



Bundesamt für Strahlenschutz

Deckblatt

GZ: QM - 9A 24210000 / SE 4.2.2

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	24210000	GC	RB	0045	00	Stand: 04.03.2016

Titel der Unterlage:

ISTSTANDSANALYSE DER WERKZEUGE FÜR EINE GEBIRGSMECHANISCHE BEWERTUNG UND PROGNOSE FÜR DIE SCHACHTANLAGE ASSE II

Ersteller:

IFG [REDACTED]

Stempelfeld:

Freigabe durch bergrechtlich verantwortliche Person:

[REDACTED] 19/16
Datum und Unterschrift

Freigabe durch atomrechtlich verantwortliche Person:

i.V. [REDACTED] 14/9.16
Datum und Unterschrift

Freigabe PL:

[REDACTED] 1/16
Datum und Unterschrift

Freigabe zur Anwendung:

[REDACTED] 9/16
Datum und Unterschrift

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS.



Bundesamt für Strahlenschutz

Revisionsblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	24210000	GC	RB	0045	00	Stand: 04.03.2016

Titel der Unterlage:

ISTSTANDSANALYSE DER WERKZEUGE FÜR EINE GEBIRGSMECHANISCHE BEWERTUNG UND PROGNOSE FÜR DIE SCHACHTANLAGE ASSE II

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer	Rev. Seite	Kat.*	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
Kategorie S = substantielle Änderung
mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden

Iststandsanalyse der Werkzeuge für eine gebirgsmechanische Bewertung und Prognose für die Schachtanlage Asse II



**Institut
für
Gebirgsmechanik
GmbH**

Iststandsanalyse der Werkzeuge für eine gebirgsmechanische Bewertung und Prognose für die Schachtanlage Asse II

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz
Willy-Brandt-Str. 5, 38226 Salzgitter
Telefon: 030 18333-0, Telefax: 030 18333-1885
E-Mail: epost@bfs.de, Internet: www.bfs.de

Auftragnehmer: Institut für Gebirgsmechanik GmbH
Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig
E-Mail: kontakt@ifg-leipzig.de, Internet: www.ifg-leipzig.de

Bestell - Nr. (AG): 8758-0
PSP - Nr. (AG): 9A 2421
Auftrag - Nr. (AN): 34/2015

Bearbeiter:



Leipzig, den 04.03.2016



Geschäftsführer



Projektleiter

Der Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Das BfS behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung des BfS zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

INHALTSVERZEICHNIS

TABELLENVERZEICHNIS	5
1. ANLASS UND AUFGABENSTELLUNG	6
2. ZUKÜNFTIGE SYSTEMENTWICKLUNGEN.....	7
3. AUSWERTUNG DER UNTERLAGEN ZUR SCHACHTANLAGE ASSE II.....	9
3.1 BEWERTUNG DER DEFIZITE AUS [1] HINSICHTLICH RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION UND GEGENWÄRTIGER BEARBEITUNGSSTAND	9
3.1.1 <i>Streuung der Laborversuchsergebnisse.....</i>	9
3.1.2 <i>Modellannahmen für die gebirgsmechanischen Modellrechnungen.....</i>	11
3.1.3 <i>Ungewissheiten bzw. Konservativität der Modellergebnisse und Prognosefähigkeit</i>	13
3.1.4 <i>Grundsätzliche kritische Hinweise zu gebirgsmechanisch relevanten Aspekten des HMGU-Schließungskonzeptes.....</i>	19
3.1.5 <i>Fazit der Überprüfung der Defizitanalyse aus dem Jahr 2012</i>	25
3.2 AUSWERTUNG DER ESK/SSK-STELLUNGNAHME [2] „NOTFALLPLANUNG FÜR DIE SCHACHTANLAGE ASSE II“	27
3.2.1 <i>Ableitung von gebirgsmechanisch relevanten Handlungsempfehlungen</i>	27
3.2.2 <i>Fazit der Auswertung der ESK/SSK-Stellungnahme</i>	28
3.3. AUSWERTUNG DER BFS-UNTERLAGEN ZU DEN WORKSHOPS IM JAHR 2012 [3].....	28
3.3.1 <i>Fachworkshop zum Sachstand der Rückholung.....</i>	28
3.3.2 <i>Fachworkshop zur Beschleunigung der Rückholung.....</i>	29
3.3.3 <i>Fachworkshop zum Strahlenschutz und zur Notfallvorsorge</i>	29
4. AUSWERTUNG DER UNTERLAGEN ZUM ENDLAGER FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE MORSLEBEN	32
4.1 BEWERTUNG DER STELLUNGNAHME [4] HINSICHTLICH GEBIRGSMECHANISCHER RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	32
4.1.1 <i>Einschlussvermögen des Endlagersystems</i>	32
4.1.2 <i>Einzelaspekte der Standortcharakterisierung</i>	33
4.1.3 <i>Szenarientwicklung</i>	34
4.1.4 <i>Unsicherheiten/Ungewissheiten</i>	35
4.1.5 <i>Fazit der Stellungnahme der ESK zum „Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben“</i>	35
4.2 BEWERTUNG DER STELLUNGNAHME [5] HINSICHTLICH GEBIRGSMECHANISCHER RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	36

5.	AUSWERTUNG DER UNTERLAGEN FÜR EIN NEU ZU ERRICHTENDES ENDLAGER FÜR RADIOAKTIVE ABFÄLLE IM SALZGESTEIN	36
5.1	BEWERTUNG DER SICHERHEITSANFORDERUNGEN DES BMU [6] HINSICHTLICH GEBIRGSMECHANISCHER RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	36
5.2	AUSWERTUNG DER BERICHTE ZUR „VORLÄUFIGEN SICHERHEITSANALYSE GORLEBEN“ [7] HINSICHTLICH GEBIRGSMECHANISCHER RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	37
5.2.1	<i>Begründung der Herangehensweise</i>	<i>37</i>
5.2.2	<i>Wahrscheinliches FEP „Erdbeben“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.....</i>	<i>43</i>
5.2.3	<i>Wahrscheinliches FEP „Bildung kryogener Klüfte“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere</i>	<i>44</i>
5.2.4	<i>Wahrscheinliches FEP „Konvergenz “ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere</i>	<i>45</i>
5.2.5	<i>Wahrscheinliches FEP „Fluiddruck“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.....</i>	<i>46</i>
5.2.6	<i>Wahrscheinliches FEP „Metallkorrosion“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.....</i>	<i>47</i>
5.2.7	<i>Wahrscheinliches FEP „Auflockerungszone“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere</i>	<i>48</i>
5.2.8	<i>Wahrscheinliches FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.....</i>	<i>49</i>
5.2.9	<i>Wahrscheinliches FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere</i>	<i>50</i>
5.2.10	<i>Wahrscheinliches FEP „Fluidvorkommen im Wirtsgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere</i>	<i>53</i>
5.2.11	<i>Wahrscheinliches FEP „Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere.....</i>	<i>54</i>
5.2.12	<i>Weniger wahrscheinliches FEP „Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen“.....</i>	<i>55</i>
5.2.13	<i>Weniger wahrscheinliches FEP „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“</i>	<i>56</i>
5.2.14	<i>Weniger wahrscheinliches FEP „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“</i>	<i>58</i>
5.2.15	<i>Weniger wahrscheinliches FEP „Kanalisation in Dichtelementen“</i>	<i>61</i>
5.2.16	<i>Fazit der Auswertung der Berichte zur „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“</i>	<i>62</i>
5.3	BEWERTUNG DER „SPECIFIC SAFETY REQUIREMENTS NO. SSR-5“ HINSICHTLICH GEBIRGSMECHANISCHER RELEVANZ FÜR DIE RÜCKFALLOPTION IN DER SCHACHTANLAGE ASSE II.....	63
6.	SACHSTAND UND AUFLISTUNG NOCH OFFENER FRAGESTELLUNGEN	64
	LITERATURVERZEICHNIS	68

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Wahrscheinliche FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer Initial-Barriere (Initial-FEP, Tabelle aus [7]), Seite 40

Tabelle 5.2: Weniger wahrscheinliche FEP (Tabelle aus [7]), Seite 41

Gesamtseitenanzahl: 69

1. Anlass und Aufgabenstellung

Der Anlass der hier vorgelegten Iststandsanalyse besteht darin, dass für den Fall der nicht möglichen oder nicht genehmigungsfähigen Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II die Lex-Asse die Auswahl der dann bestmöglichen Stilllegungsoption (Rückfalloption) vorsieht. Um eine Bewertung von möglichen Optionen im Eintrittsfall schnellstmöglich durchführen zu können, sind vorlaufende Analysen der zu erwartenden Auswirkungen (Auswirkungsanalyse) notwendig. Des Weiteren zeigen die bereits vorliegenden Erfahrungen zu den realisierten bzw. noch ausstehenden Maßnahmen der Notfallplanung, dass eine aktualisierte Bewertung des zu erwartenden Systemverhaltens erforderlich ist, um die Maßnahmen weiterhin sinnvoll steuern zu können.

In einem ersten Schritt soll hierzu die Defizitanalyse der bisherigen Sicherheitsbetrachtungen ([1]), die auf eine gezielte Einleitung von $MgCl_2$ -Lösung bezogen war, dahingehend überprüft werden, welche Nachweismethoden und Kriterien unter den Rahmenbedingungen des jetzt gegebenen gesetzlichen Auftrages der Rückholung und unter besonderer Berücksichtigung einer Rückfalloption noch relevant sind. Es soll aufgezeigt werden, welche Defizite unter der Betreiberschaft des BfS bereits behoben worden sind bzw. welche Qualifizierungen und Neuentwicklungen der Werkzeuge für eine Auswirkungsanalyse noch erforderlich sind.

Weiterhin soll eine Überprüfung erfolgen, inwieweit die Nachweismethoden und Kriterien dem Stand von Wissenschaft und Technik der Sicherheitsanalysen für ein neu anzulegendes Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgestein entsprechen. Diese Überprüfung wird anhand standortbezogener Sicherheitsanalysen (ERAM, Gorleben) und dem standortunabhängigen nationalen und internationalen Regelwerk vorgenommen.

Daraus ergeben sich folgende Arbeiten:

- Revision der vorliegenden gebirgsmechanischen Defizitanalyse des IfG aus dem Jahr 2012 ([1]) sowie Prüfung von weiteren Unterlagen ([3]) auf gebirgsmechanische Sachverhalte. Prüfung auf Gültigkeit nach aktuellem Kenntnis- und Bearbeitungsstand, auch unter Berücksichtigung der ESK/SSK-Stellungnahmen zur Notfallplanung Asse ([2]).
- Recherche und Sichtung standortspezifischer oder themenspezifisch relevanter gutachterlicher Stellungnahmen ab 2012, wie der ESK/SSK-Stellungnahmen zum Langzeitsicherheitsnachweis ERAM ([4] und [5]), der Sicherheitsanforderungen des BMU

([6]) und der betreffenden Vorgehensweise in der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ ([7]). Abgleich mit dem internationalen Regelwerk ([8]) nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik.

- Bewertung der zum Zeitpunkt der Bearbeitung vorliegenden gebirgsmechanischen Daten und Erkenntnisse sowie Ausweisung der vorhandenen Defizite und Konservativitäten.

2. Zukünftige Systementwicklungen

Falls eine vollständige Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II nicht (oder noch nicht) möglich ist, sind zur Bewertung der dann bestmöglichen Stilllegungsoption gebirgsmechanische Werkzeuge für eine Auswirkungsanalyse zu entwickeln. Diese Werkzeuge müssen auch die Bewertung des laufenden Offenhaltungsbetriebes umfassen und eine Prognose bis zur Stilllegung der Schachanlage gestatten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die gegenwärtig laufenden und auf den „Auslegungsüberschreitenden Lösungszutritt“ (AÜL) bezogenen Maßnahmen der Notfallplanung „Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit“ und „Minimierung der Konsequenzen“ gemäß [9] und [10], soweit sinnvoll und erforderlich, umgesetzt werden. Das bedeutet, die Bezüge einer Auswirkungsanalyse bei der Nichtrückholung der radioaktiven Abfälle sind im Wesentlichen der weitere Offenhaltungsbetrieb und die denkbare Entwicklung nach Beendigung der Vorsorgemaßnahmen mit der Ausführung von Notfall- oder Rückfalloptionsmaßnahmen.

Folgende Entwicklungen nach Abschluss der Vorsorgemaßnahmen inklusive der dann relevanten gebirgsmechanischen Sachverhalte sind denkbar:

- a) Rückholung kann noch nicht beginnen (Grund: noch kein Zwischenlager, noch sicherheitliche Probleme bzw. ausstehende Genehmigungen), kein AÜL, keine Gegenflutung
 - Weiterer „trockener“ Offenhaltungsbetrieb mit Lösungsfassung
 - Versatzkompaktion und Ausklingen der gebirgsmechanischen Prozesse
 - Restarbeiten (Versatzinjektion) im Bergwerk
- b) Beginn der Rückholung, aber Abbruch wegen sicherheitlicher Probleme, kein AÜL, keine Gegenflutung

- Weiterer „trockener“ Betrieb in einem Altbergwerk mit überwiegend verfüllten Abbauen und Strecken, ggf. weitere Lösungsfassung
- Der Rückholschacht 5 mit benachbarten Infrastrukturräumen existiert, Auffahrung von Kammerzugangsstrecken und Öffnung erster Einlagerungskammern

c) AÜL und deshalb Gegenflutung

- Weiterer „trockener“ Offenhaltungsbetrieb bis zum AÜL
- Infolge AÜL vollständige Flutung und weitere Notfallmaßnahmen als Notfallreaktion
- Im Ergebnis umgesetzter Vorsorgemaßnahmen und gebirgsmechanischer Veränderungen anderes System und Systemverhalten als in [1] bewertet

d) Entscheidung gegen Rückholung (Grund: kein Zwischenlager, sicherheitliche Probleme können nicht behoben werden bzw. keine Genehmigung), Gegenflutung ohne vorherigen AÜL

- Weiterer „trockener“ Offenhaltungsbetrieb mit Notfallplanung
- Gemäß Lex-Asse Prüfung einer Rückfalloption, hier mit Einleitung einer $MgCl_2$ -Lösung
- Optimierte Vollverfüllung, da infolge umgesetzter Vorsorgemaßnahmen und gebirgsmechanischer Veränderungen anderes System und Systemverhalten

Im Folgenden wird nur auf die letzte Systementwicklung d) Bezug genommen. Für die gebirgsmechanische Bewertung dieser Entwicklung sind auftragsgemäß Werkzeuge zur Verfügung zu stellen. Diese sind entweder schon vorhanden (siehe Defizitanalyse) und müssen lediglich adaptiert werden oder sind, vor allem hinsichtlich der Übertragung der methodischen Herangehensweise bei einem neuen Endlager, neu zu entwickeln. Bei der Übertragung erforderliche Abweichungen sind zu begründen und die Konsequenzen zu diskutieren.

Da generell bei allen genannten Stilllegungsoptionen der weitere „trockene“ Offenhaltungsbetrieb bewertet werden muss und Werkzeuge für Sicherheitsanalysen für die Nachbetriebsphase des Bergwerkes zu entwickeln sind, sind die auf die Systementwicklung d) bezogenen Nachweismethoden und Kriterien zu großen Teilen auch für eine Analyse der Systementwicklungen a) bis c) anwendbar.

3. Auswertung der Unterlagen zur Schachtanlage Asse II

3.1 Bewertung der Defizite aus [1] hinsichtlich Relevanz für die Rückfalloption und gegenwärtiger Bearbeitungsstand

3.1.1 Streuung der Laborversuchsergebnisse

<i>Diskussionspunkt in [18], Seite 11:</i>	In der Tragfähigkeitsanalyse [11] sind alle bis zu diesem Zeitpunkt geprüften Steinsalzchargen Na3β/γ genannt. Die Bestimmung der Materialparameter für den visko-elasto-plastischen Stoffansatz erfolgte an nur einer, vom Grubengeologen aber als typisch autorisierter Charge, bei der die Eingangskontrolle mittels Durchschallung keine Auflockerungen zeigte. Es wird kritisiert, dass <i>keine Diskussion der möglichen Bandbreite der Festigkeits- und Kriecheigenschaften unterschiedlicher Salzvarietäten (Homogenbereiche) stattfindet. Für die Festigkeitsparameter, insbesondere der Rest- oder Nachbruchfestigkeiten, deren Streubreite beschränkt ist, mag dies hinnehmbar sein, für die Kriecheigenschaften, die bis zu einem Faktor von max. 100 variieren können, ist eine Diskussion erforderlich.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	<p>Bzgl. der Festigkeit konnte in [11] gezeigt werden, dass das für die Stoffgesetzformulierung verwendete Steinsalz Na3β/γ an der Bandbreitenuntergrenze aller vom IfG bis dahin untersuchter Leinsteinsalzchargen liegt und bzgl. des Kriechverhaltens wurde mittels der Festlegung trockenen und feuchten Kriechverhaltens eine abdeckende Bandbreite aufgespannt.</p> <p>Abgesehen davon wurde die Bandbreite der Materialparameter für den visko-elasto-plastischen Stoffansatz in einem umfangreichen Laborprogramm in [12] auch für das Steinsalz Na2β (Steinsalzbarriere zum Deckgebirge) und Na2SP (Referenzcharge) untersucht. Weiterhin werden gegenwärtig in der Einzelbeauftragung „Labor- und In-situ-Untersuchungen zur Erweiterung der Datensätze an Steinsalz-, Kalisalz- und Versatzproben für die Bewertung der Bergbausicherheit im Offenhaltungsbetrieb“ die Steinsalzvarietäten Na2P und Na2K geprüft.</p> <p>In [11] gelang es mittels numerischer Nachrechnungen der Festigkeitsversuche zu zeigen, dass die Parameter für den visko-elasto-plastischen Stoffansatz das Materialverhalten und die Bandbreite der Laborversuche sehr gut beschreiben.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	<p>Die geforderte Diskussion der Bandbreite von Festigkeits- und Kriecheigenschaften wurde geführt.</p> <p>Das Defizit wurde, soweit gegenwärtig möglich, behoben.</p>
<i>Stand W&T:</i>	Im Rahmen der bisher 19jährigen Sachverständigentätigkeit wurden eine Vielzahl von Salzvarietäten getestet und die verwendeten Parametersätze überprüft. Die Validierung anhand der Laborversuche und die On-site-Confirmation mittels der Befunde der Standortüberwachung entsprechen dem Stand von W&T.

<i>Diskussionspunkt in [18], Seite 12:</i>	<p>Bzgl. der Sackung von trockenem Versatz bei Lösungseinleitung liegen im Labor und in situ unterschiedliche Beobachtungen vor. Während bei Laboruntersuchungen an der BGR keine echte Sackung, aber ein drastischer Spannungsabfall eintrat, wurden im Bergwerk vielfach deutliche Sackungen festgestellt.</p> <p><i>In den numerischen Simulationen wird konservativ eine Sackung des eingebrachten Versatzes von 10 % unterstellt. Der sich daraus ergebende Firstspalt muss sich durch Konvergenz erst wieder schließen, bis ein Widerstand durch den Versatz aufgebaut werden kann. Der anfängliche, wenn auch geringe Stützdruck des Versatzes wird entzogen und führt, durch weitere Prozesse verstärkt, zu hohen Deformationen. Insgesamt sind der Vorgang der Sackung und die daraus resultierenden Konsequenzen von größerer Bedeutung für die Tragfähigkeit und die Langzeitsicherheit. Aus diesem Grunde sollte der Prozess genauer erfasst und untersucht werden. Der Gutachter hält es für notwendig, dass hierzu ergänzende Untersuchungen erfolgen.</i></p>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	<p>Das Sackungsverhalten der unterschiedlichen Versatzarten „Altversatz“, Eigenversatz“ und „Fremdversatz“ sowie der Widerstandsabfall bei Befeuchtung mit MgCl₂-Lösung wurden in [13] untersucht. Als Ergebnis liegt fest, dass die Sackung bei MgCl₂-Lösungsaufstieg in dem Versatzkörper zukünftig mit 4 % anzusetzen ist, aber weiterhin von einem Abfall des Tragwiderstandes im Korngerüst ausgegangen werden muss.</p> <p>Die Sackung bei einem Eindringen von Deckgebirgslösung in die Versatzkörper wurde in [12] mit noch geringeren Beträgen von etwa 1 % ermittelt.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	<p>Die geforderten ergänzenden Untersuchungen sind realisiert. Das Defizit wurde behoben.</p>
<i>Stand W&T:</i>	Die komplexe Untersuchung und Überprüfung des Sachverhaltes entspricht dem Stand von W&T.

