgeführt. Es wurden Vereinfachungen durchgeführt, die wesentliche Einflussgrößen der Transportvorgänge tangieren und auf einem durch Expertenurteil vorgegebenen Strömungsablauf von Gasen und Lösungen im Grubengebäude beruhen. Es ist davon auszugehen, dass das komplexe Netzwerk von Grubenbauen im ERAM in einem lösungsgefüllten Zustand ein entsprechend komplexes Transportverhalten aufweist. Durchaus vorstellbar sind dichtegetriebene Strömungen als auch gasdruckinduzierte Ringströme, angetrieben durch die in den ELB gebildeten Gase, den hydrodynamischen Druck und die Konvergenz der Hohlräume, die in einem mehrsöhligen Endlager ein komplexes Strömungsmuster erzeugen können. Es ist zumindest a priori nicht auszuschließen, dass sich aufgrund der Verteilung lösungs- und gasgefüllter Bereiche Konfigurationen ergeben, die dazu führen können, dass Schadstofffahnen ohne eine vorherige vollständige Durchmischung mit nicht kontaminierten Lösungsvolumina aus der übrigen Restgrube und den Mischungsbereichen über die Übertrittstellen in Hutgestein und Deckgebirge gelangen können. Insofern wird insbesondere die in den Modellen implizierte räumlich homogene Durchmischung in den Mischungsbereichen ohne einen belastbaren Nachweis der Zulässigkeit dieser Vereinfachungen kritisch gesehen.
- 2 Generell bleibt offen, ob die **Heterogenität der Kompartiment-intern ablaufenden physikalischen Prozesse** durch die angesetzten Modellvereinfachungen realitätsnah wiedergegeben werden kann. Hierbei ist beispielsweise anzumerken, dass ein Modellkompartiment in der Realität aus mehreren auf unterschiedliche Weise verbundenen Grubenbauen besteht. Mit den für die Langzeitsicherheitsanalyse verwendeten und in [21] und [22] beschriebenen Modellen allein können aufgrund der Homogenisierung Kompartiment-interne Strömungs- und Gasausbreitungsvorgänge innerhalb eines Einlagerungsbereiches nicht dezidiert modelliert werden.
- 3 Beide Modelle setzen strukturimmanent voraus, dass keine über die modellmäßig berücksichtigten **Verbindungen zwischen den Kompartimenten** hinausgehenden Verbindungen bestehen. Eine Ausnahme in beiden Modellen ist die Betrachtung einer hydraulisch wirksamen Wegsamkeit zwischen Zentralteil und ELB Ostfeld. Generell wird jedoch beispielsweise vorausgesetzt, dass keine unentdeckten, hydraulischen Verbindungen zwischen zwei benachbarte Sohlen bestehen, die einen Strömungsbypass zwischen zwei Kompartimenten bedingen könnten. Angesichts der verhältnismäßig langen Zeit, in der in den Gruben Bartensleben und Marie Salzbergbau betrieben wurde, ist das Vorliegen derartiger Wegsamkeiten a priori nicht auszuschließen. Entsprechende Auswirkungen könnten mit den in [10] bzw. [21] und [22] beschriebenen Modellen jedenfalls nicht nachgebildet

werden.

- 4 Aufgrund der komplex vernetzten Geometrie der Grubenteile Bartensleben und Marie, der Lage der Zutrittsstellen, der unterschiedlichen Verfüllkategorien sowie der Tatsache der zu erwartenden signifikanten Gasbildung bei Kontakt der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle mit Lösungen liegt im wissenschaftlich-technischen Sinne ein **2-Phasenflussproblem** vor. Dies bezieht sich vor allem auf die Verdrängung der Gasphase während der konvergenzbedingten Auspressung von zugetretenen Lösungen in einem komplexen dreidimensionalen Grubengebäude in einem weitgehend dichten Wirtsgestein. Hierbei ist u. a. zu erwarten, dass Gasvolumina lokal in nur teilgefüllten Grubenräumen eingeschlossen werden und die Austrittspfade kontaminierter Lösungen beeinflussen können. Die numerische Behandlung der 2-Phasenströmung in geometrisch komplexen 2D-Modellen kann heutzutage als Stand der Technik angesehen werden. In den für die Langzeitsicherheitsanalyse zum ERAM eingesetzten Programmen wird nach den Ausführungen in [10, 21, 22] jedoch kein expliziter 2-Phasenströmungsansatz verfolgt. Der Phänomenologie des 2-Phasenflusses wird lediglich über entsprechende Modellrandbedingungen Rechnung getragen¹. Es ist fraglich, ob diese Vorgehensweise angesichts der Komplexität der oben angeführten Situation im verfüllten und verschlossenen Endlager im Hinblick auf die Aussagesicherheit des Langzeitsicherheitsnachweises alleine für sich ausreicht.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass in den zu bewertenden Unterlagen [10, 21, 22] keine Analysen benannt werden, aus deren Ergebnissen nachvollziehbar hervorgeht, dass die notwendige Voraussetzung zur sicherheitsgerichteten Vereinfachung der Endlagermodellgeometrie, die in einem ausreichenden Systemverständnis zum Netzwerkverhalten des Endlagersystems und einer komplexen Interaktion sicherheitsrelevanter Prozesse besteht, nachweislich gegeben ist. Dies betrifft insbesondere die durch die Modellvereinfachungen implizierte räumlich homogene Durchmischung in den Mischungsbereichen, die Homogenisierung Kompartiment-interner Strömungs- und Gasausbreitungsvorgänge innerhalb der Einlagerungsbereiche, den durch die Modellgeometrien implizierten Ausschluss von zusätzlicher Verbindungen zwischen Endlagerkompartimenten sowie die fehlende Verwendung eines 2-Phasenflussansatzes.

Die oben genannten Kritikpunkte werden nicht primär als Defizit der Langzeitsicherheitsanalysen [21, 22] selbst verstanden. Insbesondere im Hinblick auf die im Rahmen probabilistischer Unsicherheitsanalysen erforderliche Vielzahl an Rechenläufen wird die Verwendung vereinfachter Modellansätze als durchaus zielführend und notwendig angesehen.

Jedoch erfordert ein umfassender auf dem Stand von Wissenschaft und Technik geführter Langzeitsicherheitsnachweis eine begleitende Systemanalyse, aus der nachvollziehbar und belastbar

¹ In [23] werden Ergebnisse zu 2-Phasenflussrechnungen mit einem ebenfalls geometrisch stark vereinfachten und abstrahierten Modell dargestellt. Da das Modell neben einem Schacht und zwei Zugangsstrecken nur einen homogenisierten Einlagerungsbereich umfasst, bleibt auch hier unklar, ob die Heterogenität der Kompartiment-intern ablaufenden physikalischen Prozesse in realitätsnahem Maße wiedergegeben werden kann (s. Ausführungen unter 2. und 3). [23] ist keine Verfahrensunterlage.

hervorgeht, dass ein umfassendes Prozessverständnis zum betrachteten Endlagersystem vorliegt, aus der sich nachweislich die Legimitation der gewählten Modellvereinfachungen ableiten lässt.

Die ESK empfiehlt dem BMU daher, vom Antragsteller zu fordern, begleitend zu den in [21, 22] dokumentierten Langzeitsicherheitsanalysen, Rechnungen in Prozessmodellen durchzuführen, die zumindest ausschnittsweise die komplexe Grubengeometrie des ERAM realitätsnah abbilden und bei denen unter Verwendung eines 2-Phasenflussansatzes die gleichzeitige Interaktion aller sicherheitsrelevanter Endlagerprozesse untersucht werden kann. Sollten die Ergebnisse dieser Modellrechnungen die Zulässigkeit der in den Langzeitsicherheitsanalysen verwendeten Modellannahmen bestätigen, so spricht aus Sicht der ESK nichts gegen die Verwendung vereinfachter Rechenmodelle in [21, 22]. Allerdings sollten die Ergebnisse dieser Modellrechnungen in den Unterlagen dokumentiert werden. Weiterhin ist durch den Antragsteller nachzuweisen, dass im Grubengebäude des ERAM keine weitere hydraulischen Verbindungen zwischen Kompartimenten bestehen, die in den Modellen der Langzeitsicherheitsanalysen [21, 22] nicht berücksichtigt wurden (Empfehlung 4).

5.2.3 Korrosion der Abdichtungen

Sachverhalt

Die Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösungen wird in EMOS und PROSA mit dem gleichen einfachen Modellansatz simuliert [21, 22]. Aus dem Vorgang der Korrosion resultiert eine Reaktionsfront, die lateral fortschreitend einen zunehmenden Teil der Abdichtung erfasst. An der Korrosionsfront geht der unkorrodierte Salzbeton nach mehrmaligem (zahlenmäßig vorgegebenem) Austausch der Porenlösung durch nachströmende Mg-haltige Lösung in korrodierten Salzbeton mit höherer Permeabilität über. Dadurch verschiebt sich die Korrosionsfront und der hydraulische Widerstand der Abdichtung sinkt. Hierdurch setzt sich eine Abdichtung modellmäßig aus einem anwachsenden korrodierten und einem sich verringernden unkorrodierten Abschnitt zusammen. Das Längenverhältnis der beiden Abschnitte bestimmt zu einem bestimmten Zeitpunkt den jeweiligen hydraulischen Widerstand der Abdichtung.

Der Nachschub von Mg-haltiger Lösung zur Reaktionsfront erfolgt dabei abhängig vom aktuellen Widerstand der Abdichtung und vom Druckgefälle entlang der Abdichtung. Für den Referenzfall wird – ausgehend von den Ergebnissen entsprechender Laborversuche und geochemischer Modellrechnungen – abgeleitet, dass eine Salzbetonabdichtung nach etwa 20-fachem Austausch ihres Porenvolumeninhalts vollständig korrodiert ist (bei einem Mg-Gehalt in der Lösung von 10 % des Mg-Gehaltes einer IP21-Lösung). In den probabilistischen Rechnungen und what-if-Betrachtungen wurden darüber hinaus auch die Auswirkungen korrosionsaggressiverer Lösungszusammensetzungen und entsprechend höherer Korrosionsraten untersucht. Da die parallel angeordneten Abdichtungen zwischen dem ELB West-Südfeld in den Modellen zu einer Referenzabdichtung homogenisiert werden, erfolgen die Modellrechnungen für die dort vorhandene kürzeste Abdichtung (Länge: 26 m). Sinnentsprechend wird bei der Modellierung der Korrosion der Magnesiabetonabdichtung zum Ostfeld durch NaCl-haltige bzw. Mg-arme Lösung

vorgegangen. Hier erfolgen die Korrosionsbetrachtungen für die beiden parallel geschalteten Abdichtungssysteme des Ostfeldes getrennt für die Salzbeton- und die Magnesiabetonabdichtung.

Bewertung

Prinzipiell wird die oben angeführte Vorgehensweise sicherheitsanalytisch im Hinblick auf die Abbildung des Korrosionsvorganges als zielführend eingeschätzt. Das Heranziehen der kürzesten Abdichtung im West-Südfeld als Referenz für die dynamische korrosionsbedingte Änderung des hydraulischen Widerstandes zur Restgrube erscheint im Hinblick auf den Zeitpunkt und die Geschwindigkeit des Lösungszutritts in den dortigen ELB konservativ. Dennoch wäre auch hier eine Absicherung der gewählten Vereinfachungen (bestehend in einer Homogenisierung mehrerer parallel geschalteter Abdichtungen zu einer Referenzabdichtung) nach Auffassung der ESK wünschenswert gewesen. Es ist a priori nicht offensichtlich, dass die Modellrechnungen alle ungünstigen Konfigurationen unterschiedlicher Korrosionsgeschwindigkeiten im Wechselspiel mit der lokalen Ausbreitung von Gasen und mit unterschiedlichen Konvergenzraten im Grubengebäude abdeckend behandeln. Weiterhin stellt sich im Hinblick auf die Festlegung der Konvergenzraten die Frage, ob Abdichtungen, die vollständig korrodiert sind, noch zur Gruppe des „nicht oder nur gering kompaktierbaren Versatzes“ gezählt werden können.

5.3 Szenarientwicklung

Aufgabenstellung

Szenarien, in denen die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems im Nachweiszeitraum beschrieben werden, sind eine wesentliche Voraussetzung für den Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern [2], diese müssen umfassend identifiziert und analysiert werden. Für die Langzeitsicherheitsanalysen zum ERAM [10], [21] und [22] wird gemäß der auf der 23. Sitzung des ESK-Ausschusses EL am 19.01.2012 getroffenen Festlegungen folgenden Fragen nachgegangen:

- Ist die Szenarientwicklung systematisch und vollständig?
- Sind die Rechenfälle für die aufgezeigten Szenarien abdeckend?

Für die folgenden Ausführungen zur Szenarientwicklung war es notwendig, weitere Dokumente heranzuziehen, die ausführlicher auf den methodischen Ansatz eingehen und insbesondere die Szenarienauswahl in den Langzeitsicherheitsanalysen zum ERAM erläutern [11, 24, 25].

Sachverhalt

Die Szenarientwicklung zum ERAM erfolgte in mehreren konsekutiven Schritten. Ausgangspunkt stellen Szenarien für das unverfüllte Endlager dar, die mögliche Entwicklungen der geologischen Barriere aufgrund

geodynamischer Prozesse (z. B. Epirogenese, Tektonik, Erdbeben, Vulkanismus) unter Beachtung klimatischer Einflussfaktoren (Permafrost, Vereisung) identifizieren [11]. Diese Szenarien dienen zum einen der Optimierung des Verfüllungskonzepts. Zum anderen übernehmen die nachfolgenden Szenarienanalysen (nach der Verfüllung [26], Langzeitsicherheitsanalysen zum ERAM [10, 21, 22]) die in [11] vorgenommene Auswahl an repräsentativen FEP, FEP-Gruppen und die Aussonderung der als nicht relevant eingestuften FEP, FEP-Gruppen.

In [11] wird der gewählte methodische Ansatz für die Szenarienanalyse der geologischen Barrieren des ERAM erläutert. Basierend auf der umfassenden geowissenschaftlichen Bearbeitung des Standorts, einschließlich seiner geologischen Umgebung sowie Klimaszenarien werden entsprechend der international üblichen wissenschaftlichen Vorgehensweise sicherheitsrelevante Zustände, Ereignisse und Prozesse (FEP: features, events, processes) standortspezifisch identifiziert, dargestellt und bewertet. Die Zusammenstellung, Beschreibung und Bewertung der FEP ist zielorientiert auf die Besonderheit des ERAM als ehemaliges Salzbergwerk zugeschnitten. Die FEP werden im Hinblick auf ihre Konsequenzen in drei Gruppen gegliedert mit einem klar begründeten Fokus auf Zufluss-Szenarien:

- FEP-Gruppe 1: Mächtigkeitsreduzierung der geologischen Barrieren,
- FEP-Gruppe 2: Zufluss von Wässern in das Endlager und
- FEP-Gruppe 3: Vorgänge im lösungsgefüllten Endlager und Austritt kontaminierter Lösungen.

Es wurde eine zustandsbezogene, zeitlich differenzierte Betrachtung der über einen Zeitraum von 150.000 Jahren auftretenden FEP vorgenommen. Die Mächtigkeitsreduzierung der geologischen Barriere im ERAM infolge geologischer Prozesse und Ereignisse (FEP-Gruppe 1) führt in keinem der acht spezifischen Szenarien zu einer Freisetzung von Radioaktivität im o. g. Zeitraum. Von den 26 hydrogeologisch abgeleiteten Zufluss-Szenarien (FEP-Gruppe 2) von Herkunftsorten und Migrationspfaden werden neun verbal-argumentativ aufgrund der geologischen Gegebenheiten als nicht relevant bewertet. Für die übrigen erfolgen eine Wichtung anhand des zur Verfügung stehenden Wasservolumens und der Leistungsfähigkeit der Fließwege und eine Lokalisierung potenziell zuflussgefährdeter Grubenhohlräume in den Grubenfeldern Bartensleben und Marie.

Aufbauend auf [11] zeigen die Szenarien nach Verfüllung [25], dass das verfüllte Grubenfeld Bartensleben potenziell durch Deckgebirgswässer aufgrund von Wegsamkeiten im Hauptanhydrit gefährdet ist. Anhand einer zeitbezogenen Differenzierung der Szenariengruppen auf der Basis ausgewählter Merkmale (z. B. Zuflusszeitpunkt, Durchlässigkeit des Hutgesteins, Zustand der Auflockerungszone, Triebkräfte für die Auspressung, Transportwege im Grundwasserstrom, etc.) wurden Entwicklungszustände des Systems Endlager-Geosphäre beschrieben und hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit qualitativ bewertet. Aufbauend auf dieser Bewertung werden das Szenario eines frühzeitigen Zuflusses mit einer geringen Eintrittserwartung sowie das Szenario eines späten Zuflusses, dessen größte Eintrittserwartung ab 30.000 bis ca. 60.000 - 70.000 Jahren liegt, für eine weitergehende Konsequenzanalyse empfohlen.

Die Szenarienanalysen in [10], [21] und [22] differenzieren entsprechend drei Szenariengruppen für zwei prinzipiell unterschiedliche Systementwicklungen. Bei der Systementwicklung „trockene Grube“ tritt in der

Nachverschlussphase „höchstens eine vernachlässigbar geringe Lösungsmenge“ auf. Im Gegensatz dazu treten bei der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ „erhebliche Mengen an Lösungen aus dem Hutgestein“ auf. Szenariengruppen sind die natürliche Entwicklung mit Radionuklidtransport in Lösung und in der Gasphase sowie das unbeabsichtigte Eindringen von Menschen und der damit verbundene Radionuklidtransport in Lösung und Gasphase.

Bewertung

Die für die Betrachtung potenzieller zukünftiger Entwicklungen des Gesamtsystems durchgeführte Entwicklung und Analyse von Szenarien basiert auf dem FEP-Ansatz. Bei der geologischen Szenarientwicklung für das unversetzte (nicht verfüllte) Endlager [11] ist der FEP-Ansatz systematisch, stringent und transparent und daher sehr gut nachvollziehbar dargestellt. Die FEP werden zusammengebaut, gruppiert, verbal-argumentativ bewertet und gewichtet. Dadurch werden einzelne FEP mit plausiblen Begründungen, die aufgrund einer Kategorisierung der geowissenschaftlichen Beweisführung sehr transparent sind, ausgesondert. In der Szenarienanalyse für das versetzte Endlager [25] erscheinen die zugrunde liegenden Merkmale, Ereignisse und Prozesse mit wenigen Ausnahmen (zeitdifferenzierte Szenarientwicklung anhand ausgewählter Merkmale) dagegen nicht explizit. Vergleichbares gilt für die Langzeitstudien zum ERAM [21] und [22]. Nur in deren Zusammenfassung [10] werden die sicherheitsrelevanten FEP in Bezug auf den Langzeitsicherheitsnachweis qualitativ bewertet. Eine weitere wahrscheinlichkeitsorientierte Einschätzung der FEP findet in den Dokumenten mit wenigen verbal-argumentativ geführten Ausnahmen nicht statt.