3.1.2 Modellannahmen für die gebirgsmechanischen Modellrechnungen

<p><i>Diskussionspunkt</i> in [18], Seite 11 bis 12:</p>	<p><i>Als in situ relevante Verformungsrate (auch charakteristische Verformungsrate) für das Tragsystem des Bergwerkes Asse wird ein Wert von 10^{-10} s^{-1} (3 ‰ pro Jahr) angesetzt. Dieser Wert leitet sich im Wesentlichen aus den Deformationsraten im Abbausystem der Südwestflanke ab. Die Festigkeitswerte des Steinsalzes und der Widerstandsaufbau im Versatz werden auf diese Rate bezogen. Zu hinterfragen und diskutieren ist, wie repräsentativ diese Verformungsrate für das Gesamtsystem ist und wie stark der Einfluss von veränderten Verformungsraten auf die den Geschwindigkeiten angepassten Festigkeitskurven ist. Die Pfeilerstauchungsmessungen weisen bei Auswertung der Einzelmessstrecken der Extensometer bis zu einer Größenordnung höhere Verformungsraten aus. In den Konvergenzmessstrecken nördlich der Abbaue der Südwestflanke werden niedrigere Verformungsraten festgestellt. Wie groß ist der Einfluss der Schwankungsbreite dieser Deformationsraten auf die Ergebnisse der Tragfähigkeitsanalysen? Bei welchen Verformungsraten kann der Übergang von Langzeitfestigkeiten auf vorwiegende Kriechverformung angesetzt werden? Wie werden diese Unsicherheiten in der Tragfähigkeitsbewertung berücksichtigt?</i></p>
<p><i>Relevanz:</i></p>	<p>Für die Rückfalloption relevant.</p>
<p><i>Bewertung:</i></p>	<p>Die Verformungsrate von 3 ‰ pro Jahr ist auch gegenwärtig noch charakteristisch für das Gesamtsystem, wobei betont werden muss, dass die großräumigen IfG-Modelle typische und allgemeingültige gebirgsmechanische Prozesse beschreiben. Für lokale Situationen wie die Standorte von Abdichtbauwerken in Strecken oder die nördlichen Nebenabbaue auf den oberen Sohlen stehen Submodelle zur Verfügung, die mit den lokalen Verformungsraten (auch von 3 ‰ pro Jahr abweichend) beaufschlagt werden.</p> <p>Der Einfluss unterschiedlicher Labor-Verformungsraten auf die Festigkeitskurven wurde mittels der numerischen Simulationen in [12] intensiv untersucht. Der Einfluss der Deformationsraten auf die Festigkeitsparameter des visko-elasto-plastischen Stoffgesetzes ist in der in situ relevanten Größenordnung sehr gering, so dass für den In-situ-Tragwiderstand ein gemeinsamer charakteristischer Streubereich angesetzt werden kann. Dieser wird für die bergwerkstypischen Streuungen der Verformungsraten als abdeckend angesehen bzw. ist konservativ niedrig, wenn es zu einer Zunahme der Verformungsraten kommen würde.</p>
<p><i>Arbeitsstand:</i></p>	<p>Der Einfluss der Schwankungsbreite unterschiedlicher Deformationsraten auf die Ergebnisse der Tragfähigkeitsanalysen wurde untersucht und die Ungewissheiten sind abdeckend berücksichtigt. Das Defizit wurde behoben.</p>
<p><i>Stand W&T:</i></p>	<p>Die komplexe Untersuchung und Überprüfung des Sachverhaltes entspricht dem Stand von W&T.</p>

<p><i>Diskussionspunkt in [18], Seite 12 bis 13:</i></p>	<p>Zum hydraulisch-mechanischen Deckgebirgsmodell: <i>Der Betrag des Fluiddruckes wird in Höhe des hydraulischen Gradienten in den als gebrochen ausgewiesenen Elementen eingeschrieben. Dabei ist zu vermuten, dass damit der Druck der gesamten Wassersäule von ca. Geländeoberfläche bis in die betreffende Teufe gemeint ist, eine genaue Festlegung ist in dieser Unterlage nicht zu finden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich aufgrund des Lösungszutrittes in das Grubengebäude ein Druckabsenkungstrichter im Deckgebirge vor dem Grubengebäude ausgebildet hat, der den Rötanhydrit und weite Teile des übrigen Oberen Buntsandstein bis zur Grenze zum Muschelkalk erfasst hat. Die dort ausgewiesenen Lösungsdrücke liegen deutlich unter dem hydrostatischen Druck. Insofern ist anzuzweifeln, ob der von IfG angesetzte Druck einschließlich seiner Abminderung durch den so genannten „Wirkfaktor für strukturelle Integrität“ gerechtfertigt ist. Zumindest liegt hier eine Inkonsistenz in den Modellierungen vor, die ausgeräumt werden muss.</i></p>
<p>Relevanz:</p>	<p>Für die Rückfalloption relevant.</p>
<p>Bewertung:</p>	<p>Bei der Forderung nach Ausräumung der „Inkonsistenz in den Modellierungen“ muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche physikalische Sachverhalte modelliert werden. Der Druckabsenkungstrichter im Deckgebirge vor dem Grubengebäude basiert auf einer äquivalent-porösen Strömung im gesamten Deckgebirge bis zur Senke an der Übertrittsstelle zum Bergwerk. Mechanische Wirkungen auf die Gebirgsschichten werden dabei nicht simuliert. Der hydraulische Druck im IfG-Modell baut sich erst nach Überschreitung einer Festigkeitsgrenze der Gesteine und zunehmender Rissbildung durch Überzugswirkungen aus dem Bergwerk auf. Vorher wird zwar auch von einer Lösungssättigung im Gebirge ausgegangen, der hydraulische Druck wird aber im Modell mechanisch nicht wirksam, da das geogen angelegte Trennflächeninventar im Gebirge fest eingespannt ist. Die Festigkeitsgrenze und der Betrag der hydraulischen Drücke (Wirkfaktor) werden, da die Überzugswirkungen vorher nicht bekannt sind, in vorauslaufenden Fallstudien mit dem Ziel ermittelt, eine möglichst gute Übereinstimmung der Deckgebirgsmobilität mit den In-situ-Messwerten zu erhalten. Weiterhin erfolgt eine Orientierung an der hydrogeologischen Charakterisierung der Deckgebirgsschichten. Nach der Initiierung wird keine Änderung des Wirkfaktors mehr vorgenommen, dieser repräsentiert keine Anpassungsgröße, wie bei den früheren 2D-Modellen. In diesem unterschiedlichen physikalischen Kontext (hydraulischer Absenktrichter nach Darcy im Gegensatz zur hydraulisch-mechanisch begründeten Festigkeitshypothese nach dem Effektivspannungskonzept) ist keine Konsistenz herstellbar. Eine Verwendung der hydraulischen Drücke in der Drucksenke südlich des Bergwerkes aus der äquivalent-porösen Strömung würde, um im gebirgsmechanischen Modell die gemessene Deckgebirgsmobilität nachvollziehen zu können, unrealistisch hohe Wirkfaktoren erfordern.</p>
<p>Arbeitsstand:</p>	<p>Das Modellkonzept wird nach jetzigem Kenntnisstand beibehalten und die Ergebnisse fließen in die aktualisierte Tragfähigkeitsanalyse und Prognose 2016 ein.</p> <p>Es wird kein zu behebendes Defizit gesehen, jedoch ist eine ausführliche Begründung der Modellierung erforderlich.</p>
<p>Stand W&T:</p>	<p>Die komplexe Untersuchung und Überprüfung des Sachverhaltes entspricht dem Stand von W&T.</p>

3.1.3 Ungewissheiten bzw. Konservativität der Modellergebnisse und Prognosefähigkeit

<i>Diskussionspunkt in [18], Seite 11:</i>	Es wird kritisiert, dass ein grundsätzliches Manko in der Unterlage darin besteht, dass <i>Unsicherheiten bzw. Bandbreiten von Modellen und Parametern nicht ausreichend erfasst und in ihren Auswirkungen auf nachfolgende Untersuchungen nicht verfolgt und diskutiert werden</i> . Weiterhin: <i>Da aus den Tragfähigkeitsanalysen heraus die Unsicherheiten und Konservativitäten nicht systematisch verfolgt wurden, ist in der Unsicherheitsanalyse der Langzeitsicherheitsanalyse nur ein pauschales Vorgehen anzutreffen, dass im Einzelnen nicht begründet ist.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	<p>Diese Kritik ist grundsätzlich berechtigt und in der 2016 neu zu erarbeitenden gebirgsmechanischen Zustandsbewertung und Prognose werden deshalb Bandbreitenrechnungen vorgelegt, bei denen unterschiedliche Abläufe der Firstspaltverfüllung variiert und unterschiedliche Zeitpunkte einer Ausbreitung von Salzlösung im Grubengebäude (verstärktes Feuchtekrichen) angenommen werden. Die Bruchprozesse in den Pfeilern und Schweben werden trotz Stabilisierung voranschreiten und aufgrund des gebirgsmechanischen Grenzzustandes, vor allem bzgl. der noch offenen Infrastrukturräume, und angesichts des weiter existierenden Risikos eines AÜL wird der Prognosezeitraum begrenzt sein.</p> <p><i>Auswirkungen auf nachfolgende Untersuchungen</i> besitzen im Wesentlichen die langzeitigen Konvergenzrechnungen, bei denen umfangreiche Sensitivitätsstudien (z.B. unterschiedliche Überdrücke während der Auspressung) durchgeführt werden.</p> <p>Eine systematische Analyse aller wahrscheinlicher Ungewissheiten des Systemverhaltens und Festlegung von Konservativitäten (analog zu FEP bei einem neu zu errichtenden Endlager im Salzgestein) ist bei der Schachtanlage Asse II bei dem gegebenen Zustand nicht möglich.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	<p>Die Berücksichtigung von Bandbreiten in den Prognoserechnungen bezieht sich auf Systementwicklungen, die gegenwärtig schon auftreten bzw. noch beeinflussbar sind. Es werden unterschiedliche Varianten und zeitliche Abläufe der Firstspaltverfüllung sowie unterschiedliche Zeitpunkte einer Ausbreitung von Deckgebirgslösung berechnet.</p> <p>An der Behebung der Defizite wird gegenwärtig gearbeitet.</p>
<i>Stand W&T:</i>	<p>Statt einer formalen Übertragung des Standes von W&T bzgl. der Sicherheitsanalyse für ein neues Endlager wird ein Expert Judgment für die Festlegung von standort- und systembezogenen Prozessabläufen als erforderlich erachtet. Es erfolgen jedoch eine Begründung für die Abweichung vom Stand W&T sowie eine Diskussion der Konsequenzen. Die Aussagen zu den Ungewissheiten (oder Bandbreiten) werden mit den maßgebenden Voraussetzungen und Einschränkungen verknüpft.</p>

<i>Diskussionspunkt in [18], Seite 11:</i>	<i>Auch der Bezug der Konservativität ist zu diskutieren. Im Hinblick auf eine Tragfähigkeitsanalyse erscheint die Wahl von Parametern aus dem unteren Streubereich als sinnvoll. Für eine Sicherheitsbetrachtung im Rahmen von Transportrechnungen zum möglichen Radionuklidaustrag (in der Betriebsphase werden z. B. die Startbedingungen von Porositäten im Versatz und Auflockerungen im Gebirge festgelegt) ist eine solche Konservativität nicht belegt und sehr schwer nachweisbar.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	<p>Diese Aussage ist richtig, es ist tatsächlich sehr schwierig, die letztendlichen Konsequenzen von einzelnen Parameterstreuungen auf die Einhaltung der Schutzziele zu bewerten. Mit der Anwendung des Begriffes „Konservativität“ sollte man deshalb vorsichtig sein, da in den komplexen Systemen mit gegenseitigen Rückkopplungen eine als „konservativ“ betrachtete Bandbreitengrenze zu einer hinsichtlich der Schutzziele schädlichen Beeinflussung führen kann.</p> <p>In den komplexen Rechenmodellen des IfG wurden Parameter, die versuchstechnisch zugänglich sind (z.B. gesteinsmechanisches Verhalten der Salzgesteine und Versatzarten) mit ihrem Prozessverhalten angesetzt und nicht zugängliche Parameter (Deckgebirgsmobilität, Lösungsdrücke) in Bandbreitenrechnungen (innerhalb gesteinsmechanisch bekannter und physikalisch plausibler Grenzen) bis zur Übereinstimmung des integralen Prozessverhaltens mit den In-situ-Messwerten variiert. Die Simulation zurückliegender Systementwicklungen zielt nicht auf die Abbildung einer Konservativität, sondern auf die Übereinstimmung mit den Messwerten.</p> <p>In den langzeitigen Konvergenzrechnungen als Grundlage der Transportrechnungen zum Radionuklidaustrag in der Nachbetriebsphase hat sich gezeigt, dass sich bei einem gefluteten Grubengebäude die Konvergenzverläufe in den Bandbreitenrechnungen nur wenig unterscheiden, da der hydraulische Innendruck das Grubengebäude von innen heraus stützt.</p> <p>Eine Diskussion der Konservativität ist in zukünftigen Konvergenzrechnungen ggf. hinsichtlich anzusetzender Überdrücke (Gasbildung) oder bzgl. unterschiedlicher Versatzwirkungen sinnvoll.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	An der Behebung der Defizite wird gegenwärtig gearbeitet.
<i>Stand W&T:</i>	Die komplexe Untersuchung und Überprüfung des Sachverhaltes entspricht dem Stand von W&T.

<p><i>Diskussionspunkt in [18], Seite 20 bis 21:</i></p>	<p><i>Bereits in der Einführung und auch an späterer Stelle wird öfters darauf hingewiesen, dass die Prognose der dreidimensionalen Tragfähigkeitsanalyse [14] belastbarer sein soll als diejenige der zweidimensionalen Tragfähigkeitsanalyse [11]. Dies wird damit begründet, dass die Steuerung des Systemsverhaltens über die vorliegenden Messwerte an den sichtbaren Vorgängen im Grubengebäude (Pfeiler- und Schwebenversagen) verlässlicher ist, als über die mit größeren Unsicherheiten behafteten gebirgsmechanischen Vorgänge im Deckgebirge. Wie sich aber zeigt, sind die Anpassungen der 2D-Tragfähigkeitsanalyse ebenso gut wie diejenigen der 3D-Tragfähigkeitsanalyse. In letzterer werden für das Deckgebirgsverhalten dieselben Mechanismen angesetzt, wie für die 2D-Analyse, allerdings in einer wesentlich allgemeineren Art. Soweit der Gutachter feststellen kann, scheint das numerische System der 3D-Analyse etwas stabiler zu laufen als bei der 2D-Analyse.</i></p> <p><i>Solche pauschalen Aussagen wie eingangs aufgeführt, rufen Zweifel hervor, ob dann das 2D-Modell für eine Langzeitprognose geeignet ist. Mit letzterem wurden die wichtigen Berechnungen zur Konvergenzentwicklung in der Nachbetriebsphase durchgeführt, die direkt in die Berechnungen zum Radionuklidtransport eingingen. Da auch in der Langzeitprognose [15] keine Auseinandersetzung mit der hier geäußerten Auffassung erfolgt, ist eine Rechtfertigung der Verwendung des 2D-Modells anstelle des 3D-Modells und seiner Belastbarkeit nachzuholen.</i></p>
<p><i>Relevanz:</i></p>	<p>Für die Rückfalloption relevant.</p>
<p><i>Bewertung:</i></p>	<p>Es muss darauf hingewiesen werden, dass nicht die gute Anpassung an die zurückliegenden Entwicklungen entscheidend für die Prognosefähigkeit sind, sondern die Fähigkeit der Modelle, die wesentlichen physikalischen Prozesse bzw. gebirgsmechanischen Wechselwirkungen im Tragsystem des Bergwerkes (Entfestigung der Pfeiler, Bruch der Schweben, Lastumlagerung auf die Baufeldränder, Versatzdruckaufbau, Stabilisierung mittels Sorelbeton) abzubilden. Nur mit einer nachgewiesenen korrekten zeitlichen und räumlichen Nachbildung dieser Prozesse ist eine begrenzte Prognose vertretbar. Diese Zustandsbewertung und Prognose wird jetzt mit 3D-Modellen des halben Bergwerkes realisiert, so dass die Kritik am 2D-Modell gegenstandslos ist.</p> <p>Darüber hinaus ist das IfG grundsätzlich der Ansicht, dass für eine Prognose die 3D-Rechnungen belastbarer sind, als die 2D-Modelle (siehe obige Begründung). Das 2D-Modell konnte in [15] nur deshalb für Prognoserechnungen verwendet werden, da die Zeitdifferenz vom Prognosestart aus der damals gegenwärtigen Situation (bis dahin Modellanpassung möglich) bis zur Einleitung des stabilisierenden Schutzfluides, welches danach infolge des hydrostatischen Stützdruckes das Systemverhalten dominiert und zu einem prognosesicheren Verhalten führt, nur wenige Jahre betrug. Für die prognostische Bewertung eines zukünftigen langjährigen Offenhaltungsbetriebes, und auch für die Bewertung einer Nachbetriebsphase im gefluteten Bergwerk, sind aber 2D-Modellrechnungen, die nur bis zur Gegenwart angepasst werden können, nicht verwendbar.</p>
<p><i>Arbeitsstand:</i></p>	<p>Das Defizit ist behoben.</p>
<p><i>Stand W&T:</i></p>	<p>Die Verwendung großräumiger 3D-Modelle entspricht dem Stand von W&T.</p>

<i>Diskussionspunkt in [18], Seite 21:</i>	Während für die 3D-Analyse „infolge der ‚nachhaltig‘ guten Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Verschiebungen und Spannungen (ist) mit dem Modell eine belastbare Prognose bis zum Ende der Betriebsphase möglich“ sein soll, werden für die 2D-Modellierungen Modellüberprüfungen und -anpassungen an die tatsächlichen gebirgsmechanischen Reaktionen für notwendig erachtet. Hier werden, wie zuvor, wieder Zweifel an der Vertrauenswürdigkeit des eigenen Modells geäußert. In einem Planverfahren müssen die Modelle einschließlich der berücksichtigten Prozesse nach Stand von Wissenschaft und Technik abgesichert sein. Dies gilt auch für „Funktionsmodelle“, mit deren Hilfe verschiedene Reaktionsmöglichkeiten im Sinne von Variationsrechnungen untersucht werden können, um ein vertieftes Verständnis von Systemreaktionen zu erhalten, Parameterbandbreiten einzuschränken und damit die Aussagesicherheit zu erhöhen. Eine Überprüfung der Modelle hinsichtlich ihrer Ergebnisbandbreiten durch neue oder fortgeschrittene Erkenntnisse ist dagegen sinnvoll und nach den Sicherheitskriterien auch vorzusehen. Dies erfordert allerdings auch, dass ein entsprechendes Untersuchungs- und Messprogramm bis zum Ende der Betriebsphase und im begrenzten Maße auch darüber hinaus vorzulegen ist.
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	<p>Alle Prognosemodelle müssen, soweit Daten der Standortüberwachung zur Verfügung stehen, überprüft und ggf. nachjustiert werden. Die Ausführungen des IfG sind in diesem Sinne zu verstehen, wonach eine Überprüfung der Modelle hinsichtlich ihrer Ergebnisbandbreiten durch neue oder fortgeschrittene Erkenntnisse sinnvoll und nach den Sicherheitskriterien auch vorzusehen ist.</p> <p>Das erforderliche Untersuchungs- und Messprogramm bis zum Ende der Betriebsphase und im begrenzten Maße auch darüber hinaus wird vorausgesetzt.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	<p>Das Defizit hinsichtlich der 2D-Modellierung existiert nicht mehr. Den Ausführungen zum Untersuchungs- und Messprogramm bis zum Ende der Betriebsphase und im begrenzten Maße auch darüber hinaus wird vom IfG zugestimmt.</p>
<i>Stand W&T:</i>	Die Verwendung großräumiger 3D-Modelle sowie die messtechnische Überprüfung der Modellergebnisse entsprechen dem Stand von W&T.