Für eine Überprüfung der Vollständigkeit der sicherheitsrelevanten Szenarien, aber auch in Bezug auf die Verdeutlichung des zugrunde liegenden FEP-Ansatzes wäre die Zusammenstellung aller an dem Endlagerstandort vorkommenden FEP notwendig. Vermutlich könnte damit auch die ausschließliche Fokussierung auf Zufluss-Szenarien und Nichtberücksichtigung von weiteren Alternativszenarien neben dem menschlichen Eindringen besser belegt werden. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller, zu fordern, dass eine vollständige FEP-Liste vorgelegt wird, in welcher für die relevanten Szenarien (und ggf. FEPs) entsprechende Wahrscheinlichkeitsklassifizierungen ausgewiesen werden und dargelegt wird, dass die Rechenfälle für die aufgezeigten Szenarien abdeckend sind (Empfehlung 5).

5.4 Unsicherheiten/Ungewissheiten

5.4.1 Aufgabenstellung

Für die gesamte Sicherheitsanalyse (von den Standorterkennnissen bis zu den analytischen Ergebnissen) ist zu prüfen, ob die Unsicherheiten im Langzeitsicherheitsnachweis angemessen berücksichtigt und im Ergebnis entsprechend gewürdigt werden (vgl. Kapitel 2). Die folgenden Ausführungen stützen sich mehrheitlich auf die Sichtung der zu bewertenden Unterlagen [10, 12, 21, 22]. Auf der Basis dieser Unterlagen ist der Umgang mit Unsicherheiten im Sicherheitsnachweis zum ERAM zu erfassen und zu bewerten. Dabei werden in dieser Stellungnahme die Begriffe „Unsicherheit“ und „Ungewissheit“ synonym

verwendet. Im Einzelnen erfasste der Auftrag folgende Arbeitsschritte:

- Sichtung der in den zu bewertenden Unterlagen dargelegten Arbeiten und Ergebnisse der Sicherheitsanalyse ERAM hinsichtlich der Aufgabenstellung und
- Beurteilung des angemessenen Umgangs mit Ungewissheiten.

In IAEA, WS-R-4 [26], ist die Behandlung von Ungewissheiten ein Regelungsschwerpunkt. Zentrale Anforderung in WS-R-4 ist es, die Ungewissheiten zu identifizieren, wo möglich zu reduzieren und ihren Einfluss auf die Sicherheitsaussage einzuschätzen. Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten fußt für jede Ungewissheit auf den folgenden Fragen [27]:

- Sind die Ungewissheiten umfassend identifiziert?
- Sind die erkannten Ungewissheiten richtig beurteilt?
- Kann die Ungewissheit quantifiziert werden, kann der Einfluss auf die Sicherheitsaussage, z. B. in der radiologischen Langzeitaussage quantifiziert werden?
- Wurden Ungewissheiten identifiziert, deren Ausmaß sich reduzieren lässt?
- Wurden Ungewissheiten identifiziert, die vermeidbar sind?

5.4.2 Umgang mit Ungewissheiten

In einem Sicherheitsnachweis hat der Antragsteller eine systematische Strategie im Umgang mit Ungewissheiten, d. h. zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten, sowie die Umsetzung dieser Strategie darzulegen. Des Weiteren ist der Einfluss der Ungewissheiten auf die Sicherheitsaussage zu ermitteln, so dass Aussagen über deren Robustheit gemacht werden können.

Die Prüfung, ob die Ungewissheiten in der Sicherheitsanalyse angemessen behandelt wurden, erfolgt bezüglich angewandeter Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten (vgl. Kap. 5.4.2.1) und bezüglich Umgang mit Ungewissheiten in den Sicherheitsanalysen

- aus der Standortcharakterisierung,
- bezüglich der zukünftigen Entwicklung,
- aus nicht prognostizierbaren zukünftigen Entwicklungen,
- bzgl. Modellen
 - a) Ungewissheiten bei der Modellierung der Standortgegebenheiten,
 - b) Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen,
- bzgl. Daten- und Parameter,

(vgl. Kap. 5.4.2.2). Im Folgenden werden für die jeweiligen Bereiche von Ungewissheiten die Sachstände dargelegt, wie sie in den zu bewertenden Unterlagen enthalten sind.

5.4.2.1 Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten

Sachverhalt

Im Plan zur Stilllegung des Endlagers Morsleben [12] wird zum Umgang mit Ungewissheiten ausgeführt, dass bei der Festlegung von Modellannahmen und Eingangsdaten unzureichende Kenntnisse entweder durch konservative Annahmen berücksichtigt werden oder in die Streubreiten von Parametern einfließen und somit entsprechend berücksichtigt werden. Modellunsicherheiten werden durch alternative Modellansätze oder durch Variation diskreter Parameter abgebildet. Die Streuung von Parametern aufgrund der inhärenten Streuung von Messwerten wird in den probabilistischen Modellrechnungen ebenfalls berücksichtigt.

In der Übersicht [10] wird das Nachweiskonzept ausführlich dargestellt. Es beschreibt, wie der Sicherheitsnachweis für das ERAM unter Berücksichtigung von Ungewissheiten geführt wird. Insbesondere wird ein Konzept zur Behandlung verbleibender Ungewissheiten entworfen. Hierzu wird ausgeführt, dass sowohl der Zustand des Systems „Endlager Morsleben“, d. h. des Grubengebäudes, der Salzstruktur, des Hutgesteins und des Deckgebirges, zu Beginn der Phase nach Verschluss des Endlagers wie auch dessen künftige Entwicklung mit Ungewissheiten verbunden sind, die mit den durchgeführten Feld- und Laboruntersuchungen nicht ausgeräumt werden konnten und im Allgemeinen grundsätzlich auch mit weiteren speziellen Untersuchungen nicht mit vertretbarem Aufwand ausgeräumt werden können.

Ungewissheiten in Bezug auf den Systemzustand, die künftige Systementwicklung und die quantitative Wirkung von Prozessen, welche nicht behoben werden konnten, werden durch Betrachtung von mehreren Szenarien und Varianten und die Ermittlung der entsprechenden potenziellen Auswirkungen des ERAM gewürdigt. Die entsprechenden Konsequenzanalysen können dabei Folgendes zeigen:

- (1) Die Ungewissheit hat keinen oder höchstens einen geringen Einfluss auf die potenziellen Auswirkungen des ERAM und ist deshalb ohne Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis.
- (2) Szenarien bzw. Varianten, welche sich in Bezug auf einen ungewissen Sachverhalt, die ungewisse Wirksamkeit eines Prozesses oder eines Ereignisses bzw. eines ungewissen Parameterwertes unterscheiden, ergeben in systematischer Weise unterschiedliche potenzielle Auswirkungen des ERAM. Systematisch heißt hier, dass z. B. die starke Wirkung eines Prozesses bei jedem Szenario und bei jeder Variante zu einer Erhöhung der berechneten Strahlenexposition führt. Diese Ungewissheit wird – im Rahmen der praktischen Vernunft – durch eine ungünstige Annahme zum Sachverhalt, zur Wirksamkeit des Prozesses, zum Eintreten des Ereignisses bzw. zum Parameterwert im Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt.

Je nach der Plausibilität der ungünstigen Annahme und ihrer Auswirkung auf die berechneten Auswirkungen des ERAM wird die ungünstige Annahme für alle im Langzeitsicherheitsnachweis betrachteten Szenarien bzw. Varianten getroffen oder nur für einen Teil davon.

- (3) Szenarien bzw. Varianten, welche sich in gleicher Weise wie unter (2) in Bezug auf eine Ungewissheit unterscheiden, ergeben zwar unterschiedliche potenzielle Auswirkungen des ERAM, jedoch nicht in

systematischer Weise. Dieser Fall liegt z. B. vor, wenn die starke Wirksamkeit eines Prozesses in einer Variante zu einer Erhöhung der berechneten Strahlenexposition, in einer anderen Variante zu einer Erniedrigung der Strahlenexposition führt. In diesem Fall wird die Ungewissheit im Langzeitsicherheitsnachweis für jedes Szenario bzw. Variante durch weitere Fallunterscheidungen, d. h. die Betrachtung von entsprechenden zusätzlichen Szenarien bzw. Varianten, berücksichtigt. Im betrachteten Beispiel wird jede Variante durch eine weitere Variante ergänzt, wobei der Prozess mit ungewisser Wirksamkeit in der einen Variante als stark, in der anderen als schwach wirkend angenommen wird.

Die sicherheitsanalytische Umsetzung dieses Konzepts der Behandlung von Ungewissheiten wird in den Unterlagen PROSA [21] und EMOS [22] dargelegt.

Bewertung

Im Sicherheitsnachweis und in den Sicherheitsanalysen werden Ungewissheiten in den verschiedensten Bereichen angesprochen und der Umgang mit ihnen beschrieben. Dabei bleiben diese Betrachtungen auf die jeweiligen Teilgebiete beschränkt. Eine – wie in den Sicherheitsanforderungen des BMU gefordert – in sich geschlossene Dokumentation einer systematischen Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten, d. h. Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten über die Möglichkeiten der Konsequenzenanalyse hinaus, ist vom Antragsteller durchzuführen. Insbesondere muss die Strategie erkennen lassen, wie groß die nicht behebbaren Ungewissheiten für den Standort sind. Darüber hinaus muss ausgeführt werden, ob der Kenntnisstand zum Standort ERAM derart ist, dass die Langzeitsicherheitsanalysen belastbar als zentraler Bestandteil des Lanzeitsicherheitsnachweises herangezogen werden dürfen.

In den zu bewertenden Unterlagen stellt der Antragsteller die Sicherheitsanalysen ins Zentrum des Sicherheitsnachweises. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ungewissheiten in den Sicherheitsanalysen bewertet. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine in sich geschlossene Dokumentation der dem Sicherheitsnachweis zugrunde liegenden systematischen Strategie im Umgang mit Ungewissheiten durch den Antragsteller vorlegt (siehe Empfehlung 6).

5.4.2.2 Umgang mit Ungewissheiten in den Sicherheitsanalysen

Die zu bewertenden Unterlagen [10, 12, 21, 22] zeigen den Umgang mit Ungewissheiten in den Sicherheitsanalysen auf. Es werden insbesondere die Ungewissheiten bzgl. potenzieller zukünftiger Entwicklungen des Endlagersystems, Modellunsicherheiten sowie Daten- und Parameterungewissheiten thematisiert und der Umgang mit ihnen in der Sicherheitsanalyse beschrieben.

- **Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung**

Sachverhalt

In [12] werden die geowissenschaftlichen Untersuchungen im Hinblick auf hydrogeologische Strukturen und deren hydraulische Eigenschaften beschrieben. Es wird eine geologische und hydrogeologische Modellvorstellung des Standortes aufgrund der interpretierten Lagerungsverhältnisse der hydrogeologischen Einheiten entwickelt mit dem Ziel, hydrogeologische Modellrechnungen in einem für den Standort relevanten Modellgebiet durchzuführen. Diese Modellvorstellung ist die Grundlage für die Sicherheitsanalysen, gemäß [21] und [22]. Für die hydrogeologischen Einheiten des Modells werden ihre jeweiligen Durchlässigkeiten in Bandbreiten aufgeführt.

Bewertung

Den zu bewertenden Unterlagen ist ein expliziter sicherheitsanalytischer Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung nicht zu entnehmen. Eine Auseinandersetzung mit den Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung, die beispielsweise in eine alternative Modellvorstellung münden könnte, erfolgt in den zu bewertenden Unterlagen nicht.

Im Hinblick auf die in den Sicherheitsanalysen durchzuführenden Grundwasser- und Transportanalysen muss aus den strukturellen Gegebenheiten und Befunden ein hydrogeologisches Modell ausreichender Modellgröße abgeleitet bzw. aus Modellvariationen, die den Ungewissheiten Rechnung tragen, begründet werden. Eine solche Vorgehensweise ist nicht dokumentiert. Ebenso fehlt in den zu bewertenden Unterlagen eine Auseinandersetzung mit den Ungewissheiten, resultierend aus den das Modellgebiet charakterisierenden geologischen, tektonischen und hydrogeologischen Befunden, der Erkundungstiefe sowie der Interpretation über den strukturellen Aufbau und die Eigenschaften.

Den zu bewertenden Unterlagen ist ein systematischer Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung, z. B. zur Entwicklung konzeptueller Modelle des Gesamtsystems als Grundlage für die Sicherheitsanalysen, nicht zu entnehmen. Die ESK empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine Dokumentation zum Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung vorlegt (siehe Empfehlung 6).

- **Umgang mit Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung**

Sachverhalt

Ungewissheiten bzgl. der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems werden mittels Szenarien abgehandelt. In [12] werden für die Szenarienanalyse drei Gruppen von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (FEP) unterschieden:

- Mächtigkeitsreduzierung der geologischen Barrieren des Endlagers,
- Zutritt von Wässern in die Grubengebäude und
- Vorgänge im lösungsgefüllten Endlager und Austritt kontaminierter Lösungen.

In [12] werden potenzielle zukünftige Entwicklungen des Gesamtsystems Endlager im Hinblick auf ihre Auslöser zu Szenarien gruppiert und die Entwicklungen beschrieben. Diese sind „Bergbau-Szenarien“ (Auswirkungen des ehemaligen Bergbaus auf das Wirtsgestein), geologische Szenarien und Klima-Szenarien. In den Planfeststellungsunterlagen [11, 24, 28] werden in einer geologischen Szenarientwicklung auf der Grundlage der geologisch-hydrogeologischen Standortinterpretation sowohl für das unversetzte (d. h. ohne Verfüllmaßnahmen) als auch das versetzte Endlager Szenarien für potenzielle Lösungszutritte in das Endlagerbergwerk abgeleitet.

Die Szenarienanalyse in den Unterlagen [21, 22] geht sowohl von einer ungestörten Entwicklung des Endlagersystems (sehr geringe Mengen an Lösungen im Endlager) als auch einer gestörten Entwicklung mit Flüssigkeitszutritt aus. Verbunden hiermit sind:

- Freisetzung von Radionukliden über den Wasserpfad nach einem Flüssigkeitszutritt und
- Freisetzung gasförmiger Radionuklide nach einem Flüssigkeitszutritt.

Die in den Unterlagen [21, 22] dargelegte Szenarienanalyse basiert auf der geologischen Szenarientwicklung und leitet Szenarien für das Gesamtsystem ab.

Bewertung

Den Ungewissheiten über potenzielle zukünftige Entwicklungen des Gesamtsystems wird durch die Entwicklung von Szenarien und deren Analyse Rechnung getragen. Die geologische Szenarientwicklung (für das unversetzte Endlager), die sich mit Möglichkeiten von Lösungszuflüssen in das Endlagerbergwerk befasst, erfolgt in systematischer Art und Weise. Inwieweit die daneben für die Prozesse im Endlager angewendete Szenarientwicklung der im Wesentlichen verbal-argumentativen Beschreibung gewährleistet, umfassend in dem Sinn zu sein, dass alle für die Sicherheitsanalyse relevanten potenziellen zukünftigen Entwicklungen identifiziert wurden, ist mit dieser Vorgehensweise letztlich nicht belegbar. Die verbal-argumentativen Beschreibungen sind plausibel. Sie stellen jedoch keine systematische und nachvollziehbar abgeleitete Begründung dafür dar, dass die identifizierten Szenarien die potenziellen zukünftigen Entwicklungen des Gesamtsystems im Hinblick auf die Sicherheitsbewertung abdecken. Alternativszenarien, die aus der systematischen Analyse der Integrität resultieren können, wurden nicht ausgewiesen. Stattdessen wurde ein Lösungszutritt unterstellt.

Moderne Methoden zur Szenarientwicklung basierend auf FEP-Analyse oder Sicherheitsfunktionen gewährleisten eine systematische und umfassende Szenarientwicklung. Den modernen Methoden ist gemein, dass sie zur Ableitung von potenziellen zukünftigen Systementwicklungen die das Endlagersystem charakterisierenden FEP mit ihren gegenseitigen Abhängigkeiten und Ausprägungen nutzen. Die Methoden

ermöglichen den Nachweis der Erfüllung der Anforderung, systematisch und umfassend zu sein. Weiterhin ermöglichen sie die nachvollziehbare Ausweisung repräsentativer Szenarien. Ein solcher Ansatz wurde im Sicherheitsnachweis für das ERAM zur Identifikation von geologischen Szenarien lediglich für das unversetzte Endlagerbergwerk genutzt [24]. Bei der sich anschließenden Szenarienentwicklung für das versetzte Endlagerbergwerk hingegen wird diese Vorgehensweise verlassen und der Weg der verbal-argumentativ (expert judgement) beschreibenden Entwicklungsmöglichkeiten des Gesamtsystems eingeschlagen. Die konsequente Fortführung des FEP-Ansatzes wäre wünschenswert.

Hinweis: Mit welcher Methode der Nachweis der umfassenden Identifizierung möglicher zukünftiger Entwicklungen von Endlagersystemen sowie die im Hinblick auf die Sicherheitsanalysen geforderte umfassende Feststellung repräsentativer Szenarien nachvollziehbar und belastbar gelingt, ist Gegenstand der Forschung.

- **Umgang mit Ungewissheiten aus nicht prognostizierbaren zukünftigen Entwicklungen**

Sachverhalt

Infolge geologischer und klimatischer Ereignisse wie etwa Permafrost, Eisüberföhrung mit Tiefenwirkung können die Standortverhältnisse derart verändert werden, dass eine Prognose über die dann vorherrschenden Standortbedingungen nicht möglich ist. Sind solche Ereignisse während des Nachweiszeitraums nicht auszuschließen, muss der sich hieraus ergebenden Ungewissheit z. B. im Hinblick auf die Standorteigenschaften Rechnung getragen werden. Dies gilt insbesondere für die Sicherheitsanalysen und deren Modellgrundlagen. In der Unterlage [10] werden in der geologischen Langzeitprognose die potenziellen zukünftigen Entwicklungen und Einflüsse aufgrund von Klimaveränderungen dargelegt. Hierbei werden die Einwirkungen auf das Endlagersystem eingeschätzt und im Hinblick auf die sicherheitsanalytische Bedeutung bewertet. Eine Auseinandersetzung mit wahrscheinlichkeitsorientierter Einschätzung der FEP, d. h. mit Eintreten und Ausprägung von Ereignissen, erfolgt verbal-argumentativ.