<i>Diskussionspunkt in [19], Seite 74:</i>	<i>Nachteilig erscheint, dass im zweidimensionalen und dreidimensionalen Berechnungsmodell leicht unterschiedliche Ansätze zur Modellierung des Deckgebirges gewählt werden. Der Sachverhalt könnte ein Indiz dafür sein, dass die physikalischen Vorgänge im Deckgebirge zwar bekannt sind, sich aber nicht detailliert beschreiben lassen. Für die Prognosegüte hinsichtlich der Verhältnisse in den nächsten zehn Jahren ist das jedoch irrelevant.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Die gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Prozesse im südlichen Deckgebirge können tatsächlich lediglich in ihren integralen Auswirkungen auf das Bergwerk simuliert werden. Die physikalischen Vorgänge sind nur im Grundsatz bekannt und lassen sich auch nicht detailliert beschreiben. Das gilt aber für beide Modelle. Im Rahmen der Bewertung der Maßnahmen des Notfallkonzeptes sowie bei den Prognoserechnungen wird überwiegend auf 2D-Modellrechnungen verzichtet. Die Nachteile dieser Modellierung sind weiter oben bereits benannt.
<i>Arbeitsstand:</i>	Das Defizit hinsichtlich der 2D-Modellierung existiert nicht mehr.
<i>Stand W&T:</i>	Die Verwendung großräumiger 3D-Modelle entspricht dem Stand von W&T.

<p><i>Diskussionspunkt in [18], Seite 24 bis 25:</i></p>	<p><i>Die Langzeitprognose sollte nicht nur dazu dienen, für die Langzeitsicherheitsanalyse Konvergenzraten- und Porositätsverläufe zu liefern, sondern sie sollte auch das langfristige Tragvermögen des Systems inklusive möglicher weiterer Schädigungen über die Betriebsphase hinaus untersuchen. Dazu ist „die Zulässigkeit der Schließungsmaßnahmen am Ende der Betriebsphase“ nicht nur vorauszusetzen, sondern deren Auswirkungen in die Nachbetriebsphase zu betrachten und hinsichtlich der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an die Gebirgsmechanik zu bewerten.</i></p> <p><i>Gleiches gilt für die Untersuchungen zu den Szenarien aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, wo der Gutachter „eine ... gebirgsmechanische Bewertung von Tragelementen im Bergwerk oder der Deckgebirgsbereiche“ erwartet. Wieso „aufgrund der bereits verschlossenen und durch das Schutzfluid stabilisierten Grube“ eine solche Betrachtung „nicht mehr erforderlich“ ist, wird nicht weiter belegt. Es wird erwähnt, dass „die seismische Anregung (führt) aber offensichtlich zu einer Versatzverdichtung und Setzung des Tragsystems“ führt. Was mit Setzung gemeint ist und welche Konsequenzen dies auf die Integrität der Salzbarriere zum Deckgebirge oder innerhalb des Grubengebäudes hat, wird nicht abgeschätzt oder in entsprechenden Darstellungen (Spannungsverläufe oder Gesamtverzerrungen) nachvollziehbar gemacht.</i></p>
<p><i>Relevanz:</i></p>	<p>Für die Rückfalloption nur teilweise relevant.</p>
<p><i>Bewertung:</i></p>	<p>Das langfristige Tragvermögen im gefluteten Bergwerk wird neben dem Kriechprozess wesentlich durch den Innendruck (Lösungs- und Gasdruck) sowie den allmählichen Versatzdruckaufbau bestimmt. Für diese Entwicklungen sind, wie oben angeführt, Bandbreitenrechnungen geplant bzw. laufen gegenwärtig schon. Eine Aussage zum „langfristigen Tragvermögen (über Jahrtausende) des Systems inklusive möglicher weiterer Schädigungen über die Betriebsphase hinaus“ ist nur in der Tendenz bzgl. der Degressivität der Verformungsraten möglich. Mit solchen mehr qualitativen Aussagen lässt sich die Prognosesicherheit des Systemverhaltens unter dem hydrostatischen Innendruck begründen.</p> <p>Eine zukünftige Aussage zum langfristigen Konvergenzverhalten (über Jahrtausende) wird auch die Beanspruchung der Steinsalzbarriere und des Deckgebirges mit einschließen.</p> <p>Es ist richtig, dass eine „Zulässigkeit der Schließungsmaßnahmen am Ende der Betriebsphase“ nicht nur vorauszusetzen ist. Stattdessen sind deren Auswirkungen in die Nachbetriebsphase zu betrachten und hinsichtlich der Anforderungen aus der Langzeitsicherheit an die Gebirgsmechanik zu bewerten. Diesen Anforderungen hat sich der gebirgsmechanische Sachverständige zu stellen.</p>
<p><i>Arbeitsstand:</i></p>	<p>Für die geforderten Bewertungen werden gegenwärtig die Werkzeuge entwickelt.</p>
<p><i>Stand W&T:</i></p>	<p>Der Vergleich mit dem Stand von W&T bzw. die Begründung von Abweichungen sind zukünftig vorgesehen.</p>

3.1.4 Grundsätzliche kritische Hinweise zu gebirgsmechanisch relevanten Aspekten des HMGU-Schließungskonzeptes

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 21:</i>	<i>Der negativen Bewertung von Spülversatz, dem Einspülen von Salzgrus mit Schutzfluid in Resthohlräume der versetzten Abbaue, kann nicht uneingeschränkt gefolgt werden. Das Besorgen von Feuchtekriechen und Versatzsackungen gilt gleichermaßen für das planmäßige Einleiten des Schutzfluids. Ebenso kann der Einwand der nicht voraussehbaren gleichmäßigen Durchfeuchtung des Versatzes und somit einer eingeschränkten Prognosesicherheit gleichsam gegen eine Schutzfluideinleitung vorgebracht werden. Hier wäre eine fundierte Begründung der unterschiedlichen Bewertung der Folgen von Spülversatz und Schutzfluideinleitung wünschenswert.</i>
Relevanz:	Keine Relevanz für den weiteren Betrieb.
Bewertung:	<p>Statt einer Einleitung von Spülversatz in die noch offenen Firstspalte der Abbaue wird gegenwärtig die Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton umgesetzt. Auch hier bestand zunächst die Besorgnis, dass die Anmachlösung in die Pfeiler und Versatzkörper eindringen und zu einem Feuchtekriechen und einer Versatzsackung führen könnte. Diesbezügliche gebirgsmechanisch negative Auswirkungen wurden aber nicht festgestellt.</p> <p>Bei einem planmäßigen Einleiten von Schutzfluid stellen sich die gebirgsmechanischen Reaktionen im Tragsystem völlig anders dar: Das Schutzfluid steigt nach der Füllung aller auf einer Sohle zugänglichen Hohlräume (Auffahrungen, Versatzporenräume) mehr oder weniger gleichmäßig an und verursacht eine Versatzsackung (bzw. einen Festigkeitsverlust im Versatz) und ein Feuchtekriechen in den Tragelementen. Mit zunehmendem hydrostatischem Druck wirkt das Effektivspannungskonzept. Einer solchen Aktivierung des Systemverhaltens bei dem vermutlich nachrutschenden Deckgebirge sollte mit dem pneumatischen Stützdruck begegnet werden, der nur im verschlossenen Bergwerk bei mannlosem Betrieb erzeugt werden kann.</p> <p>Eine großräumige Aktivierung des Konvergenzverhaltens mit einem Spülversatz im Offenhaltungsbetrieb bei weiterer Befahrung durch die Bergleute wäre nach Auffassung des IfG, abgesehen von den technologischen Problemen, nicht verantwortbar und ist auch nicht notwendig, da bereits die Firstspaltverfüllung stattfindet.</p>
Arbeitsstand:	Wird nicht verfolgt.
Stand W&T:	Wird nicht verglichen.

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 21:</i>	<i>Der positiven Bewertung von Pumpversatz mit Sorelbeton wird gefolgt. Die durch den eingebrachten Beton bewirkte Verringerung des konvergenzaktiven Hohlraumes verbunden mit einer Stützung des Tragsystems ist entsprechend dem formulierten Sicherheitskonzept zielführend. Es fehlen bei den Ausführungen zum Pumpversatz jedoch Aussagen zu den Auswirkungen einer möglichen Kanalisierung der gas- und konvergenzbedingten Fluidströmung in der Südflanke. Da der Sorelbeton eine deutlich geringere Permeabilität als der Blasversatz und das aufgelockerte Steinsalz aufweist, haben dadurch kanalisierte Strömungswege möglicherweise bedeutsame Auswirkungen auf den Nuklidtransport in der Grube und somit auf den Langzeitsicherheitsnachweis.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Dieser Pumpversatz wird gegenwärtig als Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton umgesetzt. Eine signifikante Veränderung des hydraulischen Widerstandes wird vom IfG infolge der Firstspaltverfüllung nicht gesehen, da in der Mehrzahl der Abbaue der Schwebenkern bereits durchgebrochen ist und dort kein Sorelbeton hingelangen kann, die gebrochenen Konturen der Pfeiler einen ausreichenden Strömungsquerschnitt liefern und der Sorelbeton infolge der weiteren Deformationen im Zusammenhang mit der Konvergenz und der Versatzsackung brechen wird. Damit wird auch in den Sorelbetonkörpern selbst von einer ausreichenden Rissbildung ausgegangen. In den Rissen wird lokal die Strömung kanalisiert, was zu einer Erhöhung der Transportgeschwindigkeit bei kleinem Strömungsquerschnitt führt. Der Einfluss dieser lokalen Kanalisierung in den Rissen der Firstspaltverfüllung erscheint aber unbedeutend aufgrund der o.g. parallelen vertikalen Fließwege mit deutlich höheren Strömungsquerschnitten.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die grundsätzliche Problematik wird in einer Einzelbeauftragung des BfS zum langzeitigen mechanisch-hydraulischen Verhalten von Magnesiumdepot untersucht.
<i>Stand W&T:</i>	Wird in der Iststandsbewertung für die Auswirkungenanalyse 2015ff zur Schachtanlage Asse II analysiert.

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 21:</i>	<i>Der negativen Bewertung einer Ertüchtigung der Versatzkörper in der Südflanke durch Versatzinjektion kann derzeit nicht gefolgt werden. Die vorgebrachten negativen Effekte und Aspekte werden nicht belegt bzw. können ggf. durch modifizierte technische Ausführungen umgangen werden. So wird auch festgestellt, dass es sich lediglich um „Unwägbarkeiten“ des Verfahrens handele. Hier sind genauere Untersuchungen erforderlich. Derzeit erfolgen im Rahmen einer vom BMBF in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie zur Versatzertüchtigung auf diesem Gebiet Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind für eine endgültige Beurteilung der Ertüchtigungsmaßnahmen abzuwarten.</i>
<i>Relevanz:</i>	Wird gegenwärtig für die Rückfalloption nicht betrachtet.
<i>Bewertung:</i>	Entsprechend der Machbarkeitsstudie von CDM [16] repräsentiert die gegenwärtig realisierte Firstspaltverfüllung als Stufe 1 den Form- und Kraftschluss in den Abbauen und als Stufe 2 wird eine Verdrängungsinjektion mit Sorelbeton in die Versatzkörper (die infolge des Formschlusses nicht mehr ausweichen können) vorgeschlagen. Durch die Injektion sollten Versatzdrücke von 0,5 MPa erreicht werden. Da diese bereits jetzt in vielen Abbauen feststellbar sind und die Pfeilerstauchungsraten deutlich zurückgehen, ist nach Abschluss der Firstspaltverfüllung zu prüfen, ob der enorme Aufwand der Stufe 2 (etwa 100 Bohrungen in jeden Versatzkörper mit 40 Injektionsstellen je Bohrung) noch notwendig erscheint. Diese Prüfung muss auch den inzwischen fortgeschrittenen Schädigungszustand in den Hinterfahrungsstrecken und der Wendel sowie den erreichten Verfüllungsgrad der Strecken berücksichtigen.
<i>Arbeitsstand:</i>	Gegenwärtig wird die Firstspaltverfüllung umgesetzt, über eine nachfolgende Versatzinjektion ist noch nicht entschieden.
<i>Stand W&T:</i>	Wird nicht verglichen.

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 21:</i>	Kritische Bewertung der pneumatischen Stabilisierung während der Schutzfluideinleitung, da sie hohe Anforderungen an die technische Ausführung stellt. Insbesondere sind hier die Funktionstüchtigkeit der Kurzzeitdichtung in Schacht 4 und die nach erfolgter Einleitung des Schutzfluids erforderlichen Maßnahmen Rückbau und langzeit-sichere Abdichtung von Druck- und Rohrleitungen zu nennen. Insbesondere ist zu prüfen, wie negative Folgen eines möglichen Versagens der Druckbeaufschlagung aufgefangen werden können.
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption zu betrachten und zu klären.
<i>Bewertung:</i>	Die technische Sicherstellung der pneumatischen Druckerzeugung und der Abdichtungen muss vom Betreiber gewährleistet werden. Der gebirgsmechanische Sachverständige wird hier aber in die Entwurfs- und Ausführungsplanung der Schachtabdichtungen einbezogen sein.
<i>Arbeitsstand:</i>	Der pneumatische Stützdruck ist bei der Einleitung von MgCl ₂ -Lösung als Notfallmaßnahme beim AÜL vorgesehen. Ggf. wird in der Zukunft von dieser begleitenden Maßnahme abgesehen, das ist aber gegenwärtig noch nicht entschieden.
<i>Stand W&T:</i>	Es gibt eine Vielzahl von praktischen Belegen für die kurzzeitige Stützwirkung von Druckluft bei Baumaßnahmen im Gebirge. Als typische Beispiele sind die Druckluftaufgabe zur Stützung der Ortsbrust bei einer Tunnelbohrmaschine im wasserführenden Lockergestein oder die Verhinderung/Reduzierung von Wassereinbrüchen beim Tunnelbau in den Alpen zu nennen.

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 21:</i>	Zur Problematik des pneumatischen Stützdruckes im Bergwerk: Die Anführung von Beispielen, bei denen Gase unter Druck in Salzformationen eingeschlossen sind, kann nach Auffassung der AGO wegen der Besonderheit der vorgeschädigten Salzbarriere einen standortspezifischen Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis nicht ersetzen. Eine Übertragbarkeit der bei Gas- und Druckluftspeichern gewonnenen Erfahrungen wird vom HMGU zwar konstatiert, jedoch nicht nachgewiesen.
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption zu betrachten und zu klären.
<i>Bewertung:</i>	Das ist grundsätzlich richtig. Der standortspezifische Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis lag aber nach Kenntnis des IfG schon für das HMGU-Konzept vor und muss auch für das Notfallkonzept, falls erforderlich, erarbeitet werden.
<i>Arbeitsstand:</i>	Der standortspezifische Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis wird, falls erforderlich, geliefert.
<i>Stand W&T:</i>	Siehe oben.

<p><i>Diskussionspunkt in [20], Seite 22:</i></p>	<p><i>Hinsichtlich der Sicherstellung einer vollständigen Aufsättigung aller Grubenbereiche (ausgenommen MAW-Kammer) mit der notwendigen Menge an Schutzfluid und einer gesicherten Aufrechterhaltung eines konstanten pneumatischen Innendruckes von 1-1,5 MPa bestehen im vorliegenden Bericht Lücken. Die grundsätzliche technische Machbarkeit der mannlosen Schutzfluideinleitung und Druckluftbeaufschlagung kann zwar auf Grundlage der vorliegenden Unterlagen nicht ausgeschlossen werden, jedoch existieren ausführungstechnische Schwierigkeiten (spezifikationsgerechte Verfügbarkeit des Schutzfluides, Handling (z. B. Verstopfen von Leitungen), Vermeidung größerer Luftpolster, qualitätsgesicherte Einbringung der notwendigen Mengen) und sicherheitliche Risiken (Reaktionsmöglichkeiten bei unplanmäßigen Effekten, fehlende Redundanz, Beherrschung und Konsequenzen eines „blow-out“), die im Rahmen der Konzeptentwicklung behandelt werden müssten.</i></p> <p><i>Es bestehen Zweifel, ob die Anlieferung und Bereithaltung spezifikationsgerechter R-Lösungen in der erforderlichen Menge von 1600 m³/d und einer Temperatur von 30°C technisch darstellbar ist. Diese Lösungen müssen anschließend ohne Auskristallisation (Rohr-Verstopfer, Zukristallisation benötigter Wegsamkeiten im Versatz) an den jeweiligen Bestimmungsort im Bergwerk geleitet werden. Hierfür fehlen praktische Erfahrungen. Es stellt sich die generelle Frage, ob, wie, wie schnell und wann das Schutzfluid überhaupt die Resthohlräume, die es stützen soll, erreichen kann. Damit verbunden stellt sich die Frage, wie die Luft aus den Resthohlräumen und Porenräumen entweichen soll. Im Verhältnis zu den hohen Einleitraten für das Schutzfluid werden hier ungelöste Probleme bzw. unbeantwortete Fragen gesehen.</i></p>
<p><i>Relevanz:</i></p>	<p>Für die Rückfalloption relevant.</p>
<p><i>Bewertung:</i></p>	<p>Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass in den Versatzkörpern, in nur einseitig zugänglichen Bohrungen und Bruchstrukturen und in Hochlagen Luftpolster verbleiben. Diese Luft wird mit steigendem hydrostatischem Druck stark komprimiert und wirkt gebirgsmechanisch analog stabilisierend wie die Flüssigkeitsrandbedingung. In gebirgsmechanische Hinsicht wird zwischen den beiden Druckrandbedingungen nicht unterschieden und die Gesamtwirkung angesetzt. Der pneumatische Innendruck muss auch nicht konstant bleiben, sondern in dem Bereich von 1 bis 1,5 MPa wirken.</p> <p>In der Nachbetriebsphase wird mit der Konvergenz von einer langsamen Permeation in das Salzgebirge ausgegangen.</p> <p>Wie bereits oben ausgeführt, muss die technische Sicherstellung der Lösungseinleitung sowie der pneumatischen Druckerzeugung vom Betreiber gewährleistet werden.</p> <p>Die Problematik ist auch Bestandteil der Iststandsanalyse von AFC und GRS.</p>
<p><i>Arbeitsstand:</i></p>	<p>Der standortspezifische Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis wird, falls erforderlich, geliefert.</p>
<p><i>Stand W&T:</i></p>	<p>Die Flutung von Salzbergwerken als Verwahrungsmaßnahme ist grundsätzlich Stand von W&T.</p>

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 32:</i>	<i>Beim derzeitigen Kenntnisstand ergeben sich aus Sicht der AGO bzgl. der geomechanischen Gegebenheiten und Parameter im Deckgebirge Unklarheiten oder Unplausibilitäten.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Dieses Defizit ist bekannt und soll mittels eines Untersuchungsprogrammes im Deckgebirge behoben werden.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die Deckgebirgsbohrungen und das Untersuchungsprogramm sind geplant.
<i>Stand W&T:</i>	Das Niederbringen von Deckgebirgsbohrungen ist Stand von W&T.

<i>Diskussionspunkt in [20], Seite 33:</i>	<i>Der Nachweis der technischen Machbarkeit und Wirksamkeit der massiven Strömungsbarrieren erfolgte durch den Bau einer Pilotströmungsbarriere aus Sorel-Beton, welche nach Angaben des Betreibers die gestellten Anforderungen hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Der Nachweis der langfristigen Wirksamkeit einer solchen Barriere ist damit jedoch nicht erbracht und kann nur indirekt durch Modellrechnungen erfolgen. Auslegungsberechnungen, Nachweisführungen zur Lagestabilität der Barrieren und zur Integrität des umgebenden Gebirges und bautechnische Nachweise zur Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeit der Strömungsbarrieren liegen zur Beurteilung nicht vor.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Diese Bewertung der Nachweisführung der technischen Machbarkeit und Wirksamkeit der Strömungsbarrieren ist Gegenstand einer eigenen Iststandsbewertung des BfS zur Machbarkeit von geotechnischen Barrieren und bautechnischen Nachweisen.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die technische Machbarkeit der Strömungsbarrieren ist für konventionelle Bauwerke (Kernbarrieren mit Widerlager) belegt. Der Nachweis der Wirksamkeit wird für jede Strömungsbarriere jeweils nach deren Errichtung geliefert.
<i>Stand W&T:</i>	Die Verwendung von Magnesiabaustoffen für Stabilisierungs- und Abdichtungsmaßnahmen ist im Salzbergbau Stand von W&T.

3.1.5 Fazit der Überprüfung der Defizitanalyse aus dem Jahr 2012

In diesem Kapitel wurde die Defizitanalyse [1] aus dem Jahr 2012, die auf eine gezielte Einleitung von $MgCl_2$ -Lösung nach dem HMGU-Konzept bezogen war, dahingehend überprüft, welche Nachweismethoden und Kriterien unter den Rahmenbedingungen des jetzt gegebenen gesetzlichen Auftrages der Rückholung, unter besonderer Berücksichtigung der Rückfalloption, noch relevant sind. Die Defizitanalyse [1] beinhaltet eine Replik des IfG auf Hinweise und Einwände unterschiedlicher Autoren des BfS, der BGR und der AGO. Um die Zitate und den Kontext nachprüfen zu können, wurden die entsprechenden Seiten in den Originalunterlagen [18] bis [20] mit angegeben.

Es wurden alle inhaltlichen (fachlichen) Kritikpunkte aufgegriffen und unter dem obigen Gesichtspunkt Stellung bezogen. Dabei erfolgte eine Gliederung nach sachlichen Problembereichen. Die ebenfalls in [18] bis [20] aufgeführten formalen Kritiken, die auf eine Überarbeitung der damaligen Antragsunterlagen gerichtet waren, blieben unberücksichtigt.

Es konnte aufgezeigt werden, dass unter der Betreiberschaft des BfS bereits eine Vielzahl von Defiziten, insbesondere zu noch erforderlichen Materialparametern bzw. zur Begründung der Modellrechnungen, behoben werden konnten. Diese Nachweismethoden und Kriterien sind auch für die Auswirkungsanalyse einer Rückfalloption anwendbar.

An weiteren Defiziten, wie bzgl. der Berücksichtigung von Bandbreiten in den Prognoserechnungen, Betrachtungen der Ungewissheiten, langfristigen Bewertungen des Systemtragwiderstandes sowie dem Kenntnisstand zum Deckgebirge, wird gegenwärtig noch gearbeitet. Hinsichtlich der mechanisch-hydraulischen Langzeitbewertung der MgO -Baustoffe (Sorelbeton und Magnesiumdepot) sind Qualifizierungen und Neuentwicklungen erforderlich.

Schließlich gibt es Anmerkungen, z.B. der Wunsch nach einer Betrachtung von Spülversatz oder der Injektion der Versatzkörper, die gegenwärtig nicht verfolgt werden und auch für die Rückfalloption zunächst nicht betrachtet werden sollen. Auch die Abkehr vom sicherheitsgerichteten Element des pneumatischen Stützdruckes bei einer Einleitung von $MgCl_2$ -Lösung im Notfall (AÜL) ist zunächst nicht geplant.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass seit 2012 wesentliche Werkzeuge zur gebirgsmechanischen Bewertung des Offenhaltungsbetriebes geschaffen wurden, die auch für eine Auswirkungsanalyse der Rückfalloption verwendbar sind.

Dazu gehören

- die 3D-Modelle des westlichen Bergwerkes zur Simulation großräumiger Wechselwirkungen (Stand sicherheitsprobleme im Offenhaltungsbetrieb und Konvergenzverhalten in der Nachbetriebsphase),
- gesteinsmechanische Versuche an weiteren Steinsalzvarietäten inklusive Validierung der Materialparameter für eine numerische Simulation sowie
- gesteinsmechanische Untersuchungen des Setzungsverhaltens von Versatz bei der Flutung mit $MgCl_2$ - und Deckgebirgslösung.

Gegenwärtig haben weitere Laboruntersuchungen am Staßfurtsteinsalz und Carnallit sowie an verfestigten Versatzchargen begonnen und es ist ein Programm zur Untersuchung des langzeitigen mechanisch-hydraulischen Verhaltens von Magnesiumdepot vorgesehen.

Da in den letzten Jahren für das IfG gebirgsmechanische Standsicherheitsprobleme der Infrastrukturbereiche (Wendel, Abbaue auf den oberen Sohlen) im Fokus standen, wurden die Rechenmodelle für derartige lokale Bewertungen, die auch in der Zukunft bedeutsam sind, qualifiziert.

Weiterhin erfolgte eine ständige Fortführung des Kenntnisstandes zum mechanisch-hydraulischen Langzeitverhalten von Sorelbeton. Die Standortuntersuchungen für die Bewertung des hydraulischen Widerstandes der Strömungsbarrieren und die Befunde der Fakten-erhebung in der Nähe der Einlagerungskammern lieferten Standortkenntnisse für die Bewertung des zukünftigen Systemverhaltens.

3.2 Auswertung der ESK/SSK-Stellungnahme [2] „Notfallplanung für die Schachtanlage Asse II“

3.2.1 Ableitung von gebirgsmechanisch relevanten Handlungsempfehlungen

<i>Hinweis auf Seite 6:</i>	Bei der fallspezifischen Beurteilung eines Lösungszutritts ist grundsätzlich der <i>gebirgsmechanische Zustand des Grubengebäudes im Hinblick auf die Sickerwege der Lösung in der Auflockerungszone um die Abbaue bzw. Einlagerungskammern oder auf durch Spannungsumlagerung außerhalb dieser Bereiche entstandenen und noch entstehenden wassergängigen Trennflächen</i> zu beachten.
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Die in den Rechenmodellen des IfG ausgewiesenen Bereiche minimaler Druckeinspannungen kleiner als ein theoretisch angreifender hydrostatischer Druck (Verletzung des Fluidruckkriteriums) können für eine solche Analyse hilfreich sein. Aus dem Rechenergebnis allein sind jedoch noch keine Aussagen zu den Sickerwegen ableitbar, da auch hydrogeologisch geklärt werden muss, ob an den denkbaren Zutrittspfaden auch tatsächlich Lösungsreservoirs angeschlossen sind und welche Fließigenschaften vorherrschen.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die Rechnungen mit dem gebirgsmechanischen Modell eines halben Bergwerkes haben einen belastbaren Arbeitsstand erreicht.
<i>Stand W&T:</i>	Die Verwendung großräumiger 3D-Modelle für die Identifikation diskreter Sickerwege ist nicht Gegenstand von W&T. Die dafür erforderlichen Standortdaten liegen zudem nicht vor.

<i>Hinweis auf Seite 12:</i>	<i>Darüber hinaus sollte eine Identifizierung der für den Offenhaltungsbetrieb und die Einrichtung des späteren Rückholungsbetriebs notwendigen Infrastruktur erfolgen und dort eine regelmäßige Überwachung des gebirgsmechanischen Zustands vorgesehen werden, um sich entwickelnde Schwachstellen im Tragsystem schon frühzeitig zu erkennen und dann rechtzeitig Stabilisierungsmaßnahmen planen und umsetzen zu lassen.</i>
<i>Relevanz:</i>	Für die Rückfalloption relevant.
<i>Bewertung:</i>	Wie bereits ausgeführt, sind die 3D-Rechenmodelle für derartige lokale Bewertungen, die auch in der Zukunft bedeutsam sind, qualifiziert. Die ausgewiesenen Deformationen, Spannungszustände und Schädigungsbereiche unterstützen die Erkennung sich entwickelnder Schwachstellen im Tragsystem und die rechtzeitige Planung von Stabilisierungsmaßnahmen.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die Rechnungen mit dem Modell eines halben Bergwerkes haben einen belastbaren Arbeitsstand erreicht. Das Modell wurde bereits eingesetzt, die bergbausicherheitliche Situation in der Wendel und die geplanten Stabilisierungsmaßnahmen zu bewerten.
<i>Stand W&T:</i>	Die Verwendung von Rechenmodellen für die Interpretation von Überwachungs- und die Planung von Stabilisierungsmaßnahmen entspricht dem Stand von W&T.

3.2.2 Fazit der Auswertung der ESK/SSK-Stellungnahme

Der Beratungsauftrag in [2] bestand darin, die Planungen des BfS zur Durchführung der Notfall- und Vorsorgemaßnahmen sowie weitere vorliegende Dokumente zu diesem Thema zu prüfen unter besonderer Berücksichtigung der Bewertung der Wirksamkeit von Notfall- und Vorsorgemaßnahmen hinsichtlich der Reduzierung der potenziellen Strahlenbelastung nach einem nicht beherrschbaren Lösungszutritt. Es waren demzufolge von vornherein keine umfangreichen Hinweise zur erforderlichen Entwicklung von Methoden und Kriterien für gebirgsmechanische Bewertungen, vor allem nicht für den Fall des Verbleibs der radioaktiven Abfälle in der Anlage, zu erwarten. Aus den insgesamt 17 Empfehlungen zur Notfallplanung konnten aber zwei als wesentlich für die vorliegende Aufgabenstellung identifizierte Hinweise abgeleitet werden. Im obigen Kapitel sind diese mit der Seitenangabe in [2] angegeben.

3.3. Auswertung der BfS-Unterlagen zu den Workshops im Jahr 2012 [3]

3.3.1 Fachworkshop zum Sachstand der Rückholung

Das Ziel des Workshops im Januar 2012 bestand in der Analyse von Ungewissheiten bei der Rückholung der radioaktiven Abfälle, der Identifikation von Beschleunigungsmöglichkeiten für die Rückholung und sowie der Findung von Möglichkeiten für die konsequente Umsetzung der Beschleunigungsmöglichkeiten.

In gebirgsmechanischer Hinsicht und bezogen auf zukünftig zu bewertende Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP) wurden folgende Fragen gestellt:

- Wie wirken sich Systemveränderungen (z.B. neue Auffahrungen, Versatzentnahme) auf das Verformungsverhalten aus?
- Wie wirkt sich eine weitere Durchfeuchtung der Tragelemente auf das Gesamtsystem aus und wie kann dem begegnet werden?
- Bestehen Wechselwirkungen mit den Vorsorgemaßnahmen?

Mit diesen Fragestellungen hat sich das IfG im Rahmen bestehender Beauftragungen bereits beschäftigt. Zur Beantwortung wurde ein großräumiges 3D-Modell des westlichen Bergwerkes entwickelt, das die wesentlichen gebirgsmechanischen Wechselwirkungen im Tragsystem (Entfestigung der Pfeiler, Bruch der Schweben, Lastumlagerung auf die Baufeldränder, Versatzdruckaufbau, Stabilisierung mittels Sorelbeton) abbildet. Im Verlauf der zeitlichen und räumlichen Nachbildung können die genannten FEP untersucht werden.

3.3.2 Fachworkshop zur Beschleunigung der Rückholung

Das Ziel des Workshops im September 2012 wurde in der Identifizierung und Evaluierung aller denkbaren Beschleunigungsmöglichkeiten für den Beginn und die Durchführung der Rückholung der radioaktiven Abfälle gesehen. Beim Studium der Unterlagen konnten keine weiteren Hinweise zur Bearbeitung der hier vorliegenden Aufgabe abgeleitet werden.

3.3.3 Fachworkshop zum Strahlenschutz und zur Notfallvorsorge

Der letzte Workshop 2012 wurde vom BfS im November mit dem Ziel der Identifikation und Diskussion der möglichen Beschleunigungspotenziale, die sich aus dem Zusammenwirken zwischen den notwendigen Maßnahmen der Notfallvorsorge und den vorbereitenden Arbeiten zur Rückholung (Faktenerhebung, Erkundung für Schacht V und Infrastrukturräume) ergeben, abgehalten.

Als Vorbereitungspapier für den Workshop lag die „Konzeptskizze zur Berechnung der Auswirkungen auf die Schutzgüter Mensch und Umwelt im Falle des Verbleibs der Abfälle in der Schachanlage Asse II“ vor. In dieser Konzeptskizze wurde die hier zur Rede stehende Problematik bereits vor einem größeren Fachpublikum diskutiert und auf die Notwendigkeit einer Analyse der Konsequenzen eines Verbleibs der radioaktiven Abfälle in der Anlage, insbesondere auch im Bezug zum Atomgesetz (AtG), aus folgenden Gesichtspunkten¹ hingewiesen:

- Aufgrund der notwendigen Berücksichtigung des Störfalls AÜL in der Störfallanalyse für weitere Genehmigungsverfahren der Faktenerhebung und Rückholung sowie die Bewertungen zur Schadensvorsorge sind die potenziellen Strahlenexpositionen auf Basis möglichst realistischer Annahmen und für verschiedene Szenarien in unterschiedlichen Realisierungsstadien der Notfall- und Vorsorgemaßnahmen modelltechnisch zu ermitteln. Das bedeutet, dass gebirgsmechanische Untersuchungen zur Interpretation der Ergebnisse der Faktenerhebung, insbesondere zur Standsicherheitsanalyse der Pfeiler und Schweben, als erforderlich erachtet werden.
- Für die Bewertung der Auswirkungen einer geordneten Stilllegung bei Verbleib der Abfälle in der Anlage besteht die Notwendigkeit, die Analyse auf ein Konzept für den Verschluss der Anlage zu stützen. Hierfür können das Konzept der Vollverfüllung

¹ Auswahl gebirgsmechanisch relevanter Sachverhalte.

und, sofern Vorteile bestehen, das HMGU-Konzept als Ausgangspunkte dienen. Ggf. können die Vorteile beider Konzepte im Zuge einer Weiterentwicklung zur Rückfalloption miteinander kombiniert werden. Die Kritiken am Konzept des HMGU (Schutzfluidkonzept) sowie die Kritiken am Konzept der Vollverfüllung sind zu berücksichtigen.

- Eine den Anforderungen des AtG entsprechende Langzeitsicherheitsanalyse muss auf belastbaren Informationen basieren, die in Bezug auf die Schachtanlage Asse II derzeit nicht in ausreichendem Umfang vorliegen. Die derzeit offenen Fragen sind konkret zu formulieren. Sodann bedarf es einer Einschätzung, ob und ggf. wie belastbare Informationen hierzu erhoben werden können bzw. ob und ggf. mit welchen Annahmen gearbeitet werden kann.
- Die Abschätzungen sind gemäß den Anforderungen nach Stand von Wissenschaft und Technik durchzuführen.
- Ein wesentlicher Punkt bei der Bewertung der Langzeitsicherheit wird die fachliche Auseinandersetzung mit dem in den Sicherheitsanforderungen für ein HAW-Endlager genannten Begriff des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG²) sein. Dieser ist für die Schachtanlage Asse II bislang nicht bezeichnet und beschrieben. Die Notwendigkeit und die Machbarkeit sind zu diskutieren; ebenso die Folgen, wenn eine hinreichende Definition und Beschreibung nicht in absehbarer Zeit möglich ist.
- Der internationale Stand der Diskussion zur Vorgehensweise und Anforderungen an Sicherheitsbewertungen für Endlager und kerntechnische Anlagen sollte, sofern für die vorliegende Aufgabenstellung relevant und angemessen, als Randbedingung berücksichtigt werden.
- Neben der radiologischen Konsequenzenanalyse für die Nachbetriebsphase ist die Durchführung weiterer Sicherheitsanalysen zur Einhaltung weiterer Schutzziele zu berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere die bergbaulichen und wasserrechtlichen Schutzziele.

Die im November 2012 gegebenen Hinweise sind der hier vorgegebenen Aufgabenstellung sehr ähnlich und unterstützen diese. Die Empfehlung, dass neben dem AÜL und der damit erforderlichen Gegenflutung mit MgCl₂-Lösung auch noch andere „Realisierungsstadien der Notfall- und Vorsorgemaßnahmen modelltechnisch zu ermitteln“ sind, ist konform mit den im Kapitel 2 formulierten zu bewertenden Entwicklungen.

² Während des Workshops wurde diskutiert, ob ein ewG überhaupt begründbar definiert werden kann. Das Ergebnis war, dass die Festlegung eines ewG für den Standort der Schachtanlage Asse II nicht sinnvoll möglich ist. Stattdessen wird eine Einzelfallbetrachtung in Hinsicht auf das Wasserrecht (gehobene wasserrechtliche Erlaubnis) vorgeschlagen.

Für die Analyse der Auswirkungen des Verbleibs der Abfälle in der Anlage wurden im Vorbereitungspapier für den Workshop im November 2012 folgende Arbeitsschritte skizziert:

1. Defizitanalyse bisheriger Sicherheitsbetrachtungen und Konzeptoptimierung
2. Beschreibung und Charakterisierung der Rückfalloption, Konzeptplanung der Einzelmaßnahmen, Formulierung des Sicherheitskonzeptes für die Rückfalloption
3. Szenarienentwicklung
4. Formulierung des Konzeptes für die Sicherheitsbetrachtung und für die zugehörigen Modellrechnungen, Klärung und Festlegung von Randbedingungen und Parametern für die Modellbildung
5. Deterministische Analyse der radiologischen Konsequenzen für die Nachbetriebsphase
6. Probabilistische Unsicherheitsanalyse, Analyse der Ungewissheiten
7. Betrachtung weiterer Schutzziele (bergbaulich, wasserrechtlich, sonstige Umweltauswirkungen, Kritikalitätssicherheit, betriebliche Sicherheit)
8. Abschließende Vervollständigung und Konsistenzprüfung der Unterlagen, abschließende Bewertung

Diese Auflistung kann als Anhaltspunkt dienen, welche Arbeiten noch zum Gesamtvorhaben gehören könnten (aus Sicht des Kenntnisstandes vom November 2012), wenn die hier vorzulegende Iststandsbewertung abgearbeitet ist.

Bezüglich der für eine Auswirkungsanalyse erforderlichen Werkzeuge wurden die schon von anderen Autoren gegebenen Handlungsempfehlungen bestätigt. Es konnten keine neuen Empfehlungen identifiziert werden.

4. Auswertung der Unterlagen zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

4.1 Bewertung der Stellungnahme [4] hinsichtlich gebirgsmechanischer Relevanz für die Rückfalloption in der Schachtanlage Asse II

4.1.1 Einschussvermögen des Endlagersystems

<i>Sachverhalt und Kapitel:</i>	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) entsprechend Sicherheitskonzept des BfS: Verfüll- und Verschlussmaßnahmen zum Erhalt der noch gegebenen Funktionsfähigkeit der Salzbarriere bzw. zur ausreichenden Verringerung und Verzögerung des Zutritts von Lösungen. Kapitel 4.3.
<i>Bewertung durch ESK:</i>	Auseinandersetzung mit dem ewG-Gedanken, auch unter Berücksichtigung baulicher Maßnahmen, unbedingt erforderlich. Dazu Verwendung von Spannungsmessungen und gebirgsmechanischen Modellrechnungen. Auch wenn ewG eigentlich nur für neu zu errichtende Endlager gilt, ist der Einschuss wesentlicher Anteile der Nuklide wesentliches Element der Sicherheitsanforderungen des BMU. Szenarienbetrachtungen sollten die Belastbarkeit von Integritätsaussagen der Salzbarriere für den Nachweiszeitraum zeigen. 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. Welche Alternativen bestehen hinsichtlich einer Langzeitsicherheitsanalyse?
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Sinngemäße Übertragung auf Schachtanlage Asse II erforderlich.
<i>Arbeitsstand:</i>	Die Auseinandersetzung mit dem ewG-Gedanken ist Gegenstand einer separaten Bearbeitung.

4.1.2 Einzelaspekte der Standortcharakterisierung

<i>Sachverhalt und Kapitel:</i>	Geologischer Aufbau der Hauptstrukturelemente Salzstruktur, Hutgestein und Deckgebirge bzw. deren einschlusswirksame bzw. transporthemmen- de Barrieren. Kapitel 5.1.2.
<i>Bewertung durch ESK:</i>	Standortcharakterisierung inkl. Plausibilitätsprüfungen erforderlich. Beim Integritätsnachweis für die Salzbarriere Dilatanzkriterium und Fluiddruck- kriterium notwendig. Bei der rechnerischen gebirgsmechanischen Integritätsanalyse systemati- sche Erfassung potenzieller Schwachstellen.
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Sinngemäße Übertragung auf Schachtanlage Asse II erforderlich. In den Rechenmodellen des IfG werden Dilatanzkriterium und Fluiddruck- kriterium angewendet. Es lassen sich auch potenzielle geologische Schwachstellen untersuchen. Bei einer Verletzung des Fluiddruckkriteri- ums können aber keine Aussagen über einen potenziellen Zutrittspfad abgeleitet werden, da auch hydrogeologisch geklärt werden muss, ob an den denkbaren Zutrittspfaden auch tatsächlich Lösungsreservoirs ange- schlossen sind und welche Fließeigenschaften vorherrschen.
<i>Arbeitsstand:</i>	Der geologische Aufbau der Hauptstrukturelemente wird vom Auftragge- ber vorgegeben. Bis zur Vorlage eines neuen geologischen Modells wird mit dem vorhandenen geologischen Risswerk der Schachtanlage gearbei- tet. Die Rechnungen mit dem Modell eines halben Bergwerkes haben einen belastbaren Arbeitsstand erreicht. Der Aufbau eines Modells für das östli- che Bergwerk bzw. für das Gesamtsystem ist geplant.