Als zweite Gruppe nicht prognostizierbarer zukünftiger Entwicklungen werden die Folgen des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager behandelt.

Bewertung

Ereignisse, die zu nicht prognostizierbaren zukünftiger Entwicklungen führen könnten, wurden insbesondere in der Auseinandersetzung mit klimatischen Entwicklungen in den zu bewertenden Unterlagen [10, 12, 21, 22] behandelt. Eine Auseinandersetzung mit wahrscheinlichkeitsorientierter Einschätzung der FEP, d. h. mit ihrem Eintreten und ihrer Ausprägung, ihren Beeinflussungen durch und Abhängigkeiten von anderen FEP derart, dass sich eine Einschätzung für die Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen des Szenariums systematisch ableiten lässt, ist in den zu bewertenden Unterlagen nicht ausgeführt. Beispielsweise wäre eine systematische wahrscheinlichkeitsorientierte Einordnung des Ereignisses Eisüberföhrung sowie seiner

Ausprägung eines möglichen Eingriffs in das Deckgebirge wünschenswert.

Der Umgang mit Ungewissheiten der nicht prognostizierbaren zukünftigen Entwicklungen erfolgte wie oben verbal-argumentativ. Eine systematische Auseinandersetzung mit den potenziellen zukünftigen Entwicklungen im Hinblick auf eine Zuordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen wäre hilfreich. Eine inhaltliche Bewertung der Vorgehensweise des Antragstellers bleibt der Genehmigungsbehörde vorbehalten.

In den Sicherheitsanalysen werden die Ungewissheiten bzgl. der Möglichkeiten menschlichen Eindringens in das Endlager mittels dreier Referenzszenarien (Bohrung, Bergwerk, Kaverne) behandelt. Insofern ist den Sicherheitsanforderungen des BMU [3] nach Behandlung menschlicher Eingriffe in ausreichender Weise Rechnung getragen.

- **Umgang mit Ungewissheiten bei der Modellierung der Standortgegebenheiten**

Sachverhalt

Das Gesamtsystem Endlager wird im Hinblick auf potenzielle Transporte und Rückhaltung von Radionukliden durch ein vereinfachtes Strukturmodell abgebildet, d. h. eine vereinfachte Abbildung von Hutgestein, Salzstock, Deckgebirge und Endlagerbergwerk. Die Entwicklung des vereinfachten Strukturmodells basiert auf einer konzeptuellen Abbildung des Grubengebäudes mit seinen Hohlräumen und Auflockerungszonen sowie des Hutgesteins, des Deck- und Nebengebirges insoweit ihnen Einschlusseigenschaften und/oder Transporteigenschaften für Fluide und Radionuklide beigemessen werden.

Die Modellierung des Nahbereichs, d. h. des Grubengebäudes mit seinen Grubenbauen, erfolgt wegen der hohen Ungewissheiten hinsichtlich der Geometrie und der transportrelevanten Gegebenheiten zwischen einzelnen Grubenbauen in einem geringen Detaillierungsgrad. Es werden benachbarte Grubenbaue zu einem repräsentativen Grubenbau mit Blick auf Durchmischung und Transport konservativ zusammengefasst. Ungewissheiten hinsichtlich ausgeprägter Wegsamkeiten im Hutgestein werden durch den wirksamen Querschnitt berücksichtigt. Ungewissheiten der Permeabilität der Wegsamkeit werden in den Analysen berücksichtigt. Die Modellierung des oberflächennahen Grundwasserleiters im Strukturmodell erfolgt ebenfalls stark vereinfacht in Form einer eindimensionalen Stromröhre.

Bewertung

In den zu bewertenden Unterlagen wird an mehreren Stellen auf die großen Ungewissheiten bei der Bildung des Strukturmodells hingewiesen, die sich zwangsläufig aus der Notwendigkeit starker Vereinfachungen bei der Abbildung des sehr komplexen Grubengebäudes zu einem Rechenmodell ergeben. Diese Vereinfachungen, z. B. das Zusammenlegen von einzelnen Grubenhohlräumen zu einem Modellhohlraum, werden häufig mit dem Anspruch der Konservativität begründet. Hierbei wird nicht deutlich, welche Konservativität angestrebt wird, und nicht belegt, welche der Eigenschaften konservativ behandelt wurden.

So muss das Zusammenlegen mehrerer Hohlräume zu einem großen Modellraum, in dem die zu beschreibenden Prozesse und Abläufe räumlich homogen behandelt werden, nicht zwangsläufig zu pessimistischeren Ergebnissen beispielsweise für den Radionuklidtransport führen. Die Konservativität, die durch die Maßnahmen erreicht werden soll, wird nicht belegt. Insofern bleibt offen, ob diese Vorgehensweise mit Blick auf den Sicherheitsnachweis zielführend ist.

In den zu bewertenden Unterlagen wird nicht gezeigt, dass die vorgenommenen Vereinfachungen im Hinblick auf das Nachweisziel – radiologische Langzeitaussage – zulässig sind. Auch die zwangsläufig mit den Vereinfachungen einhergehenden Ungewissheiten werden nicht systematisch identifiziert und behandelt. Die Konsequenzen aus den Modellvereinfachungen auf die Sicherheitsaussage werden in den zu bewertenden Unterlagen nicht ermittelt. Diese Auseinandersetzung muss jedoch geführt werden (vgl. Kapitel 5.3). Die ESK empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine Dokumentation zum Umgang mit Ungewissheiten aus der Modellvereinfachung vorlegt (siehe Empfehlung 6).

- **Umgang mit Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen**

Sachverhalt

Als Modellunsicherheiten werden solche Ungewissheiten bezeichnet, die sich auf Ungewissheiten von physikalischen und chemischen Effekten ergeben. Ungewissheiten bei den Modellansätzen zur Behandlung einzelner Effekte werden entweder durch die sie beschreibenden Parameter und ihre Verteilungsfunktionen oder durch die Bereitstellung alternativer Ansätze behandelt. Die analysierten Einzeleffekte, ihre modellmäßige Beschreibung sowie die Begründung ihrer Quantifizierung sind in den Berichten dargelegt. Dies sind die Modellansätze, die das mit den Rechencodes abgebildete Endlagermodell mit seinen Einzeleffekten im Hinblick auf den Einschluss der Radionuklide charakterisieren, wie etwa die Konvergenz, die Mobilisierung der Radionuklide, das Transportverhalten im Grubengebäude, der Transport aus dem Grubengebäude in die Biosphäre. Die der modellmäßigen Beschreibung der Einzeleffekte zugrunde liegende Ungewissheit und der Umgang mit ihr in den Sicherheitsanalysen sind in den zu bewertenden Unterlagen dargelegt. Modellunsicherheiten für Teilsysteme oder Einzeleffekte werden durch Variationsrechnungen der verwendeten Parameter berücksichtigt.

Bewertung

Die Modellansätze zur Beschreibung von Einzeleffekten, die das Transportverhalten des Gesamtsystems für Lösungen und Radionuklide wesentlich bestimmen, werden in den zu bewertenden Unterlagen umfassend beschrieben. Ihre Wirkung wird analysiert ebenso wie die Auswirkungen von Ungewissheiten, z. B. aus Unwissenheit oder auch Unkenntnis.

Diese Behandlung der Einzeleffekte orientiert sich stark an den Möglichkeiten, welche die verwendeten

Rechencodes PROSA [21] und EMOS [22] zu ihrer Behandlung bieten. Ein Beispiel ist die einphasige, eindimensionale Behandlung der Fluidtransporte durch das Endlagersystem. Effekte, die einer mehrphasigen, mehrdimensionalen Behandlung bedürfen, z. B. Gas-Lösungsphasen in Strecken oder konvektiver Transport in großräumigen Hohlräumen, werden nicht im Hinblick auf diese Vereinfachung diskutiert. Ungewissheiten aufgrund der vereinfachenden Modellierungen (siehe auch den vorhergehenden Punkt) werden in den zu bewertenden Unterlagen nicht identifiziert und diskutiert. Es bleibt somit offen, wie stark das Analyseergebnis und die daraus resultierende Sicherheitsaussage von den Vereinfachungen beeinflusst sind. Insofern ist der Umgang mit Ungewissheiten nicht vollständig. Die ESK empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine Dokumentation zum Umgang mit Ungewissheiten aus den vereinfachten Behandlungen oder Vernachlässigungen von Prozessen vorlegt (siehe Empfehlung 6).

- **Umgang mit Ungewissheiten bzgl. der Daten und der Parameter**

Sachverhalt

Der Einfluss von Daten- und Parameterungewissheiten auf die Konsequenzen, d. h. die errechnete Strahlenexposition in der Biosphäre, wird in Parametervariationen und probabilistischen Modellrechnungen mit Monte-Carlo-Verfahren analysiert. Grundlage für die Rechnungen ist das Analysemodell, d. h. die modellhafte Abbildung des Endlagers, und die sie beschreibenden Modellansätze [21, 22]. Mittels Parametervariationen wird der Einfluss ausgewählter Parameter auf die Konsequenzen ermittelt. Für die probabilistischen Modellrechnungen werden die unabhängigen Eingangsparameter sowie die abhängigen Eingangsparameter identifiziert, die in die Rechenmodelle einfließen. Für die probabilistischen Monte-Carlo-Analysen wurden unabhängige und abhängige Zufallsgrößen ausgewählt, die Ungewissheiten ermittelt und durch geeignete Verteilungsfunktionen beschrieben. Als Ergebnis liefern diese Analysen den Einfluss der Ungewissheiten der Eingangsparameter und Daten auf die Strahlenexposition.