4.1.3 Szenarientwicklung

<i>Sachverhalt und Kapitel:</i>	<p>Szenarien, in denen die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems im Nachweiszeitraum beschrieben werden, sind eine wesentliche Voraussetzung für den Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Diese müssen umfassend identifiziert und analysiert werden und es ist auf folgende Fragen einzugehen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ist die Szenarientwicklung systematisch und vollständig? • Sind die Rechenfälle für die aufgezeigten Szenarien abdeckend? <p>Kapitel 5.3.</p>
<i>Bewertung durch ESK:</i>	<p>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.</p>
<i>Relevanz für Schachanlage Asse II:</i>	<p>Ein umfassender FEP-Katalog mit einer darauf aufbauenden systematischen und vollständigen Szenarientwicklung sowie abdeckende Rechenfälle sind für die Schachanlage Asse II vorerst nicht vorgesehen.</p> <p>In den komplexen Rechenmodellen des IfG wurden Parameter, die versuchstechnisch zugänglich sind (z.B. gesteinsmechanisches Verhalten der Salzgesteine und Versatzarten) mit ihrem Prozessverhalten angesetzt und nicht zugängliche Parameter (Deckgebirgsmobilität, Lösungsdrücke) in Bandbreitenrechnungen (innerhalb gesteinsmechanisch bekannter und physikalisch plausibler Grenzen) bis zur Übereinstimmung des integralen Prozessverhaltens mit den In-situ-Messwerten variiert. Damit liegt ein deterministisches Modell mit einem qualifizierten Datensatz vor.</p> <p>Für die Prognose des Systemverhaltens erfolgt eine Modellfortschreibung mit Bandbreiten für Systementwicklungen (Prozessabläufe), die gegenwärtig schon auftreten bzw. noch beeinflussbar sind (unterschiedliche Varianten und zeitliche Abläufe der Firstspaltverfüllung, unterschiedliche Zeitpunkte einer Ausbreitung von Deckgebirgslösung).</p> <p>Die Umsetzung der Maßnahmen der dringend erforderlichen Verfüllung und Stabilisierung wird vorausgesetzt.</p> <p>Es erfolgt keine formale Übertragung des Standes von W&T bzgl. der Sicherheitsanalyse für ein neues Endlager, sondern stattdessen ein Expert Judgement für die Festlegung von wahrscheinlichen standort- und systembezogenen Prozessabläufen. Eine Diskussion der Konsequenzen für die Abweichung von Stand W&T wird geführt.</p>
<i>Arbeitsstand:</i>	<p>Die Berücksichtigung der potentiellen Systementwicklungen wird im „Leitfaden für die Ausarbeitung der Auswirkungsanalyse Asse 2015ff“ beschrieben.</p>

4.1.4 Unsicherheiten/Ungewissheiten

<i>Sachverhalt und Kapitel:</i>	Für die gesamte Sicherheitsanalyse (von den Standortkenntnissen bis zu den analytischen Ergebnissen) ist zu prüfen, ob die Unsicherheiten in der Langzeitsicherheitsanalyse angemessen berücksichtigt und im Ergebnis entsprechend gewürdigt werden. Kapitel 5.4.
<i>Bewertung durch ESK:</i>	Bezüglich Ungewissheiten wird eine Dokumentation empfohlen, die folgende Aspekte systematisch erfasst, bewertet und begründet: <ul style="list-style-type: none"> ➤ die der Sicherheitsanalyse zugrundeliegende Strategie im Umgang mit Ungewissheiten, ➤ der Umgang mit Ungewissheiten aus der Standortcharakterisierung, ➤ der Umgang mit Ungewissheiten aus der Modellvereinfachung, ➤ der Umgang mit Ungewissheiten aus den vereinfachten Behandlungen oder Vernachlässigungen von Prozessen sowie ➤ die Beurteilung der Analyseergebnisse im Hinblick auf die angewendete Modellbildung und Modellierung.
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Entspricht dem Stand von W&T, deshalb sinngemäße Übertragung auf Schachtanlage Asse II erforderlich. Eine systematische Analyse aller Ungewissheiten des gebirgsmechanischen Systemverhaltens und Festlegung von Konservativitäten (analog zu FEP bei einem neu zu errichtenden Endlager im Salzgestein) ist bei der Schachtanlage Asse II bei dem gegebenen Zustand aber nicht möglich.
<i>Arbeitsstand:</i>	Diese Arbeiten haben noch nicht begonnen.

4.1.5 Fazit der Stellungnahme der ESK zum „Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben“

Die Auswertung der ESK-Stellungnahme [4] war für die hier zu bearbeitende Iststandsbewertung sehr hilfreich. Die Doppelschachtanlage Marie/Bartensleben ist, wie die Schachtanlage Asse II, ein altes Salzgewinnungsbergwerk und deshalb war es aufschlussreich, welche Kritikpunkte die ESK zum Sicherheitskonzept des BfS angeführt hat. Die aufgezeigten Defizite orientierten sich im Wesentlichen an den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU ([6]) und bei der späteren Auswirkungsanalyse für die Schachtanlage Asse II sollte für den Fall des Verbleibs der radioaktiven Abfälle in der Anlage versucht werden, solche Defizite zu vermeiden oder zumindest Stellung zu beziehen.

Die Tabellen im Kapitel 4.1 wurden im Vergleich zum Kapitel 3.1 geringfügig modifiziert. Alle Hinweise der ESK sind relevant für die Rückfalloption und durch den Bezug auf [6] ist von vornherein der Stand von W&T berücksichtigt.

4.2 Bewertung der Stellungnahme [5] hinsichtlich gebirgsmechanischer Relevanz für die Rückfalloption in der Schachtanlage Asse II

Als wesentliche Aussage ließ sich aus [5] ableiten, dass bei der Stilllegung der bereits existierenden Anlage nur eingeschränkte planerische Möglichkeiten gegeben sind. Die genannten Dosiswerte in der Nachbetriebsphase mit einer effektiven Individualdosis in Höhe von 0,1 mSv im Jahr bei wahrscheinlichen und 1 mSv im Jahr bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen sind als Referenzwerte zu verstehen. Sollte ihre Einhaltung im Planfeststellungsverfahren nicht nachgewiesen werden können, so sollte vorrangig die Option gewählt werden, die sich im Ergebnis eines Optimierungsprozesses als die mit der geringsten Strahlenexposition und den geringsten radiologischen Risiken für die gegenwärtige und die zukünftigen Generationen erweist. Zu berücksichtigen sind dabei auch sonstige Auswirkungen auf den Verbrauch von Ressourcen und andere relevante gesellschaftliche Belange.

Zu den bei einer Auswirkungsanalyse für die Rückfalloption in der Schachtanlage Asse II zu verwendenden (gebirgsmechanisch relevanten) Methoden und Kriterien wurden keine Empfehlungen gefunden.

5. Auswertung der Unterlagen für ein neu zu errichtendes Endlager für radioaktive Abfälle im Salzgestein

5.1 Bewertung der Sicherheitsanforderungen des BMU [6] hinsichtlich gebirgsmechanischer Relevanz für die Rückfalloption in der Schachtanlage Asse II

Die Sicherheitsanforderungen des BMU repräsentieren eine übergeordnete Unterlage mit allgemeinen und standortunabhängigen Anforderungen an ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Es erfolgt keine Festlegung auf die Endlagerung im Salzgestein. Vom IfG wird es im Sinne der Aufgabenstellung deshalb als zielgerichteter angesehen, nicht [6] selbst, sondern die Anwendung von [6] auf die VSG „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ [7] zu analysieren. In [7] wurden FEP und Szenarien zwar für einen anderen Standort identifiziert, anhand der im Rahmen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes verwendeten Werkzeuge (Nachweismethoden, Rechenprogramme, Kriterien) lässt sich aber konkret nachvollziehen, welche Werkzeuge für eine solche Sicherheitsanalyse grundsätzlich zur Verfügung stehen müssen. Die FEP nehmen eine zentrale Stellung ein und sind das Verbindungselement zwischen den Grundlagen der Sicherheitsanalyse und der Szenarienentwicklung.

5.2 Auswertung der Berichte zur „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ [7] hinsichtlich gebirgsmechanischer Relevanz für die Rückfalloption in der Schachanlage Asse II

5.2.1 Begründung der Herangehensweise

Im Vorhaben VSG wurde zum ersten Mal in Deutschland eine vorläufige Sicherheitsanalyse für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle auf Basis der Kenntnisse an einem konkreten Standort vorgenommen. Um bei dem großen Umfang der vorliegenden Berichte einen Überblick über die innerhalb des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes verwendeten Werkzeuge zu bekommen, war es erforderlich, sich zunächst an den festgelegten FEP zu orientieren. In [7] ist ausgeführt, dass „der FEP-Katalog eine umfassende Darstellung der Merkmale enthält, die den Anfangszustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachverschlussphase am Standort Gorleben charakterisieren sowie der wesentlichen Aspekte zu den Ereignissen und Prozessen, die in einem derartigen Endlagersystem zukünftig ablaufen können. Die Beschreibungen der FEP geben den aktuellen Kenntnisstand zum jeweiligen FEP wieder und stellen den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar. Der FEP-Katalog ist das verbindende Element zwischen den Grundlagen (Standortbeschreibung, geowissenschaftliche Langzeitprognose und Abfallspezifikation), den Einlagerungs- und Verschlusskonzepten und der Systemanalyse.“ Auf der Basis des FEP-Kataloges wurde „eine begrenzte Anzahl plausibler Szenarien entwickelt, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers relevant sind und mit denen der Ungewissheit bezüglich der (...) zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems Rechnung getragen wird, und diese in Wahrscheinlichkeitsklassen eingestuft.“

Beim Studium der Unterlagen wurde die begrenzte bzw. teilweise nicht mögliche Übertragbarkeit des FEP-Kataloges vom Standort Gorleben auf die Schachanlage Asse II ersichtlich. Die (gebirgsmechanisch relevanten) Unterschiede liegen z.B. bei folgenden Tatsachen:

- Die VSG hebt auf ein neu aufzufahrendes Endlager mit einem speziell für den Anwendungszweck designten Bergwerk ab, dessen zukünftige Entwicklung nur mit Modellen prognostiziert werden kann. Die Schachanlage Asse II ist ein über 100 Jahre altes Salzgewinnungsbergwerk, dessen Systementwicklung im Wesentlichen bekannt ist.
- In einem neuen Endlager im Salzgestein werden die Hohlräume und Tragelemente nach den bergbaulichen Dimensionierungsregeln standsicher aufgefahren und nach der Einlagerung die Hohlräume wieder versetzt. Das dominierende gebirgsmechanische Verhalten wird durch schädigungsfreies Kriechen bestimmt.

Im Bergwerk Asse II war die langzeitige Standsicherheit der Tragelemente von vornherein nicht gegeben, die Abbauhohlräume blieben Jahrzehnte unversetzt und aus heutiger Sicht sind die wesentlichen gebirgsmechanischen Stabilitäts- und Integritätskriterien überschritten. Das dominierende gebirgsmechanische Merkmal sind Schädigungs- und Bruchprozesse, denen mit Verfüllungs- und Stabilisierungsmaßnahmen zu begegnen ist.

- Für die VSG ist die Modellierung der zukünftigen Entwicklung mit einer begrenzten Anzahl plausibler Szenarien sinnvoll. Die Basis bildet der FEP-Katalog und es werden wahrscheinliche FEP in einer wahrscheinlichen Ausprägung angesetzt.

Für die Schachanlage Asse II liegen bereits Modellierungen vor, die das Systemverhalten in Übereinstimmung mit den In-situ-Messwerten abbilden. Diese Modellierungen wurden in einer Vielzahl von Fallstudien durchgeführt, die zu einem Verständnis der Sensitivität des Systemverhaltens geführt haben.

- Bei der VSG wird im Rahmen der Modellierung von Ungewissheiten eine Bandbreite der Systementwicklungen ermittelt und die Sensitivität einzelner Parameter untersucht. Der Leitgedanke des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) muss bei allen Variationen erhalten bleiben.

Bei der Schachanlage Asse II ist der ewG im Verständnis der VSG nicht gegeben. Es existiert ein deterministisches Modell einer Systementwicklung mit qualifizierten Datensätzen, welches den Integritätsverlust und die wesentliche Befunde der Standortüberwachung abbilden muss. Deshalb ist die zurückliegende Systementwicklung vorgegeben und kann nicht variiert werden. Der Begriff des „ewG“, in der Verbindung mit den technischen Maßnahmen der Sorelbetonverfüllung, ist für die Schachanlage Asse II gesondert zu diskutieren und kann ggf. nur hinsichtlich eines begrenzten Rückhaltvermögens gesehen werden.

- In den komplexen Rechenmodellen des IfG wurden Parameter, die im Labor ermittelbar sind (z.B. gesteinsmechanisches Verhalten der Salzgesteine und Versatzarten) mit ihrem Prozessverhalten angesetzt und zunächst nicht bekannte Prozessabläufe (Deckgebirgsmobilität, Lösungsdrücke) in Bandbreitenrechnungen (innerhalb gesteinsmechanisch bekannter und physikalisch plausibler Grenzen) bis zur Übereinstimmung des integralen Prozessverhaltens mit den In-situ-Messwerten variiert. Die Zielstellung lag bei der Festlegung eines deterministischen Modells für die Übereinstimmung zurückliegender Systementwicklungen mit den Messwerten. Die Datensätze sind durch die Bandbreitenrechnungen gut begründet.

Eine Modellierung von Bandbreiten im zurückliegenden Systemverhalten, wie bei der VSG bzgl. der Ungewissheit zukünftiger Entwicklungen, war bei der Schachanlage Asse II nicht zielführend, da das Modellierungsziel bei der Abbildung eines vorgege-

benen (in situ gemessenen) Systemverhaltens (inkl. Deckgebirgsverschiebung, Barriereintegrität, Tagesoberflächensenkung) in der Interaktion aller Parameter (qualifizierter Datensatz) lag.

- Für Prognosen der zukünftigen gebirgsmechanischen Entwicklung sollte bei der Schachanlage Asse II die Variabilität zukünftiger Merkmale, Ereignisse und Prozesse nur auf eine stark limitierte Anzahl wahrscheinlicher Entwicklungen (z.B. Ausbreitung der Deckgebirgslösung, unterschiedliche Abläufe der Firstspaltverfüllung) bezogen werden. Eine Simulation z.B. geologischer Ungewissheiten wird aus gebirgsmechanischer Sicht als nicht zielführend angesehen. Für diese Prognose der Systementwicklung sind die gegenwärtig laufenden Maßnahmen der Notfallplanung mitbestimmend. Weitere Betrachtungen von „Ungewissheiten der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems“ sollten vom Auftraggeber vorgegeben werden bzw. ergeben sich aus der zukünftigen Systementwicklung.
- In der Schachanlage Asse II sind keine wärmeproduzierenden radioaktiven Abfälle eingelagert. Deshalb sind die darauf abhebenden FEP aus der VSG nicht anwendbar.
- Die Grundlagen der Szenarientwicklung in [7] bilden genau definierte Endlagerkonzepte (Einlagerungskammern, Streckenlagerung, Einlagerung in Bohrlöchern). In der Schachanlage Asse II existieren nur Einlagerungskammern mit nicht genau dokumentierten Einlagerungspraktiken.

Die in der VSG verwendeten FEP werden aufgrund der genannten Unterschiede ausschließlich für eine Suche nach gebirgsmechanisch relevanten Werkzeugen herangezogen. Die Anwendbarkeit der grundlegenden gebirgsmechanischen Methoden und Kriterien soll geprüft werden.

Die folgenden Kapitel heben auf ausgewählte FEP ab, die in [7] zur Umsetzung des Nachweiskonzeptes festgelegt wurden und die sich mit gebirgsmechanischen Werkzeugen sinnvoll untersuchen lassen. Diese sind in Tabelle 5.1 mit einem Pfeil gekennzeichnet. Da sich der Bezug zur Begriffswelt in [7] nicht vermeiden lässt, macht sich eine Erläuterung der verwendeten Begriffe erforderlich.

Tabelle 5.1: Wahrscheinliche FEP mit einer direkten Beeinträchtigung einer Initial-Barriere (Initial-FEP, Tabelle aus [7]).

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren ¹⁾
1.2.03.01	Erdbeben	WG, SchV, StrV
1.2.09.01	Diapirismus	WG, SchV, StrV
1.2.09.02	Subrosion	WG, SchV
1.3.04.02	Bildung kryogener Klüfte	WG
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	WG, SchV
2.1.03.03	Versagen eines Brennelement-Behälters	BEB
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV
2.1.07.01	Konvergenz	SchV, StrV
2.1.07.02	Fluiddruck	WG, SchV, StrV
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	WG, SchV, StrV
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	SchV
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	WG, SchV, StrV
2.1.09.03	Metallkorrosion	BEB
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV
2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	BEB
2.2.01.01	Auflockerungszone	SchV, StrV
2.2.02.02	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG, SchV, StrV, BEB
2.2.07.01	Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG
2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG
2.2.10.05	Thermochemische Sulfatreduktion	WG
2.2.11.01	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG

¹⁾ Im FEP-Katalog und bei der Szenarienentwicklung wurden als Initial-Barrieren das Wirtsgestein, die Streckenverschlüsse, die Schachtverschlüsse sowie die Brennelement-Behälter definiert

In der Tabelle 5.1 sind die als „wahrscheinlich“ und in der Tabelle 5.2 die als „weniger wahrscheinlich“ eingestuft FEP aufgeführt. Die Einstufung als „wahrscheinlich“ ist darauf zurückzuführen, dass die FEP entweder heutzutage bereits vorliegen, ein Merkmal des Standortes oder Endlagerkonzeptes sind, eine allgemeine physikalische Größe darstellen oder Ereignisse beschreiben, die zukünftig erwartet werden.

Tabelle 5.2: Weniger wahrscheinliche FEP (Tabelle aus [7]).

FEP-Nr.	FEP-Name
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
2.1.07.05	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
2.1.07.06	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen

Bei den vier weniger wahrscheinlichen FEP handelt es sich um Beschreibungen von fehlerhaften technischen Komponenten. Die FEP sind „weniger wahrscheinlich“, da der Einsatz eines Qualitätsmanagements bei der Erstellung dieser technischen Komponenten unterstellt wird und deshalb eine fehlerhafte technische Komponente (eigentlich) nicht auftreten sollte.

Eine Initial-Barriere ist eine Barriere, deren mögliche Funktionsbeeinträchtigung durch Prozesse oder Ereignisse ein Ansatzpunkt für die Entwicklung von Szenarien ist. In der VSG sind die Initial-Barrieren das Wirtsgestein (WG), die Streckenverschlüsse (StrV), die Schachtverschlüsse (SchV) sowie die Brennelement-Behälter (BEB). Diese Barrieren dienen dazu, den Kontakt von wässrigen Lösungen mit den eingelagerten Abfällen und die Freisetzung von volatilen Radionukliden zu verhindern, wobei ihre diesbezügliche Barrierenwirksamkeit zu Beginn der Nachverschlussphase vollständig entwickelt ist. Darin unterscheiden sich die Initial-Barrieren von den anderen Barrieren (z. B. Salzgrusversatz), die im Endlager-system zu einem späteren Zeitpunkt wirksam werden. Als Initial-FEP wird ein wahrscheinliches FEP mit einer direkten Beeinträchtigung der Funktion einer Initial-Barriere bezeichnet.

Die Ausprägung sagt aus, in welcher Intensität das jeweilige FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln. FEP können verschiedene Ausprägungen aufweisen, die als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich eingeordnet werden können oder die sich aus der

jeweils betrachteten Systementwicklung ergeben. Es handelt sich bei der Ausprägung um bedingte Wahrscheinlichkeiten, da das FEP zunächst eintreten muss.

Das Referenzszenarium beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems. Es ergibt sich unter vorher festgelegten Annahmen aus der Berücksichtigung der wahrscheinlichen FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und den FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Zugrunde gelegt wird die wahrscheinliche Ausprägung dieser FEP, die sich in der Regel aus den wahrscheinlichen Ausprägungen der kausal mit ihnen verbundenen wahrscheinlichen FEP ergibt.