Bewertung

Die Behandlung der Daten- und Parameterunsicherheiten erfolgt methodisch nach den Stand von Wissenschaft und Technik. Dabei ist anzumerken, dass Basis der probabilistischen Behandlung das die Realität stark abstrahierende Rechenmodell ist, welches auf der Grundlage des Strukturmodells des Standorts mit den implementierten Modellansätzen zur Behandlung der Einzeleffekte entwickelt wurde. Die mittels probabilistischer Rechnungen ermittelten Ergebnisse, z. B. Verteilungen von Strahlenexpositionen, sind zu allererst als Ergebnisverteilung des zugrunde gelegten Rechenmodells zu interpretieren.

6 Zusammenfassende Bewertung und Empfehlungen

u. a. Beantwortung der Fragen im Beratungsauftrag

In der Stellungnahme werden unter Berücksichtigung der zu bewertenden Verfahrensunterlagen [10, 12,

21, 22] das methodische Vorgehen beim Langzeitsicherheitsnachweis und die Nachvollziehbarkeit der Nachweisführung bewertet. Dazu wird in Einzelfällen auch auf ergänzende Unterlagen zurückgegriffen. Die Bewertungen der ESK stützen sich an diversen Stellen nur auf eine sehr begrenzte Auswahl der tatsächlich vorhandenen untergeordneten Dokumente ab und die Aussagekraft der daraus resultierenden Analysen muss insofern als eingeschränkt angesehen werden. Die Stellungnahme der ESK ersetzt nicht die Prüfung der gesamten Antragsunterlagen durch die Genehmigungsbehörde. Eine abschließende Prüfung kann nur auf der Basis eines vollständigen Satzes der vom Antragsteller eingereichten Unterlagen durch die Genehmigungsbehörde erfolgen.

Der Leitgedanke des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) ist ein zentrales Element der Sicherheitsanforderungen des BMU [3]. Der materielle Geltungsbereich dieser Anforderungen bezieht sich ausschließlich auf neu zu errichtende Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle. Beim ERAM handelt es sich um eine Anlage mit gegebenen Randbedingungen ohne Wärme entwickelnde Abfälle. Insbesondere aufgrund des wesentlich geringeren Inventars in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{14}$ Bq können die dargelegten Anforderungen an den ewG und an den Nachweiszeitraum nicht unmittelbar auf das ERAM übertragen werden. Für einen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik geführten Langzeitsicherheitsnachweis ist von grundlegender Bedeutung, dass wesentliche Anteile der Radionuklide in tiefen geologischen Strukturen eingeschlossen werden. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er sich in einem Dokument inhaltlich mit dem Konzept des ewG und dem Nachweiszeitraum auseinandersetzt und darlegt, in welchem Umfang die Nachweisführung an den Grundgedanken des ewG angelehnt werden kann (Empfehlung 1).

Die ESK empfiehlt, in einer Auseinandersetzung mit dem ewG-Gedanken gemäß [3] das Sicherheitskonzept und den Langzeitsicherheitsnachweis schwerpunktmäßig auf das Einschluss- und Rückhaltevermögen des die Einlagerungsbereiche umgebenden Gesteins aufzubauen. Im Zuge dieser Auseinandersetzung sollten folgende Punkte beachtet werden:

- eine systematische Betrachtung der Frage, welche Anforderungen an den ewG gemäß [3] im ERAM erfüllt werden können und welche nicht,
- eine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung des radiologischen Inventars im ERAM und der sich daraus ergebenden Konsequenzen für einen angemessenen Nachweiszeitraum,
- eine Darstellung der Rückhaltung der Radionuklide im Einlagerungsbereich,
- eine Darstellung der Einschlussfähigkeit des Salzes (im Sinne eines ewG), aus der ersichtlich wird, in welchen Bereichen des ERAM eine ausreichende Einschlusswirkung zu erwarten ist,
- eine Darstellung, auf welchen Wegen die Radionuklide den Einschlussbereich auf lange Sicht verlassen können,

- eine Darstellung darüber, inwiefern aufgrund der oberen Betrachtungen die Langzeitsicherheit Kredit von einer Verdünnung bzw. Verbreitung im Deckgebirge nimmt.
- eine Darstellung auf der Basis der Szenarienentwicklung, inwiefern sich der Standort (unter Einschluss von Aussagen zur Gebirgsmechanik, die auf Spannungsmessungen und gebirgsmechanischen Modellrechnungen beruhen,) über lange Zeiträume entwickelt, wie sich der Zustand des umgebenden Salzes und des Deckgebirges zukünftig verändern und welchen Einfluss diese Veränderungen auf die Zuverlässigkeit des Langzeitsicherheitsnachweises haben wird,
- eine Beschreibung der vorhandenen Unsicherheiten für die Bewertung (Prognosefähigkeit der Modellannahmen, Zuverlässigkeit der Aussagen),
- eine Darstellung, inwiefern durch technische Stilllegungsmaßnahmen die einschließende Wirkung optimiert werden kann, sowie
- eine Begründung für die Gültigkeit des gewählten Nachweiskonzeptes.

Für den Fall

- der Möglichkeit der Definition eines ewG mit hinreichender Rückhaltewirkung innerhalb des Salzes und dem Nachweis seiner langfristigen Integrität und damit keiner oder nur einer beschränkten Kreditnahme von der Rückhaltewirkung oder der Verdünnung in Deck- und Nebengebirge, oder
- einer Kreditnahme von der Rückhaltewirkung oder der Verdünnung in Deck- und Nebengebirge bei einer über genügend lange Zeiträume hohen Prognostizierbarkeit zur Integrität der über dem Salz rückhaltenden Bereiche

wäre der Befund aus Sicht der ESK als abdeckend anzusehen. Für den Fall

- einer überwiegenden Kreditnahme von der Rückhaltewirkung des Deck- und Nebengebirges,
- einer überwiegenden Kreditnahme von der Verdünnung der radioaktiven Stoffe im Deck- und Nebengebirge und/oder
- einer geringen oder über lange Zeiträume fehlenden Prognostizierbarkeit zur Integrität der rückhaltenden Bereiche und daraus großen Unsicherheiten in den Rechenergebnissen

wäre der Befund aus Sicht der ESK als ungünstig anzusehen, wobei ein solcher Befund bei Auftreten einzelner Fälle oder Kombinationen immer ganzheitlich abzuwägen ist. Insbesondere ist zu prüfen, ob durch den Abbau von Konservativitäten auch ein Nachweis mit einer geringeren Kreditnahme von Deck- und Nebengebirgseffekten gelingen kann (Nachweiskonzept). Weiterhin sind Optimierungsmöglichkeiten in Bezug auf das Sicherheitskonzept (also das Verschlusskonzept) zu prüfen und abzuwägen, die zu einer

besseren Rückhaltung oder einer besseren Integritätsprognose für die rückhaltenden Bereiche beitragen können.

Da die in [3] angestrebte radiologische Optimierung für das ERAM als Anlage mit gegebenen Randbedingungen nur eingeschränkt möglich ist, ist eine Einhaltung der von der SSK [2] formulierten Werte und Betrachtungsstufen maßgebend. Die Empfehlungen der SSK wurden in den vorliegenden Dokumenten jedoch nicht umgesetzt. Aus Sicht der ESK entspricht dieses vom Antragsteller gewählte Vorgehen nicht dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die ESK schließt sich dem Bewertungsmaßstab und der Begründung der SSK an und empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu verlangen, dass für diejenigen Rechenfälle, die die Dosis-Schutzziele von 0,1 mSv pro Jahr für wahrscheinliche und 1,0 mSv pro Jahr für weniger wahrscheinliche Fälle im SSK-Sinne eines Referenzwertes überschreiten, die wissenschaftliche Plausibilität und das Ausmaß des Überschreitens aufgezeigt werden. Die ESK hält ein Einhalten des Kriteriums mit einer 95 %igen Sicherheit und ein statistisches Vertrauen in diese Aussage von 95 % als noch akzeptabel. Ebenso sollte das jeweilige Ausmaß des Überschreitens der Dosis-Schutzziele immer unterhalb einer Größenordnung bleiben (Empfehlung 2).