5.2.2 Wahrscheinliches FEP „Erdbeben“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein, Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse
<i>Sachlage Gorleben:</i>	<p>Aus der geologischen Gesamtsituation ergeben sich keine Hinweise auf ein erhöhtes Erdbebenaufkommen, das Auswirkungen auf ein verschlossenes und verfülltes Endlager haben könnte. Auswirkungen von Erdbeben auf Salzstöcke sind unbekannt bzw. wurden anhand von geologischen Merkmalen bisher nicht nachgewiesen. Dennoch werden die Auswirkungen stärkerer Erdbeben auf das Endlagersystem geprüft. Für diese Zwecke wird eine Beeinträchtigung des Wirtsgesteins unterstellt.</p> <p>Gemäß KTA 2201 wird für den Standort Gorleben ein Bemessungserdbeben von 7,3 auf der MSK-Skala zu Grunde gelegt. Die Ausprägung von Erdbeben bezieht sich nur auf die Stärke eines Bebens.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Das Bemessungserdbeben der Stärke 7,3 MSK deckt sowohl alle tektonischen Erdbeben als auch die natürlichen Einsturzbeben im Standortbereich ab. Eine Angabe hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung kann nicht gemacht werden, so dass das Bemessungserdbeben für die Zwecke der Szenarienentwicklung die repräsentative Ausprägung darstellt.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Nach der seismischen Prognose wurde für den Standort Gorleben ein Bemessungserdbeben mit einer Intensität von 7,3 (MSK) zugrunde gelegt, welches als Basis für die Auslegung der Verschlussbauwerke, insbesondere für die Prognose der Setzung von Filterschichten und Schotterssäulen der Schachtverschlussbauwerke, diente. Die Auswirkung des Bemessungserdbebens wurde ebenfalls bei den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere untersucht.</p> <p>Im Ergebnis der hydromechanischen Berechnungen zeigte sich, dass selbst dann, wenn der Eintrittszeitpunkt des Erdbebens mit dem Zeitpunkt der maximalen Dilatanzbeanspruchung der Salzstruktur infolge der Zerfallswärme (30 Jahre nach Endlagerverschluss) zusammenfällt, die zusätzlichen dilatanten Bereiche nur bis maximal 30 m Tiefe unterhalb des Salzspiegels reichen. Eine seismische Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in einer Tiefe von über 800 m ist dagegen nicht zu erwarten.</p> <p>Geologische Befunde haben bislang keine Hinweise darauf gegeben, dass durch Erdbeben intaktes Salzgestein geschädigt wurde. Im Referenzszenarium haben daher Erdbeben keinen Einfluss auf die Barrierenfunktion des Wirtsgesteins.</p>
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>Entspricht dem Stand von W&T, deshalb sinngemäße Übertragung auf Schachtanlage Asse II erforderlich.</p> <p>Die für eine Untersuchung der gebirgsmechanischen Auswirkungen eines Bemessungserdbebens erforderlichen Werkzeuge (Rechenprogramme) sind vorhanden und wurden bereits in [15] im Rahmen der Beantragung des Schließungskonzeptes von HMGU verwendet.</p>

5.2.3 Wahrscheinliches FEP „Bildung kryogener Klüfte“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein
<i>Sachlage Gorleben:</i>	<p>Kryogene Klüfte sind vom Salzspiegel ausgehende Trennfugen im Wirtsgestein, die genetisch im Zusammenhang mit Kaltzeiten stehen und auf die damit verbundene Abkühlung und Kontraktion zurückzuführen sind.</p> <p>Obwohl die Tiefenlage der Salzstockoberfläche und die zu erwartende Abkühlung durch den Permafrost im Bereich des Salzspiegels eine zukünftige Bildung entsprechender Klüfte am Standort unwahrscheinlich erscheinen lassen, wird dieses FEP für den Salzstock Gorleben wegen der zahlreichen offenen Fragen und des bestehenden Untersuchungsbedarfs vorerst als wahrscheinlich eingestuft.</p> <p>Die Beeinträchtigung der Initial-Barriere Wirtsgestein erfolgt direkt. Bis zur erwarteten Verheilung der Klüfte ist eine Beeinträchtigung in Form von erhöhter Permeabilität zu berücksichtigen.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	<p>Die Ausprägung zielt hauptsächlich auf die Frage, ob sich kryogene Klüfte bilden oder nicht. Es ist denkbar dass sich im Salzgestein bei lang anhaltenden, extremen kaltzeitlichen Bedingungen Klüfte durch die Gesteinskontraktion bilden.</p> <p>Die Ausprägung des FEP wird über die beeinflussenden FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung sowie das FEP Wirtsgestein auf Grund von klimatisch bedingten und zeitlich beschränkten Temperaturänderungen im Gebirge bestimmt.</p>
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Im Rahmen der Integritätsanalysen für die VSG wurde die Bildung tiefwirkender „kryogener“ Kälterisse untersucht. Die Simulation einer schnellen Abkühlung der Erdoberfläche um 14,5 °C innerhalb von 100 Jahren zeigte, dass sich aufgrund der thermischen Abschirmwirkung des Deckgebirges die Temperaturänderungen nicht bis in die Salzstruktur durchpausen. Es wurden dabei keine thermomechanischen Zustände errechnet, welche die umstrittene Genese kälteinduzierter (kryogener) Risse in Salzstöcken durch kaltzeitliche Einflüsse erklären könnten.</p> <p>Eine entsprechende kaltzeitliche Abkühlung innerhalb eines kurzen Zeitraumes von wenigen tausend Jahren wird als weniger wahrscheinlich angesehen und daher im Referenzszenarium nicht berücksichtigt.</p>
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>In Anlehnung an die VSG sollten auch bei der Schachtanlage Asse II keine kryogenen Kälterisse in der Nachbetriebsphase betrachtet werden.</p>

5.2.4 Wahrscheinliches FEP „Konvergenz “ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse
<i>Sachlage Gruben:</i>	<p>Durch die Konvergenz wird der für die Speicherung von Fluiden verfügbare Hohlraum in den Grubenräumen reduziert und gleichzeitig die Permeabilität im Salzgrusversatz bzw. in den Verschlussbauwerken verringert. Die Konvergenz hat daher Auswirkungen auf den Fluiddruck in den Grubenbauen sowie auf die Spannungsverhältnisse im Gebirge und im Versatz, die wiederum die Konvergenz beeinflussen.</p> <p>Das FEP beeinträchtigt die Funktion der Initial-Barrieren „Schachtverschlüsse“ und „Streckenverschlüsse“.</p> <p>Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept ist die Konvergenz wesentlich, da sie der Motor für die Einspannung der geotechnischen Barrieren in das Gebirge und für die Kompaktion des Salzgrusversatzes ist, welcher langfristig den sicheren Verschluss der Grubenräume gewährleistet.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Unter der Ausprägung des FEP wird die Verformungsrate der Hohlraumkontur verstanden. Diese muss durch Modellrechnungen ermittelt werden. Ein wichtiger Eingangsparameter bei den Modellrechnungen sind die im Labor ermittelten Kriecheigenschaften der Salzgesteine.
<i>Resultate für VSG:</i>	Im Rahmen der VSG wurden unterschiedliche Kriechklassen sowie das verstärkte Kriechen durch die wärmeproduzierenden radioaktiven Abfälle berücksichtigt. Es existieren Interaktionen mit dem Versatzdruckaufbau und dem Innendruck bei anstehenden Fluiden (Salzlösungen, Gase). Die Verschlussbauwerke werden durch die Konvergenz höher eingespannt und abgedichtet.
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Der Konvergenzprozess ist auch für die Schachtanlage Asse II ein dominierendes Merkmal. Wie oben ausgeführt, wurden die als signifikant identifizierten Parameter „Festigkeits- und Kriechverhalten, Versatzdruckaufbau und hydraulisch-mechanische Wechselwirkungen“ in ihren maximalen Bandbreiten simuliert.

5.2.5 Wahrscheinliches FEP „Fluiddruck“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein, Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse
<i>Sachlage Gruben:</i>	<p>Der Fluiddruck ist der an einem bestimmten Referenzpunkt in einem Grubenbau herrschende Druck im Gas bzw. in der Lösung. Während der Fluiddruck in der gesamten Gasmenge praktisch konstant ist, nimmt der Fluiddruck in der Lösung durch den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule nach unten hin zu.</p> <p>Bei der erwarteten Systementwicklung sind in den Einlagerungsbereichen für wärmeentwickelnde Abfälle nur geringe Lösungsmengen (Restfeuchte im Salzgrus, Gebirgsfeuchte, Restfeuchte in den Behältern) zu unterstellen. In den Infrastrukturbereichen können aus einem Lösungsreservoir in der Leine-Folge maximal 5.100 m³ zufließen, weiterhin einige 100 m³ Deckgebirgslösungen durch die Schachtverschlüsse. In den Einlagerungsbereichen für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle werden neben der Restfeuchte im Versatz und der Gebirgsfeuchte größere Lösungsmengen mit den Abfallgebinden eingebracht.</p> <p>Der Fluiddruck wird daher vor allem durch die eingeschlossene Grubenluft und Gase durch biogene Degradation und Korrosion bestimmt.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Unter der Ausprägung des FEP wird neben dem Fluiddruck in Grubenräumen und Behältern vor allem der Porendruck im Versatz der Grubenräume verstanden.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Die Integritätsanalysen zur Simulation der Fluidodynamik im Grubengebäude ergaben, dass in einigen Rechenfällen der Gasdruck den lithostatischen Druck überschreitet, so dass nennenswerte Mengen gasförmiger Fluide ins Gebirge infiltrieren könnten. In diesem Zusammenhang kann durch eine Begrenzung des Gasdruckaufbaus durch die Minimierung der Restwassergehalte in den Abfallgebinden, insbesondere derjenigen der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, und/oder durch die Gewährleistung der Gasdichtheit der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren eine Steigerung der Robustheit der Einschlusswirksamkeit der konzipierten Endlagersysteme erzielt werden. Allerdings zeigen die Berechnungen, dass die Druckanstiegsrate gering ist, so dass aus heutiger Sicht kein sog. „Frac“ zu erwarten ist. Es besteht dennoch F&E-Bedarf bei der Modellierung der Fluidinfiltration, deren Reichweite vor allem von der Speicherfähigkeit des im Salzgebirge vorhandenen Porenraums abhängt.</p> <p>Eine Ausbildung von sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des ewG wird ausgeschlossen, so dass kein Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen möglich ist. Das ggf. im ewG vorhandene Porenwasser nimmt nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teil.</p>
<i>Relevanz für SchachanlageASSE II:</i>	Die Wechselwirkungen zwischen Fluiddruck (Gas und Lösung), Konvergenz, Spannungsänderung und Spannungsumlagerung sowie Versatzdruckaufbau werden gegenwärtig schon im Rahmen der Konvergenzberechnungen berücksichtigt. Wie bereits ausgeführt, ist die Integrität der Steinsalzbarriere aber nicht mehr gegeben und es muss von einem Austritt von Salzlösungen aus dem Bergwerk ausgegangen werden.

5.2.6 Wahrscheinliches FEP „Metallkorrosion“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Brennelement-Behälter
<i>Sachlage Gorleben:</i>	Die Herleitung einer Ausprägung der Metallkorrosion durch die vorhandene Feuchte im Versatz, der Gebirgsfeuchte und möglicherweise migrierender Lösungen im Wärmefeld der Abfälle wird für die Initial-Barriere „Brennelement-Behälter“ beschrieben. Die Metallkorrosion betrifft POLLUX- bzw. CASTOR-Behälter sowie die Brennstoffkokillen einschließlich der mechanisch schützenden Bohrlochverrohrung.
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung kann für die jeweilig verwendeten Materialien durch eine Rate, Ablauf (flächige Korrosion, Lochkorrosion, Produkte usw.) mit einem erwarteten Wert oder Wertebereich beschrieben werden.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Die Auslegung der Behälter wird so erfolgen, dass der im Regelwerk des BMU [6] geforderte Einschluss radioaktiver Aerosole sowie die Handhabbarkeit der Behälter über einen Zeitraum von bis zu 500 Jahren gewährleistet ist.</p> <p>Die begrenzt vorhandenen Lösungsmengen lassen die flächenhafte Korrosion in verhältnismäßig kurzer Zeit erliegen. Die Untersuchungsergebnisse geben z. B. für POLLUX-Außenbehälter für einen Zeitraum von 1.430 Jahren eine Eindringtiefe von 21 mm an. Die mittlere Korrosionsrate für diesen Zeitraum beträgt damit etwa 15 µm/a. Ähnliche Werte wurden bei Experimenten in der Schachtanlage Asse II ermittelt. In Laborexperimenten konnten bei hohen Temperaturen und hohen NaCl-Konzentrationen bei Gusseisen Raten für flächige Korrosion bis zu 60 µm/a festgestellt werden. Lochkorrosion wurde für Gusseisen weder in den Versuchen in der Asse noch im Labor nachgewiesen.</p> <p>Diese Ergebnisse können als Orientierung für eine Systementwicklung zu Grunde gelegt werden. Die Bandbreiten aller verwendeten Materialien müssen noch für Endlagerbedingungen im Salzstock Gorleben abgeleitet werden.</p>
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Die Gasentwicklung durch Metallkorrosion ist für die Schachtanlage Asse II relevant. Sie wird von AFC/GRS in den Druckfunktionen in der Nachbetriebsphase nach einer Flutung mit MgCl ₂ -Lösung nach einem AÜL berücksichtigt und auch dem IfG bei der Berechnung der Konvergenzverläufe vorgegeben.

5.2.7 Wahrscheinliches FEP „Auflockerungszone“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse
<i>Sachlage Gorleben:</i>	Eine Auflockerungszone (ALZ) ist ein konturnah begrenzter und geschädigter Bereich des einen Grubenraum umgebenden Gebirges, wobei dessen Schädigung und die daraus resultierende Permeabilität durch die auffahrungsbedingte Störung des Primärspannungszustandes und die damit verbundene Überschreitung der Dilatanzgrenze entstanden ist. Die Auflockerungszone kann aufgrund der Ausbildung einer (Sekundär-) Permeabilität um die Grubenbaue einen potentiellen Fließpfad für das Eindringen von Fluiden in das Endlager und einen Ausbreitungspfad für das Auspressen kontaminierter Fluide bilden. Es wird unterstellt, dass sich die Risse der Auflockerungszone während der Nachverschlussphase durch die Konvergenz dauerhaft verschließen und verheilen.
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung des FEP wird durch eine hydraulische Durchlässigkeit beschrieben, die durch Modellrechnungen bzw. für Modellrechnungen zu ermitteln ist.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Mechanische Schädigungen treten bei der Auffahrung untertägiger Hohlräume infolge der veränderten Spannungszustände im Gebirge auf. Diese sind auf einen konturnahen Saum in unmittelbarer Hohlraumumgebung beschränkt. In diesem Bereich werden rechnerisch das Dilatanz- und das Minimalspannungskriterium verletzt. Nach den Ergebnissen der geomechanischen Rechnungen in der VSG beträgt die Mächtigkeit der Auflockerungszonen maximal 3 m.</p> <p>Da sich die konturnahe Auflockerungszone nach dem konvergenzbedingten Aufkriechen des Salzgebirges auf den Salzgrusversatz infolge der wachsenden Stützwirkung des Versatzes zunehmend zurückbilden wird, handelt es sich hierbei um eine vorübergehende, d. h. reversible, mechanische Schädigung. Daher ist die Auflockerungszone nach dem Regelwerk des BMU [6] auch von der Prüfung der Dilatanzfestigkeit ausgenommen.</p> <p>Der maximal erforderliche Zeitraum zur Verheilung der Auflockerungszone beträgt je nach Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) nach derzeitigem Kenntnisstand einige 100 Jahre und wird damit innerhalb des Funktionszeitraums der Verschlussbauwerke abgeschlossen sein.</p>
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>In der Schachtanlage Asse II ist insbesondere in den Konturen der alten Abbaukammern eine intensive Bildung von Rissen und Abschalungen gegeben. Von einer Verheilung dieser Bereiche während des Offenhaltungsbetriebes und auch nach einer Flutung mit MgCl₂-Lösung wird bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand nicht ausgegangen.</p> <p>Die transportwirksame Permeabilität der Auflockerungs- und Schädigungsbereiche wird bei der Schachtanlage Asse II berücksichtigt.</p> <p>Gegenwärtig wird analysiert, ob der Stand von W&T und die vorliegenden Erkenntnisse am Standort Asse eine Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung der integralen Permeabilität dieser Zonen, einschließlich einer Verheilung, in den Modellen ermöglichen.</p>

5.2.8 Wahrscheinliches FEP „Störungen und Klüfte im Wirtsgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein
<i>Sachlage Gorbelen:</i>	<p>Klüfte sind makroskopisch sichtbare Trennfugen im Gestein, die keine oder nur sehr geringe Dislokationen an den Trennflächen aufweisen. Sie sind zu unterscheiden von Störungen, die durch eine deutliche Dislokation der an eine Störungszone angrenzenden Gesteine gekennzeichnet sind.</p> <p>Wo offene, fluiderfüllte Klüfte vorhanden sind, ist eine zumindest partielle und zeitlich befristete Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung wird bestimmt durch die Anzahl von Klüften sowie deren Eigenschaften. Dazu gehören die Öffnungsweite und der Durchtrennungsgrad, die Reichweite mit Anschluss von Reservoiren und/oder Wegsamkeiten sowie evtl. Kluffüllungen inkl. Lösungen.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Störungs- und Kluftsysteme sind in den Gesteinen der Leine-Folge oder im Übergangsbereich des z2/z3 vorhanden. Im Hauptsalz sind bislang nur Klüfte festgestellt worden, die geschlossen oder durch Sekundärminerale verheilt waren.</p> <p>Die Störungen und Klüfte im Wirtsgestein werden durch Spannungsänderungen, Spannungsumlagerungen und den Fluiddruck beeinflusst. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Wirtsgesteins ermöglichen diese Prozesse ein Entstehen neuer oder ein Aufweiten bzw. Verschließen bereits existierender Störungen und Klüfte.</p> <p>Aufgrund der Erkundungsergebnisse für die VSG wird unterstellt, dass in den für die Einlagerung vorgesehenen Gesteinen des Hauptsalzes keine größeren Störungs- und Kluftvorkommen vorliegen, die ausreichend permeabel sind um Migrationswege für Fluide darzustellen. Es kommt zu keiner Entstehung einer durchgehenden hydraulischen Wegsamkeit im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.</p> <p>Mittels Modellrechnungen konnte für die geologische Barriere eine dauerhaft intakte Barrierenmächtigkeit ausgewiesen werden, die gegenüber der erforderlichen Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von wenigen Zehner Metern eine hohe Sicherheitsreserve und damit eine deutliche Robustheit aufweist.</p>
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>In der Schachtanlage Asse II stellen sich der ewG und die geologische Barriere völlig anders dar: Ein ewG ist im Verständnis der VSG nicht gegeben und die Integrität der geologischen Barriere ist nicht mehr vorhanden.</p> <p>Inwieweit geologische Diskontinuitäten am Integritätsverlust beteiligt waren und welche hydraulischen Konsequenzen sich für das zukünftige Systemverhalten ergeben, muss noch geklärt werden. Die gebirgsmechanischen Werkzeuge für eine solche Bewertung stehen zur Verfügung und werden ständig weiterentwickelt.</p>

5.2.9 Wahrscheinliches FEP „Spannungsänderung und Spannungsumlagerung“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein, Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse, Brennelement-Behälter
<i>Sachlage Gorkleben:</i>	<p>Der Primärspannungszustand wird durch den geologischen Aufbau und die Dichte der Gebirgsschichten (inkl. Spannungsausgleich zwischen Salinar und Deckgebirge) bestimmt. Bei der Auffahrung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks werden Sekundärspannungen an der Hohlraumkontur auftreten, die zur Ausbildung einer Auflockerungszone durch dilatante Verformungen und an der Kontur zu konvergenzbedingten Verformungen führen. Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle und die resultierende Aufheizung des umgebenden Gebirges wird es zur thermischen Expansion bzw. bei der späteren Abkühlung zur Kontraktion des Gebirges kommen. Dabei werden Spannungsänderungen und Spannungsumlagerungen im Gebirge auftreten.</p> <p>Weiterhin sind während der Nachverschlussphase mögliche Beanspruchungen des Gebirges und der geotechnischen Bauwerke durch den Fluidruck zu berücksichtigen. Spannungsänderungen im Salzgebirge werden sich in Zukunft auch durch geänderte Auflasten (Gletscherüberfahung, Sedimentation, Erosion) ergeben.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung des FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung in Baumaterialien und im Wirtsgestein ist durch Modellrechnungen zu ermitteln.