Die ESK sieht die zum Endlagersystem des ERAM vorliegenden Standortkenntnisse als grundsätzlich ausreichend an, um daraus ein geologisch-hydrogeologisches Standortmodell zu entwickeln. Offenkundige Widersprüche oder Unstimmigkeiten in der Standortcharakterisierung wurden nicht gefunden. Bezüglich sicherheitsrelevanter Eigenschaften eingeschränkte Aussagen betreffen aus Sicht der ESK solche Strukturbereiche, die durch spezielle hydrogeologische und hydraulische Gegebenheiten gekennzeichnet sind. Als Folge davon kann das Einschlussvermögen des Endlagersystems allein auf Grundlage der in den geprüften Übersichtsdarstellungen dargestellten materiellen Standortgegebenheiten nicht vollständig und zuverlässig beurteilt werden. Eine abschließende Prüfung kann nur auf der Basis eines vollständigen Satzes der vom Antragsteller eingereichten Unterlagen durch die Genehmigungsbehörde erfolgen. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass dieser seine Strategie zum Umgang mit etwa verbleibenden Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung darlegt und diese Ungewissheiten systematisch bewertet. Die für die Berechnung der Konsequenzen von Radionuklidfreisetzung und -transport zugrunde gelegten Sachverhalte und Parameterbandbreiten sind zu begründen. Der Realitätsbezug bzw. der abdeckende Charakter der Modellierungsansätze und der Ergebnisse der Modellrechnungen ist darzustellen bzw. zu belegen. Hinsichtlich des abdeckenden Charakters gilt dies auch für das der Beurteilung der Konsequenzen eines potenziellen Wasserzutritts über Schwachstellen in der Salzbarriere zugrunde liegende Szenarium. Beim Integritätsnachweis für die Salzbarriere oberhalb der ehemalige Abbaue sind sowohl das Dilatanz- als auch das Laugendruckkriterium anzuwenden (Empfehlung 3).

Die ESK begrüßt die mit den unterschiedlichen Programmen PROSA und EMOS erreichte Diversität in den Modellrechnungen. Die Langzeitsicherheitsanalysen werden auf der Grundlage geometrisch stark vereinfachter und abstrahierter Modelle durchgeführt. Inwiefern diese stark vereinfachten Modelle fähig sind, die Prozesse im komplexen Netzwerk von Grubenbauen im ERAM korrekt abzubilden, ist im Rahmen dieser Stellungnahme nicht prüfbar. In den für diese Stellungnahme zu bewertenden Unterlagen [10, 12, 21, 22] werden keine Nachweise benannt, nach denen die notwendige Voraussetzung zur sicherheitsgerichteten Vereinfachung der Endlagermodellgeometrie gegeben ist. Das dabei verwendete Argument der

Konservativität, die durch die Vereinfachungen erreicht werden soll, wird in den zu bewertenden Unterlagen nicht belastbar belegt. Im Hinblick auf die Vereinfachungen der Endlagermodellgeometrien und der Abbildung sicherheitsrelevanter Prozesse in den Modellrechnungen sollte die Interaktion der wesentlichen Einflussgrößen synchron durch begleitende Prozessmodellrechnungen, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, untersucht werden und auf dieser Basis die Zulässigkeit und Konservativität der verwendeten Modellansätze nachvollziehbar belegt werden. (Empfehlung 4).

Der vom Antragsteller für potenzielle zukünftige Entwicklungen des Gesamtsystems eingesetzte FEP-Ansatz ist für das unversetzte (nicht verfüllte) Endlager systematisch, transparent und gut nachvollziehbar. In der Szenarienanalyse für das versetzte Endlager und in den Langzeitstudien erscheinen die zugrunde liegenden FEP dagegen nicht vollständig dargestellt. Zur Überprüfung der Vollständigkeit der sicherheitsrelevanten Szenarien wäre die Zusammenstellung aller an dem Endlagerstandort vorkommenden FEP notwendig. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass eine vollständige FEP-Liste vorgelegt wird, in welcher für die relevanten Szenarien (und ggf. FEPs) entsprechende Wahrscheinlichkeitsklassifizierungen ausgewiesen werden und dargelegt wird, dass die Rechenfälle für die aufgezeigten Szenarien abdeckend sind (Empfehlung 5).

In Sicherheitsnachweis und Sicherheitsanalysen werden Ungewissheiten angesprochen und der Umgang mit ihnen beschrieben, wobei diese Betrachtungen auf die jeweiligen Teilgebiete beschränkt bleiben. Die Behandlung der Daten- und Parameterunsicherheiten erfolgt methodisch nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Eine wie in [3] geforderte, in sich geschlossene Dokumentation einer systematischen Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten ist wünschenswert. Bezüglich Ungewissheiten empfiehlt die ESK dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine Dokumentation vorlegt, die folgende Aspekte systematisch erfasst, bewertet und begründet (Empfehlung 6):

- die dem Sicherheitsnachweis zugrundeliegende Strategie im Umgang mit Ungewissheiten,
- der Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung (vgl. auch Empfehlung 3),
- der Umgang mit Ungewissheiten aus der Modellvereinfachung,
- der Umgang mit Ungewissheiten aus den vereinfachten Behandlungen oder Vernachlässigungen von Prozessen,
- die Beurteilung der Analyseergebnisse im Hinblick auf die angewendete Modellbildung und Modellierung.

Im Folgenden wird auf die vier Fragen im Beratungsauftrag [1] direkt eingegangen:

- Gibt es weitere Anforderungen, die im Langzeitsicherheitsnachweis neben den radiologischen Anforderungen in der genannten SSK-Empfehlung zu beachten sind, und wurden diese Anforderungen beachtet?

Die Unterlagen zum ERAM wurden über einen längeren Zeitraum hinweg erstellt, in dem sich die Anforderungen an ein Endlager gewandelt haben. Die Berücksichtigung aktueller nationaler [2-5] und internationaler Referenzen [6, 7, 26, 29, 30] und damit eine mindestens verbal-argumentative Betrachtung

nach Stand von Wissenschaft und Technik sieht die ESK als sinnvoll an. Sie empfiehlt, darauf abstützend eine aktuelle Betrachtung und Diskussion über das ERAM und dessen Sicherheitsnachweis zu führen. Eine solche Diskussion sollte den Gedanken des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, eine systematische Darstellung und Diskussion der FEPs sowie Unsicherheiten von Daten, Parametern und zukünftigen Entwicklungen einschließen. Dies wird in den Empfehlungen 1, 5 und 6 ausgedrückt.

Die ESK schließt sich den radiologischen Anforderungen aus der genannten SSK-Empfehlung grundsätzlich an. Zur Diskrepanz zwischen dem Vorgehen des Antragstellers und den SSK-Empfehlungen wurde Empfehlung 2 formuliert.

- Kann aufgrund des vom BfS geführten Langzeitsicherheitsnachweises – soweit weitergehende Anforderungen bestehen – die Erfüllung dieser Anforderungen hinreichend geprüft werden?

Die Prüfung der ESK im Rahmen dieser Stellungnahme beschränkt sich auf eine Auswahl von Unterlagen und kann eine Gutachtertätigkeit nicht ersetzen. Der Stand von Wissenschaft und Technik, den die ESK – unter Berücksichtigung des ERAM als Anlage mit gegebenen Randbedingungen – herangezogen hat (vgl. Kapitel 4.1, 4.2, 4.3, 5.2.2), legt nahe, dass das gesamte Endlagersystem einer systematischen Bewertung der Standortcharakterisierung, der Anwendung von Konservativitäten bei Modellvereinfachungen und dem Umgang mit Ungewissheiten unterzogen werden sollte. Zweifel seitens der ESK bestehen bei den sowohl bei der Standortcharakterisierung als auch bei der Sicherheitsanalyse eingesetzten Vereinfachungen und dem Nachweis, dass diese Vereinfachungen tatsächlich sicherheitsgerichtete Konservativitäten darstellen. Daraus resultieren die Empfehlungen 3, 4 und 6.

- Sind die Modelle für den Langzeitsicherheitsnachweis begründet und erscheinen sie im Hinblick auf das Ziel adäquat?

Die ESK begrüßt, dass die Modellierung diversitär durchgeführt worden ist. Die Langzeitsicherheitsanalysen werden jedoch auf der Grundlage geometrisch stark vereinfachter und abstrahierter Modelle durchgeführt. Das dabei die Komplexität der Geologie und des Grubengebäudes sowie die damit verbundenen Prozesse langfristiger Nuklidausbreitungen durch die eingesetzten Vereinfachungen konservativ im Sinne der resultierenden Dosiswerte sein sollen, wird aus Sicht der ESK nicht überzeugend belegt. Um ein entsprechendes Systemverständnis zu erreichen, wäre zur Überprüfung von wesentlichen Einflussgrößen die Verwendung von Vergleichsrechenmodellen sinnvoll, damit die verwendeten Vereinfachungen und deren Ungewissheiten nachvollziehbar als konservativ angesehen werden können. Dies wird durch Empfehlung 4 ausgedrückt.

- Werden die Unsicherheiten im Langzeitsicherheitsnachweis angemessen berücksichtigt und im Ergebnis entsprechend gewürdigt?

In Sicherheitsnachweis und Sicherheitsanalysen werden die Ungewissheiten angesprochen. Die Behandlung der Daten- und Parameterunsicherheiten erfolgt methodisch nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Eine in sich geschlossene Dokumentation einer systematischen Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten

fehlt gegenwärtig und wäre wünschenswert. Diese sollten auch alternative Modellvorstellungen zur Standortcharakterisierung, alternative Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung bzw. zu nicht prognostizierbaren zukünftigen Entwicklungen (Szenarienentwicklung auf der Basis einer FEP-Analyse) umfassen. Zu diesem Zweck wurden die Empfehlungen 5 und 6 formuliert.

Empfehlungen an das BMU

- 1 Der seit Einreichen der Unterlagen fortgeschrittene Stand von Wissenschaft und Technik sollte in der Argumentation des Antragstellers zumindest verbal-argumentativ berücksichtigt werden. Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er sich in einem Dokument inhaltlich mit dem Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem Nachweiszeitraum auseinandersetzt und darlegt, in welchem Umfang die Nachweisführung an den Grundgedanken des ewG angelehnt werden kann. Die ESK hat dazu ein Vorgehen skizziert.
- 2 Die ESK schließt sich dem Bewertungsmaßstab und der Begründung der SSK an und empfiehlt daher dem BMU, vom Antragsteller zu verlangen, dass für diejenigen Rechenfälle, die die Dosis-Schutzziele von 0,1 mSv pro Jahr für wahrscheinliche und 1,0 mSv pro Jahr für weniger wahrscheinliche Fälle im SSK-Sinne eines Referenzwertes überschreiten, die wissenschaftliche Plausibilität und das Ausmaß des Überschreitens aufgezeigt werden. Die ESK hält ein Einhalten des Kriteriums mit einer 95 %igen Sicherheit und ein statistisches Vertrauen in diese Aussage von 95 % als noch akzeptabel. Ebenso sollte das jeweilige Ausmaß des Überschreitens der Dosis-Schutzziele immer unterhalb einer Größenordnung bleiben.
- 3 Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass dieser seine Strategie zum Umgang mit etwa verbleibenden Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung darlegt und diese Ungewissheiten systematisch bewertet. Die für die Berechnung der Konsequenzen von Radionuklidfreisetzung und -transport zugrunde gelegten Sachverhalte und Parameterbandbreiten sind zu begründen. Der Realitätsbezug bzw. der abdeckende Charakter der Modellierungsansätze und der Ergebnisse der Modellrechnungen ist darzustellen bzw. zu belegen. Hinsichtlich des abdeckenden Charakters gilt dies auch für das der Beurteilung der radiologischen Konsequenzen eines potenziellen Wasserzutritts aus dem Deckgebirge an verschiedenen Zutrittsorten zugrunde liegende Szenarium. Beim Integritätsnachweis für die Salzbarriere oberhalb der ehemalige Abbaue sind sowohl das Dilatanz- als auch das Laugendruckkriterium anzuwenden.
- 4 Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass dieser im Hinblick auf die Vereinfachungen der Endlagermodellgeometrien und der Abbildung sicherheitsrelevanter Prozesse in den Modellrechnungen die Interaktion der wesentliche Einflussgrößen synchron durch begleitende Prozessmodellrechnungen untersucht, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen, und auf dieser Basis die Zulässigkeit und Konservativität der verwendeten Modellansätze nachvollziehbar belegt.
- 5 Die ESK empfiehlt dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass eine vollständige FEP-Liste

vorgelegt wird, in welcher für die relevanten Szenarien (und ggf. FEP) entsprechende Wahrscheinlichkeitsklassifizierungen ausgewiesen werden und dargelegt wird, dass die Rechenfälle für die aufgezeigten Szenarien abdeckend sind.

6 Bezüglich Ungewissheiten empfiehlt die ESK dem BMU, vom Antragsteller zu fordern, dass er eine Dokumentation vorlegt, die folgende Aspekte systematisch erfasst, bewertet und begründet:

- die dem Sicherheitsnachweis zugrunde liegende Strategie im Umgang mit Ungewissheiten,
- der Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung (vgl. auch Empfehlung 3),
- der Umgang mit Ungewissheiten aus der Modellvereinfachung,
- der Umgang mit Ungewissheiten aus den vereinfachten Behandlungen oder Vernachlässigungen von Prozessen und
- die Beurteilung der integralen Sicherheitsaussage auf Basis der Analyseergebnisse.

Abschließend kommt die ESK zu der Überzeugung, dass der Langzeitsicherheitsnachweis für das ERAM nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und mit überschaubarem Aufwand machbar ist. Des Weiteren zeigen die Empfehlungen der ESK konkret die ergänzenden Maßnahmen und Nachweise auf, die erforderlich sind, um den vorliegenden Langzeitsicherheitsnachweis des Antragstellers so zu vervollständigen, dass er dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht.

7 Unterlagen

- [1] BMU-Schreiben vom 16.12.2011, Az.: RS III 4 – 17005/1, 16.12.2011
 Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Beratungsauftrag.

- [2] Strahlenschutzkommission
 Radiologische Anforderungen an die Langzeitsicherheit des Endlagers für radioaktive
 Abfälle Morsleben (ERAM), Empfehlung
 Verabschiedet in der 246. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02./03.12.2010,
 gebilligt am 15.10.2010 im Umlaufverfahren.

- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
 Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver
 Abfälle, Stand: 30. September 2010.

- [4] Fachausschuß Brennstoffkreislauf des Länderausschusses für Atomkernenergie
 Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk
 Rdschr. des BMI vom 20. April 1983, RS AGK 3 – 515 790/2.

- [5] Reaktor-Sicherheitskommission/Strahlenschutzkommission (RSK/SSK)
 Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der
 Endlager-Sicherheitskriterien. 05/06.12.2002.

- [6] ICRP (2006):
 The optimisation of radiological protection: Broadening the process.
 Annals of the ICRP (3). ICRP Publication 101.

- [7] IAEA Safety Standards Series No. SSG-23
 The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste
 Specific Safety Guide, Wien, September 2012.

- [8] Reaktorsicherheitskommission /Strahlenschutzkommission
 Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK zum GRS-Bericht
 „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen
 geologischen Formationen“
 verabschiedet von der RSK auf ihrer 408. Sitzung am 09.05.2008, verabschiedet von
 der SSK auf ihrer 224. Sitzung am 03.07.2008.

- [9] Entsorgungskommission
 Stellungnahme zum Entwurf des BMU „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung
 wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ vom 29.01.2009.

- [10] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben - Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das
verfüllte und verschlossene Endlager: eine Übersicht
PSP-Nr.: 9M 23220021, Stand 30.06.2009.
- [11] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Szenarienanalyse. Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der
Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen.- Bearbeiter: Käbel, H., Keller, S. &
Gerardi, J., Verfahrensunterlage P 067, 1999.
- [12] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Plan zur Stilllegung des Endlagers für
radioaktive Abfälle Morsleben. 15.09.2009.
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität
der Salzbarriere in der Schachtanlage Bartensleben.- Bearbeiter: Hausermann, N. &
Nipp, K. H., Verfahrensunterlage P 099, 2000.
- [14] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität
der Salzbarriere in der Schachtanlage Marie.- Bearbeiter: Heusermann, N., Göbel, I. &
Heemann, U., Verfahrensunterlage P 113, 2001.
- [15] ICRP (2012):
Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste.-Annals of
the ICRP, ICRP ref 4838-8963-9177, Draft for Publication, 2012 August 28.
- [16] Projekt ERA Morsleben. Hydrogeologische Standortbeschreibung und
Modellgrundlagen. Teile 1 - 3.- Bearbeiter: Langkutsch, U., Käbel, H., Margane, A. &
Schwamm, G., Verfahrensunterlage P 070, 1998.
- [17] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben.- Bearbeiter: Behlau,
H., Mingerzahn, G. & Bornemann, O., Verfahrensunterlage P 044, 2000.
- [18] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Projekt ERA Morsleben. Geologische
Standortbeschreibung.- Bearbeiter: Stork, G. H., Verfahrensunterlage P 078, 1998.
- [19] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Projekt Morsleben. Geologische Bearbeitung des
Hutgesteins.- Bearbeiter: Balzer, D., Verfahrensunterlage I 046, 1998.

- [20] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Projekt Morsleben. Geologische Bearbeitung des Quartärs.-
Bearbeiter: Ziermann, H., Zwirner, R. & Hederich, N., Verfahrensunterlage I 055, 1998.
- [21] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Langzeitsicherheitsnachweis für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA
PSP-Nr.: 9M 23220021, Stand 27.03.2009.
- [22] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem
Programmpaket EMOS
PSP-Nr.: 9M 23210051, Stand 27.03.2009.
- [23] Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH:
Simulation zweiphasiger Strömungsvorgänge zum Nachweis der Langzeitsicherheit des ERAM
anhand eines Modellfeldes.- Bearbeiter Lorenz, S.; Müller, W. Juli 2003.
- [24] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Szenarienbewertung und geologische Langzeitprognose für das Endlager für
radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – Langzeitprognose der Auswirkung
klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben.
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.- Bearbeiter: Gerardi, J.,
Wildenborg, A.F.B., Archiv-Nr. 117869, 29.01.1999.
- [25] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Geowissenschaftliche Bewertung der Langzeitentwicklung sowie der Zufluss- und
Austrittsszenarien nach Verfüllung des Endlagers.- Bearbeiter: Verfahrensunterlage P 132, 2002.
- [26] IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4
Geological Disposal of Radioactive Waste
Safety Requirements, Wien, Mai 2006.
- [27] Vigfusson, J., Maudoux, J., Rambault, P., Röhlig, K.J. and Smith, R.E., 2007.
European Pilot Study on the Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of
Radioactive Waste. Case Study: Uncertainties and their Management.

- [28] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)
Endlager Morsleben:
Geologische Gesamtbewertung der Lösungszutritte in den Gruben Bartensleben und Marie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.- Bearbeiter: Käbel, H.,
Archiv-Nr. 116678, Dezember 1998.
- [29] IAEA Safety Standards Series No. SSG-14
Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste
Specific Safety Guide, Wien, September 2011.
- [30] IAEA Safety Standards Series No. SSR-5
Disposal of Radioactive Waste
Specific Safety Requirements, Wien, Mai 2011.