Resultate für VSG: Das geologische System am Standort Gorleben (ohne Endlager) wird insgesamt als ein langzeitstabiles und gegenüber zukünftigen natürlichen Prozessen und Ereignissen robustes System eingeschätzt. Dieses erfährt jedoch durch die Auffahrung eines Bergwerkes bzw. die Einlagerung radioaktiver Abfälle einen anthropogenen Eingriff und damit eine Störung des natürlichen Systems. Die Auffahrungen von Hohlräumen, Wärmeeintrag und korrosionsbedingter Gasdruckaufbau im Salzstock führen zur Veränderung der natürlichen Spannungszustände im Gebirge, die allerdings gemessen am Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren nur in einem kurzen Zeitraum von wenigen 1.000 Jahren wirksam sind. Zusammenfassend haben die im Rahmen der Integritätsanalysen zur geologischen Barriere durchgeführten thermomechanischen Berechnungen der Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle ergeben, dass

- das Dilatanzkriterium bis in 40 m Teufe unterhalb des Salzspiegels sowie lokal am Salzspiegel und dort nur im Saumbereich verletzt ist. Dies gilt sowohl für die Variante der Strecken- als auch für die Variante der Bohrlochlagerung.
- das Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium für die Variante der Streckenlagerung vom Salzspiegel aus und an den (in situ nicht beobachteten, jedoch exemplarisch modellierten) Schichtgrenzen des Streifen-, Knäuel- und Kristallbrockensalzes entlang bis in 90 m bzw. 150 m Teufe (je nach Berechnungsprogramm) verletzt wird. Für die Variante der Bohrlochlagerung erhöht sich der Bereich der Verletzung des Minimalspannungskriteriums auf 120 m bzw. 210 m Teufe (je nach Berechnungsprogramm). Damit reicht die Verletzung des Minimalspannungskriteriums für die Variante der Bohrlochlagerung ca. 30 bis 60 m tiefer in den Salzstock als im Fall der Streckenlagerung. Zusätzlich ist das Dilatanzkriterium am Salzspiegel ausgeprägter verletzt.
- das Minimalspannungskriterium lokal am zerblockten Anhydrit verletzt ist.

Auf der Grundlage der Ergebnisse thermomechanischer Auslegungsrechnungen konnten die Beladung der Behälter und der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher sowie die Strecken- bzw. Bohrlochabstände so gewählt werden, dass

- die auslegungsbestimmende Maximaltemperatur von 200 °C an den Grenzflächen des Salzes zu den Behältern an jeder Stelle des konzipierten Endlagerbergwerkes eingehalten wird,
- die Schmelztemperatur von Carnallit deutlich unterschritten wird und
- die errechneten Temperaturerhöhungen an den Schacht- und Streckenverschlüssen deutlich unter dem gemäß ihrer Auslegung maximal zulässigen Temperaturanstieg von 35° K liegen.

Daraus ergibt sich (unabhängig von einer wahrscheinlichen Verheilung der Auflockerungszone), dass oberhalb des konzipierten Einlagerungshorizonts ein großer Bereich besteht, in dem keine thermomechanische Schädigung erfolgt. Seine Ausdehnung beträgt in vertikaler Richtung ca. 370 m (Streckenlagerung) bzw. 310 m (Bohrlochlagerung). Eine nachhaltige temperaturinduzierte Beeinträchtigung der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Verschlussbauwerke ist damit nicht zu erwarten.

*Relevanz für
Schachtanlage
Asse II:*

Auch bezüglich der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung stellt sich in der Schachtanlage Asse II die Situation völlig anders dar: Es existiert zwar kein Temperatureintrag, jedoch ist es in der langen Standzeit des Bergwerkes (über Jahrzehnte ohne stützenden Versatz) zu permanenten Spannungsausgleichsprozessen von sich entfestigenden und brechenden Tragelementen auf noch intakte Bergfesten und schließlich auf das benachbarte Neben- und Deckgebirge gekommen. Die Berücksichtigung dieser lokalen und großräumigen Spannungsänderungen war und ist ein Schwerpunkt der laufenden gebirgsmechanischen Systembewertung. Die gebirgsmechanischen Werkzeuge für eine solche Bewertung stehen zur Verfügung und werden ständig weiterentwickelt.

Aus den Spannungszuständen werden gleichfalls die Randbedingungen für die Bewertung der mechanischen Funktionalität und des hydraulischen Widerstandes von Abdichtbauwerken abgeleitet.

Die Spannungsumlagerungen infolge der Wechselwirkungen zwischen sich entfestigenden und deformierenden Tragelementen, Versatzdruckaufbau und Fluiddruck (Gas und Lösung) werden gegenwärtig im Rahmen der Konvergenzberechnungen für AFC/GRS berücksichtigt.

Die für eine Untersuchung der gebirgsmechanischen Auswirkungen einer erhöhten Auflast durch Gletscherüberfahung erforderlichen Methoden und Rechenprogramme sind gleichfalls vorhanden und wurden bereits in [15] im Rahmen der Beantragung des Schließungskonzeptes von HMGU verwendet.

5.2.10 Wahrscheinliches FEP „Fluidvorkommen im Wirtsgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein
<i>Sachlage Gorkleben:</i>	<p>Fluide sind natürlich vorkommende Bestandteile eines salinaren Wirtsgesteins. Bei der Bildung von Evaporit-Mineralen werden Fluide in Abhängigkeit von der Kristallisationsgeschwindigkeit und den Sedimentations- bzw. Diagenesebedingungen in die Minerale selbst eingebaut sowie an den Korngrenzen bzw. in den Porenräumen oder in Klüften gespeichert.</p> <p>Wo vernetzte Fluidvorkommen vorhanden sind, ist eine zumindest partielle Durchströmbarkeit des Wirtsgesteins möglich. Im Einlagerungsbereich des Hauptsalzes sind nur geringe Vorkommen im Wesentlichen als intra- und interkristalline Einschlüsse (Gebirgsfeuchte) vorhanden. Da die Fluidvorkommen unter dem Einfluss der wärmeerzeugenden Abfälle u. U. mobilisiert werden, ergibt sich über die Korrosion eine indirekte Einwirkung auf die Barriere Brennelementbehälter.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung bezieht sich vor allem auf die Mengen der vorhandenen Fluide. Auch der Chemismus ist für bestimmte Fragestellungen wichtig. Die Ausprägung wird im Wesentlichen durch die im Wirtsgestein vorliegende Geometrie permeabler Störungen und Klüfte gesteuert.
<i>Resultate für VSG:</i>	Da im Hauptsalz bislang nur geringe Fluidmengen festgestellt worden sind, konnten in der Unterlage [7] keine umfangreicheren Untersuchungen gefunden werden.
<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	Es ist weder zielführend noch sinnvoll, dieses FEP bei einem Bergwerk zu berücksichtigen, welches zum einen durch einen Lösungszufluss aus dem Deckgebirge gekennzeichnet ist und zum anderen in jedem Fall durch eine geeignete Flutung verwahrt werden wird. Ein trockener Einschluss der Abfälle, wie bei der VSG, ist für die Schachtanlage Asse II nicht anzusetzen.

5.2.11 Wahrscheinliches FEP „Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein“ mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere

<i>Beeinträchtigte Initial-Barrieren:</i>	Wirtsgestein
<i>Sachlage Gorleben:</i>	<p>Steinsalz ist aufgrund seiner geringen Permeabilität ($< 10^{-22} \text{ m}^2$) für Fluide dicht. Dennoch wird für die wahrscheinliche Entwicklung erwartet, dass die Gasmengen und die Gasbildungsrate nicht zu einem Gasdruck führen werden, der über dem Gebirgsdruck liegt. Sollte der Gasdruck über den Gebirgsdruck steigen, wird es zu einer Erhöhung der lokalen Permeabilität des Salzgesteins kommen, so dass die gebildeten Gase in das Salzgestein abfließen und hier gespeichert werden. Die Permeabilitätserhöhung des Steinsalzes ist abhängig von der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge und kann mehrere Größenordnungen umfassen. Das Steinsalz wird durch den Gasfluss nicht geschädigt, solange der Gasdruck nicht die hydraulische Aufreißfestigkeit (2 – 4 MPa) übersteigt. Sinkt der Gasdruck wieder unter den Gebirgsdruck, so wird die ursprüngliche Gaspermeabilität des ungestörten Steinsalzes wieder hergestellt.</p> <p>Dieses FEP ist vor allem in den Endlagerbereichen relevant, in denen eine sehr rasche und intensive Gasbildung erwartet wird. Dies sind im Endlagerkonzept Gorleben die Einlagerungsbereiche für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle. Für die Einlagerungsbereiche mit wärmeentwickelnden Abfällen wird keine entsprechende Gasbildung erwartet.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	Die Ausprägung des FEP „Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein“ ergibt sich aus der Differenz zwischen Gasdruck und minimaler Hauptspannung im Gebirge. Die Intensität der Gasbildung ist durch Modellrechnungen zu ermitteln.
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Wie bereits bzgl. des FEP „Fluiddruck“ ausgeführt, besteht bei der Besorgnis des Gasabflusses in das Salzgestein die Möglichkeit, durch eine Begrenzung des Gasdruckaufbaus durch die Minimierung der Restwassergehalte in den Abfallgebänden, insbesondere derjenigen der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, und/oder durch die Gewährleistung der Gasdichtheit der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren dieses Szenario zu vermeiden. Weiterhin zeigen die Berechnungen, dass die Druckanstiegsrate so gering ist, so dass aus heutiger Sicht kein sog. „Frac“ zu erwarten ist.</p> <p>Es besteht dennoch F&E-Bedarf bei der Modellierung der Fluidinfiltration, deren Reichweite vor allem von der Speicherfähigkeit des im Salzgebirge vorhandenen Porenraums abhängt.</p>

<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>Eine „Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein“ wird gegenwärtig bereits abschätzend berücksichtigt in den Grubenkonturbereichen mit einer Überschreitung des Dilatanz- und Fluiddruckkriteriums im Zusammenhang mit einer Einleitung von MgCl₂-Lösung. Die Methode ist in [15] beschrieben.</p> <p>Der oben genannte F&E-Bedarf bei der Modellierung einer weiter reichenden Fluidinfiltration wird auch für die hier zu bearbeitende Aufgabe gesehen, ggf. können Erkenntnisse aus anderen Arbeiten übertragen werden.</p> <p>Wie bereits ausgeführt, ist die Integrität der Steinsalzbarriere aber nicht mehr gegeben und es muss von einem Austritt von Salzlösungen aus dem Bergwerk ausgegangen werden.</p>
--	--

5.2.12 Weniger wahrscheinliches FEP „Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen“

<i>Sachlage Gorleben:</i>	<p>Erkundungsbohrungen sind, wie die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, anthropogene Eingriffe in das Wirtsgestein oder das Deck- und Nebengebirge. Sofern sie mit dem Grubengebäude des Endlagers direkt verbunden sind, werden sie als Teil des Grubengebäudes betrachtet, obwohl sie beispielsweise wegen ihres sofortigen Verschlusses bei der Berechnung der Hohlraumvolumina nicht berücksichtigt werden.</p> <p>Es werden vier verschiedene Typen von Erkundungsbohrungen mit unterschiedlicher Zielsetzung berücksichtigt. Von über Tage erfolgten in Gorleben hydrogeologische Bohrungen, Salzspiegelbohrungen und Tiefbohrungen zur Charakterisierung des Deck- und Nebengebirges sowie zu einer ersten Übersicht über den Aufbau des Salzstocks. Von unter Tage werden Erkundungsbohrungen gestoßen, um detaillierte Informationen über den Internbau des Salzstocks zu liefern.</p> <p>Alle Erkundungsbohrungen werden in der Nachverschlussphase als anforderungsgerecht verfüllt angesehen.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	<p>Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität einer Wegsamkeit in einer Erkundungsbohrung sowie auf den Zeitpunkt der Entstehung.</p>
<i>Resultate für VSG:</i>	<p>Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen wurden als Alternativszenarien für 3 Fälle betrachtet:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bohrungen zwischen der Erkundungs- und Einlagerungssohle, - Erkundungsbohrungen von der Einlagerungssohle bis in Gebirgsbereiche, für die bereits der Sicherheitsabstand zwischen Grubengebäude und den potenziell wasserführenden Schichten gilt und - Erkundungsbohrungen, die zwei Grubenbaue miteinander verbinden. <p>Die Relevanz der Szenarien wurde unterschiedlich bewertet, konkrete Rechenergebnisse konnten nicht gefunden werden. Generell wurde aber die Aussage getroffen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleibt und dass das auch für die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen (Alternativszenarien) zutrifft.</p>

<i>Relevanz für Schachtanlage Asse II:</i>	<p>Im Rahmen der Vorsorgemaßnahmen werden in der Schachtanlage Asse II gegenwärtig eine Vielzahl von Erkundungsbohrungen entsprechend eines QM-Systems hochwertig verfüllt. Trotzdem sind aufgrund des gebirgsmechanischen Schädigungszustandes im bestehenden Grubengebäude transportwirksame Wegsamkeiten nicht auszuschließen. Diesem Umstand wird im Strukturmodell Rechnung getragen, in dem ein advektiver Lösungstransport in der Nachbetriebsphase (nach einer $MgCl_2$-Lösungseinleitung) auf der Basis von <u>Permeabilitätskontrasten</u> simuliert wird. Aufgrund eines relativ geringen hydraulischen Widerstandes in den gebrächen bzw. porösen Modellbereichen (z.B. Schwebenkerne, Versatz) ist der hydraulische Fluss dort und nicht zwischen den Modellbereichen lokalisiert.</p>
--	--

5.2.13 Weniger wahrscheinliches FEP „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“

<i>Sachlage Gorbelen:</i>	<p>Die Schachtverschlüsse sind für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt. Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse ist weniger wahrscheinlich. Obwohl ein Schachtverschluss mehrere Dichtelemente enthält, bezieht sich das vorzeitige Versagen auf das Gesamtsystem aus Dichtelementen, Widerlagern, usw.</p> <p>Eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren bedeutet, dass die Durchlässigkeit jedes Schachtverschlusses über diese Zeit gering ist. Als integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerkes wird ein zeitlich konstanter Wert angenommen, der sich aus den Werten für die einzelnen Dichtelemente eines Schachtverschlusses, jeweils inklusive der Kontaktzone und der Auflockerungszone, ergibt.</p> <p>Das vorzeitige Versagen eines Schachtverschlusses wird in mehreren weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Das sind z. B. Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen oder weniger wahrscheinliche Ausprägungen von FEP, die zu einer Alteration des Schachtverschlusses führen.</p>
<i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i>	<p>Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität des Schachtverschlusses sowie auf den Zeitpunkt des vorzeitigen Versagens.</p>

Resultate für VSG: Im ungünstigsten Fall werden durch die FEP alle Dichtelemente eines Schachtverschlusses gleichzeitig beeinträchtigt. Dies würde zu einem starken Anstieg der integralen Durchlässigkeit führen, wird aber hier als unwahrscheinlich ausgeschlossen. Der weniger wahrscheinliche Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der Dichtelemente vorzeitig versagt und dadurch andere Dichtelemente beeinträchtigt werden, z. B. wenn die Bentonit-Dichtung versagt und dadurch Deckgebirgslösung eher an den tiefer gelegenen Dichtelementen aus Salz- und Sorelbeton ansteht und diese schneller korrodieren. Die integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerks (bestehend aus den drei Dichtelementen) wird dann zwar erhöht sein, aber nicht so stark wie bei einem gleichzeitigen Versagen aller Dichtelemente.

Das vorzeitige Versagen kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt zwischen dem Beginn der Nachbetriebsphase und dem betrachteten Ende der Funktionsdauer nach 50.000 Jahren liegen. Die größten Konsequenzen sind bei einem frühen vorzeitigen Versagen anzunehmen, d. h. zum Beginn der Nachbetriebsphase. In diesem Fall gelangen die Lösungen wegen des schnelleren Zufließens und der zu diesem Zeitpunkt noch größeren Porenvolumina nach einem Versagen weiter in das Grubengebäude hinein. Spätere Zeitpunkte des vorzeitigen Versagens sind jedoch nicht ausgeschlossen, z. B. nach einer Schädigung durch Diapirismus. Da jedoch die Auswirkungen in diesem Fall anders sein können als bei frühem Versagen (z. B. aufgrund des Aufbaus von Gaspolstern im Grubengebäude), ist auch eine Variante zu betrachten, bei der der Schachtverschluss spät, aber vor dem Ende der betrachteten Funktionsdauer, versagt.

Durch die Rechnungen zur Auslegung der Verschlussbauwerke bzw. die Integritätsanalysen konnte gezeigt werden, dass Integrität und Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie der Verfüllung (Salzgrusversatz) erhalten bleiben. Das Verschlusskonzept ist in Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG so ausgelegt, dass sofort wirksame Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse) den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barriere (Salzgrusversatz) noch nicht gegeben ist.

Relevanz für Schachtanlage Asse II:

Für das HMGU-Schließungskonzept wurden bereits Verschlusskonzepte für die Schächte 2 und 4 entwickelt. Diese sind angesichts der geänderten Randbedingungen (langer Offenhaltungsbetrieb, Rückholungsplanung, Notfallplanung) zu überarbeiten.

Im Rahmen der hier vorliegenden Aufgabenstellung (Entwicklung von Werkzeugen für eine Bewertung der Auswirkungen der Rückfalloption) sind die Konzepte dem Stand von W&T anzupassen und zu überarbeiten. Eine Auswirkungsbetrachtung des technischen Versagens der Schachtverschlüsse, jedoch zur VSG modifiziert (z.B. hinsichtlich der Nachweiszeiträume), muss mit eingeschlossen sein.

5.2.14 Weniger wahrscheinliches FEP „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“

<p><i>Sachlage</i> <i>Gorleben:</i></p>	<p>Die Streckenverschlüsse sind gleichfalls für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt. Ein vorzeitiges Versagen dieser Verschlüsse ist weniger wahrscheinlich.</p> <p>Obwohl ein Streckenverschluss zwei Dichtelemente enthält, bezieht sich das vorzeitige Versagen auf das Gesamtsystem aus den beiden Dichtelementen und den Widerlagern.</p> <p>Da die Streckenverschlüsse für eine Funktionsdauer von 50.000 Jahren ausgelegt sind, ist zu erwarten, dass die Durchlässigkeit jedes Streckenverschlusses über diese Zeit gering ist. Als integrale Permeabilität eines gesamten Verschlussbauwerkes wird ein zeitlich konstanter Wert angenommen, der aus den Werten für die einzelnen Dichtelemente, jeweils inklusive Kontaktzone und Auflockerungszone, eines Streckenverschlusses abgeschätzt werden kann.</p> <p>Das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses wird in mehreren weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Dies sind z. B. Alternativen zu den für das Referenzszenarium getroffenen spezifischen Annahmen oder weniger wahrscheinliche Ausprägungen von FEP, die zu einer Alteration des Streckenverschlusses führen.</p>
<p><i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i></p>	<p>Die Ausprägung bezieht sich auf die integrale Permeabilität des Streckenverschlusses sowie auf den Zeitpunkt des vorzeitigen Versagens.</p>

Resultate für VSG: Im ungünstigsten Fall werden durch die FEP beide Dichtelemente eines Streckenverschlusses gleichzeitig beeinträchtigt. Dies würde zu einem starken Anstieg der integralen Durchlässigkeit führen, wird aber in der VSG als unwahrscheinlich ausgeschlossen. Der weniger wahrscheinliche Fall ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der Dichtelemente vorzeitig versagt und dadurch das andere Dichtelement beeinträchtigt wird, z. B. wenn das zweite Dichtelement schneller korrodiert. Die integrale Permeabilität des gesamten Verschlussbauwerks (bestehend aus den beiden Dichtelementen und den Widerlagern) wird dann zwar erhöht sein, aber nicht so stark wie bei einem gleichzeitigen Versagen beider Dichtelemente.

Das vorzeitige Versagen kann zu jedem beliebigen Zeitpunkt zwischen dem Beginn der Nachbetriebsphase und dem Ende der Funktionsdauer nach 50.000 Jahren liegen. Die größten Konsequenzen sind bei einem frühen Zeitpunkt des vorzeitigen Versagens anzunehmen, d. h. zum Beginn der Nachbetriebsphase. In diesem Fall gelangen die Lösungen wegen des schnelleren Zufließens und der zu diesem Zeitpunkt noch größeren Porenvolumina nach einem Versagen weiter in das Grubengebäude hinein. Spätere Zeitpunkte des vorzeitigen Versagens sind jedoch nicht ausgeschlossen, z. B. nach einer Schädigung durch Diapirismus.

Die geotechnischen Verschlussysteme wurden räumlich so angeordnet und technisch so ausgelegt, dass die durch die Wärmeentwicklung ausgelösten Prozesse die Verschlussbauwerke nicht gefährden. Die diesbezüglichen thermo-mechanischen Nachweise wurden geführt.

Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke wurden sämtliche Lastfälle betrachtet, die aus heutiger Sicht im Funktionszeitraum von 50.000 Jahren zu mechanischen Beanspruchungszuständen oder einer chemischen Beeinträchtigung (Alterungsbeständigkeit) der Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke führen könnten. Mittels der ingenieurtechnischen Nachweise ist eine hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit der in den Funktionselementen der Abdichtbauwerke enthaltenen Baustoffe für den Funktionszeitraum belegt.

*Relevanz für
Schachtanlage
Asse II:*

In der Schachtanlage Asse II werden seit einigen Jahren Streckenverschlüsse errichtet.

Dies sind zum einen die Strömungsbarrieren. Die Zielstellung der Strömungsbarrieren besteht in einer Separierung von Grubenfeldbereichen zum Zweck der Strömungslenkung in der Nachbetriebsphase nach einer Lösungseinleitung gemäß dem Struktur-/Strömungsmodell von AFC/GRS.

Zum anderen laufen neben dem Bau von Strömungsbarrieren im Rahmen der Vorsorgemaßnahmen auch sonstige Hohlräumverfüllungen zur Resthohlräumverfüllung und als stützender Versatz.

Die Bewertung der Nachweisführung der technischen Machbarkeit und Wirksamkeit all dieser Verfüllmaßnahmen ist Gegenstand einer eigenen Iststandsbewertung des BfS zur Machbarkeit von geotechnischen Barrieren und bautechnischen Nachweisen.

Davon abgesehen ist eine methodische Übertragung aus der VSG mit der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung des Versagens von Dichtelementen und einem folgenden Zufluss in Zeiträumen bis 50.000 Jahren der Standortsituation mit dem gebirgsmechanischen Schädigungszustand und den daraus folgenden Notfallplanungen nicht angemessen. Vielmehr ist die Simulation advektiver Lösungstransporte in der Nachbetriebsphase (nach einer $MgCl_2$ -Lösungseinleitung) mit dem Ziel einer möglichst hohen und zeitlich andauernden Rückhaltung der Radionuklide zielführend.

Thermo-mechanische Nachweise aufgrund von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sind für Asse II ohnehin nicht zu führen.

5.2.15 Weniger wahrscheinliches FEP „Kanalisation in Dichtelementen“

<p><i>Sachlage Gorleben:</i></p>	<p>Unter Kanalisation wird die Ausbildung von Fließwegen in den Dichtelementen der Schacht- und Streckenverschlüsse verstanden, in denen sich ein strömendes Medium gegenüber seiner Umgebung bevorzugt ausbreiten kann. Auch Kanäle in der Kontaktzone zwischen dem Baukörper und dem umgebenden Gestein werden in diesem FEP berücksichtigt. Zu der Ausbildung von Kanälen kann es in einem Baumaterial (inklusive der Kontaktzone) kommen, wenn beim lagenweisen Einbringen des Materials die verschiedenen Lagen nicht vollständig verbunden werden oder wenn es z. B. zu einem ungleichmäßigen Aufsättigen und Quellen von Bentonit kommt. Die Bildung von Strömungskanälen in geotechnischen Barrieren ist in verschiedenen Forschungsvorhaben untersucht worden.</p> <p>Eine Kanalisation kann durch Abweichung von als wahrscheinlich angesehenen Bedingungen entstehen. Dies können Abweichungen im Verschlussmaterial oder in den Verschlüssen selbst sein, die die Wahrscheinlichkeit des Entstehens von Kanälen beeinflussen. Durch die Alteration der Verschlüsse, bzw. der Dichtelemente in den Verschlüssen können Kanäle entstehen. Die Kanalbildung wird durch den Fluiddruck und Strömungsvorgänge im Grubengebäude beeinflusst, deren Ausprägung aber erst in Modellrechnungen ermittelt werden kann. Die Lageverschiebung des Schachtverschlusses und die Auflockerungszone beeinflussen die Kontaktzone zwischen dem Dichtbauwerk und dem angrenzenden Gestein und können an dieser Stelle zur Kanalisation beitragen.</p>
<p><i>Wahrscheinlichkeit der Ausprägung:</i></p>	<p>Die Ausprägung bezieht sich auf die Permeabilität der entstehenden Kanäle.</p>
<p><i>Resultate für VSG:</i></p>	<p>Wie bereits zum FEP „Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses“ ausgeführt, konnte in der VSG durch die Rechnungen zur Auslegung der Verschlussbauwerke bzw. die Integritätsanalysen gezeigt werden, dass Integrität und Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie der Verfüllung (Salzgrusversatz) erhalten bleiben. Das Verschlusskonzept ist in Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG so ausgelegt, dass sofort wirksame Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse) den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barriere (Salzgrusversatz) noch nicht gegeben ist.</p>
<p><i>Relevanz für Schachanlage Asse II:</i></p>	<p>Wie oben zum FEP „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ mitgeteilt, ist die Bewertung der Nachweisführung der technischen Machbarkeit und Wirksamkeit der Dichtelemente, in diesem Fall Strömungsbarrieren, Gegenstand einer eigenen Iststandsbewertung des BfS zur Machbarkeit von geotechnischen Barrieren und bautechnischen Nachweisen.</p> <p>Eine methodische Übertragung aus der VSG mit der Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Entstehung von Kanalisationen ist nicht zielführend. Die Möglichkeit eines erfolgreichen Nachweises der Langzeitbeständigkeit des Sorelbetons wurde aktuell in [17] bestätigt.</p>

5.2.16 Fazit der Auswertung der Berichte zur „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“

In den vorangegangenen Kapiteln wurden aus [7] wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche FEP aufgelistet, die im Rahmen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salzgestein am Standort Gorleben hinsichtlich ihres Einflusses auf die Integrität der geologischen und technischen Barrieren untersucht wurden. Nach der Diskussion der Sachlage am Standort Gorleben, inklusive Wahrscheinlichkeit der Ausprägung des FEP, erfolgte eine Ergebnisdarstellung für die VSG und es wurde geprüft, ob sich die verwendeten gebirgsmechanischen Werkzeuge sinnvoll auf die Schachtanlage Asse II übertragen lassen. Die Aufgabenstellung bestand ausdrücklich nicht darin, das Sicherheits- und Nachweiskonzept methodisch von der VSG auf die Schachtanlage Asse II zu übertragen, sondern lediglich die Anwendbarkeit der grundlegenden gebirgsmechanischen Methoden, Kriterien und Rechenprogramme zu bewerten.

Aufgrund der völlig anderen Standortsituationen (siehe Kapitel 5.2.1) lassen sich einige FEP nicht auf die Schachtanlage Asse II übertragen, während andere FEP zum Teil oder vollständig berücksichtigt werden sollten. Durch die Arbeit des IfG zur gebirgsmechanischen Bewertung der Schachtanlage und für die Erstellung des Schließungskonzeptes im Auftrag von HMGU sowie die laufende Bewertung des Offenhaltungsbetriebes im Auftrag des BfS sind bereits Werkzeuge vorhanden, die sich für eine Auswirkungsanalyse bei Nichtrückholung der radioaktiven Abfälle und dem Übergang zur Rückfalloption verwenden lassen. Als noch erforderliche Weiterentwicklungen wurden identifiziert³:

- Untersuchung des Versatzdruckaufbaus für kleine Porositäten/Permeabilitäten und Implementierung der physikalischen Wechselwirkungen in gebirgsmechanische Stoffmodelle. Berücksichtigung des Lösungsinndruckes im Kompaktionsverlauf.
- Weitere Arbeiten zur erreichbaren Restporosität des kompaktierten Salzgrusversatzes sowie den hydraulischen Eigenschaften des Salzgrusversatzes nach Erreichen einer geringen Porosität.
- Identifizierung des ewG für die Schachtanlage Asse II (ist das überhaupt möglich bzw. mit welchen Abstrichen im Vergleich zur VSG?)
- Besseres Verständnis bzw. Modellweiterentwicklung der Fluidinfiltration in das Salzgestein (druckgetriebene Perkolation). Begründung der Reichweite von Fluiden in der Barriere sowie der Speicherfähigkeit im Porenraum.

³ Diese Verfahren, Modelle und Werkzeuge müssen nicht speziell für die Schachtanlage Asse II entwickelt, sondern können auch aus bereits laufenden Nachweiskonzepten bzw. zukünftigen FuE-Arbeiten übertragen werden.

- Untersuchung der Möglichkeit von langzeitigen Verheilungseffekten in der Steinsalzbarriere in Richtung Neben- und Deckgebirge.
- Überarbeitung des Schachtverschlusskonzeptes für die Schachtanlage Asse II.

5.3 Bewertung der „Specific Safety Requirements No. SSR-5“ hinsichtlich gebirgsmechanischer Relevanz für die Rückfalloption in der Schachtanlage Asse II

Die speziellen Sicherheitsanforderungen der Internationalen Atomenergieorganisation [8] repräsentieren, vergleichbar zu den Sicherheitsanforderungen des BMU [6], eine übergeordnete Unterlage mit allgemeinen und standortunabhängigen Sicherheitsanforderungen. Sie heben ab auf die Sicherheitsprinzipien zur Isolation aller Arten radioaktiver Abfälle in Depo-nien, Gräben, Silos, Kavernen, Tunneln, Bohrlöchern und schließlich auch in Bergwerken. Es werden in sehr allgemeiner Form 25 Handlungshinweise bzw. -anforderungen (Requirements) für die Exekutive, Legislative und Jurisdikative zum Schutz der Menschen und der Umwelt gegeben. Die konkrete Ausgestaltung soll dann von der Lagerungsform der radioaktiven Abfälle und den geowissenschaftlichen, technischen, politischen und sozialen Bedingungen abhängen. Das Papier besitzt den Charakter eines übergeordneten Leitfadens und legt Wert auf eine allgemein anwendbare und übertragbare Begrifflichkeit.

Aus diesen Attributen lässt sich ableiten, dass von vornherein nicht erwartet werden konnte, Werkzeuge für die Führung einer Auswirkungsanalyse hinsichtlich der Rückfalloption für die Schachtanlage Asse II identifizieren zu können. Der einzige für die hier vorliegende Problematik relevante Absatz soll im Original wiedergegeben werden:

“Disposal facilities that were not constructed to present safety standards may not meet all the safety requirements established in this Safety Requirements publication. In assessing the safety of such facilities, there may be indications that safety criteria will not be met. In such circumstances, reasonably practicable measures have to be taken to upgrade the safety of the disposal facility. Possible options may include the removal of some or all of the waste from the facility, making engineering improvements, or putting in place or enhancing institutional controls. Evaluation of these options has to include broader technical, social and political issues.”

Die “vernünftigen praktikablen Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit der Anlage” sind Gegenstand der hier vorliegenden Unternehmung.

6. Sachstand und Auflistung noch offener Fragestellungen

In der hier vorgelegten Iststandsanalyse wurden

- die gebirgsmechanische Defizitanalyse aus dem Jahr 2012 zum Schließungskonzept von HMGU,
- die ESK/SSK-Stellungnahmen zur Notfallplanung Asse,
- die Unterlagen von 3 Workshops des BfS zum Sachstand der Rückholung, des Strahlenschutzes und zur Notfallvorsorge,
- die Stellungnahmen von ESK und SSK zum Langzeitsicherheitsnachweis ERAM,
- die Sicherheitsanforderungen des BMU,
- die Unterlagen der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) sowie
- die „Specific Safety Requirements No. SSR-5“ der Internationalen Atomenergieorganisation

dahingehend geprüft, inwieweit sich gebirgsmechanische Werkzeuge (Analysemethoden, Bewertungskriterien, Rechenprogramme) identifizieren lassen, die auch für eine Auswirkungsanalyse verwendbar sind, wenn die radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II nicht oder nicht vollständig zurückgeholt werden können. Dabei wurde auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik, soweit bekannt und sinnvoll anwendbar, Bezug genommen.

Der Hintergrund ist, dass für den Fall der nicht möglichen oder nicht genehmigungsfähigen Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Schachanlage Asse II die Lex-Asse die Auswahl der dann bestmöglichen Stilllegungsoption (Rückfalloption) vorsieht. Um eine Bewertung von möglichen Optionen im Eintrittsfall schnellstmöglich durchführen zu können, sind vorlaufende Analysen der zu erwartenden Auswirkungen (Auswirkungsanalyse) notwendig. Des Weiteren zeigen die bereits vorliegenden Erfahrungen zu den realisierten bzw. noch ausstehenden Maßnahmen der Notfallplanung, dass eine aktualisierte Bewertung des zu erwartenden Systemverhaltens erforderlich ist, um die Maßnahmen weiterhin sinnvoll steuern zu können.

Vor der Bearbeitung musste zunächst überlegt werden, welche zukünftigen (gebirgsmechanisch relevanten) Entwicklungen in der Schachanlage Asse II zu erwarten sind. Dabei wird davon ausgegangen, dass die gegenwärtig laufenden und am „Auslegungsüberschreitenden Lösungszutritt“ (AÜL) orientierten Maßnahmen der Notfallplanung umgesetzt werden.

Nach der Beendigung der Vorsorgemaßnahmen sind folgende Entwicklungen denkbar:

- Die Rückholung kann noch nicht beginnen, da kein Zwischenlager existiert und noch sicherheitliche Probleme bestehen bzw. Genehmigungen ausstehen. Es kommt nicht zu einem AÜL und deshalb auch zu keiner Gegenflutung. Das Bergwerk verbleibt weiter im Offenhaltungsbetrieb.
- Die Entscheidung für die Rückholung fällt, wegen sicherheitlicher Probleme erfolgt aber ein Abbruch. Es kommt nicht zu einem AÜL und deshalb auch zu keiner Gegenflutung. Bis zu einer neuen Entscheidung läuft der Offenhaltungsbetrieb weiter.
- Es kommt zu einem AÜL und deshalb auch zur Gegenflutung.
- Der Betreiber muss sich gegen die Rückholung entscheiden, da kein Zwischenlager existiert, sicherheitliche Probleme nicht behoben werden können und/oder keine Genehmigung erteilt werden kann. Es wird eine Entscheidung zur Gegenflutung ohne vorherigen AÜL gefällt.

In der hier vorgelegten Studie wird nur auf die letzte Entwicklung als Rückfalloption Bezug genommen. Da die anderen Entwicklungen auch durch eine langjährige „trockene“ Offenhaltung charakterisiert sind und auf jeden Fall für alle Entwicklungen Werkzeuge für Sicherheitsanalysen der Nachbetriebsphase des Bergwerkes zu entwickeln sind, sind die Analysemethoden, Bewertungskriterien und Rechenprogramme (zumindest zum Teil) gleichfalls für die Bewertung dieser Systementwicklungen anwendbar.

Bei der Prüfung der Defizitanalyse aus dem Jahr 2012 konnte aufgezeigt werden, dass unter der Betreiberschaft des BfS bereits eine Vielzahl von offenen Sachverhalten, insbesondere zu noch erforderlichen Materialparametern bzw. zur Begründung der Modellrechnungen, bearbeitet werden konnten. Diese Nachweismethoden und Kriterien sind auch für die Auswirkungsanalyse einer Rückfalloption anwendbar.

Dazu gehören

- die 3D-Modelle des westlichen Bergwerkes zur Simulation großräumiger Wechselwirkungen (Stand sicherheitsprobleme im Offenhaltungsbetrieb und Konvergenzverhalten in der Nachbetriebsphase),
- gesteinsmechanische Versuche an weiteren Steinsalzvarietäten inklusive Validierung der Materialparameter für eine numerische Simulation sowie
- gesteinsmechanische Untersuchungen des Setzungsverhaltens von Versatz bei der Flutung mit $MgCl_2$ - und Deckgebirgslösung.

Gegenwärtig haben weitere Laboruntersuchungen am Staßfurtsteinsalz und Carnallitit sowie an verfestigten Versatzchargen begonnen und es ist ein Programm zur Untersuchung des langzeitigen mechanisch-hydraulischen Verhaltens von Magnesiumdepot vorgesehen.

Da in den letzten Jahren für das IfG gebirgsmechanische Standsicherheitsprobleme der Infrastrukturbereiche (Wendel, Abbaue auf den oberen Sohlen) im Fokus standen, wurden die Rechenmodelle für derartige lokale Bewertungen, die auch in der Zukunft bedeutsam sind, qualifiziert.

Weiterhin erfolgte eine ständige Fortführung des Kenntnisstandes zum mechanisch-hydraulischen Langzeitverhalten von Sorelbeton. Die Standortuntersuchungen für die Bewertung des hydraulischen Widerstandes der Strömungsbarrieren und die Befunde der Faktenerhebung in der Nähe der Einlagerungskammern lieferten Standortkenntnisse für die Bewertung des zukünftigen Systemverhaltens.

An teilweise noch offenen Problemstellungen, wie Berücksichtigung von Bandbreiten in den Prognoserechnungen, Betrachtungen zu Ungewissheiten, langfristige Bewertung des Systemtragwiderstandes sowie Kenntnisstand zum Deckgebirge, wird gegenwärtig gearbeitet.

Hinsichtlich der mechanisch-hydraulischen Langzeitbewertung der MgO-Baustoffe (Sorelbeton und Magnesiumdepot) sind Qualifizierungen und Neuentwicklungen erforderlich, die im Rahmen schon bestehender Beauftragungen zu erarbeiten sind.

Beim Studium der „Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG) wurden wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche FEP aufgelistet, die im Rahmen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Salzgestein am Standort Gorleben hinsichtlich ihres Einflusses auf die Integrität der geologischen und technischen Barrieren untersucht wurden. Auch bzgl. dieser Unterlage, bestehend aus 14 Arbeitspaketen mit eigenständigen Berichten, wurde geprüft, ob sich die verwendeten gebirgsmechanischen Werkzeuge sinnvoll auf die Schachtanlage Asse II übertragen lassen. Die Aufgabenstellung bestand ausdrücklich nicht darin, das Sicherheits- und Nachweiskonzept methodisch von der VSG auf die Schachtanlage Asse II zu übertragen, sondern lediglich die Anwendbarkeit der grundlegenden gebirgsmechanischen Methoden, Kriterien und Rechenprogramme zu bewerten.

Als noch erforderliche Weiterentwicklungen wurden identifiziert:

- Untersuchung des Versatzdruckaufbaus für kleine Porositäten/Permeabilitäten und Implementierung der physikalischen Wechselwirkungen in gebirgsmechanische Stoffmodelle. Berücksichtigung des Lösungsinndruckes im Kompaktionsverlauf.
- Weitere Arbeiten zur erreichbaren Restporosität des kompaktierten Salzgrusversatzes sowie den hydraulischen Eigenschaften des Salzgrusversatzes nach Erreichen einer geringen Porosität.
- Identifizierung des ewG für Asse II (ist das überhaupt möglich bzw. mit welchen Abstrichen im Vergleich zur VSG?)
- Besseres Verständnis bzw. Modellweiterentwicklung der Fluidinfiltration in das Salzgestein (druckgetriebene Perkolation). Begründung der Reichweite von Fluiden in der Barriere sowie der Speicherfähigkeit im Porenraum.
- Untersuchung der Möglichkeit von langzeitigen Verheilungseffekten in der Steinsalzbarriere in Richtung Neben- und Deckgebirge.
- Überarbeitung des Schachtverschlusskonzeptes für die Schachtanlage Asse II⁴.

Auch diese Problemstellungen werden teilweise schon bearbeitet bzw. sind benannt. Weiterhin ist vorgesehen, den Erkenntnisfortschritt aus anderen Projekten bzw. FuE-Vorhaben zu übertragen.

Im Rahmen der laufende Bewertung des Offenhaltungsbetriebes sowie für die Planung der Faktenerhebung als Grundlage für die Rückholung ist im Auftrag des BfS vorgesehen, auch für den östlichen Teil des Bergwerkes, bzw. später für das Gesamtbergwerk, ein 3D-Modell zur Bewertung der großräumigen gebirgsmechanischen Prozesse aufzubauen. Als Basis für den Modellaufbau und die Validierung sind die fortlaufenden Informationen aus der Standortüberwachung sowie der Faktenerhebung unerlässlich. Gleichfalls wird davon ausgegangen, dass dem IfG neue geologische Informationen aus dem Bergwerk sowie aus den Deckgebirgsbohrungen für die Modellqualifizierung zur Verfügung gestellt werden. All diese Weiterentwicklungen der gebirgsmechanischen Werkzeuge sind auch für eine Auswirkungsanalyse bei Nichtrückholung der radioaktiven Abfälle verwendbar.

⁴ Vom IfG wird als Optimierung im Rahmen des Sicherheitskonzeptes vorgeschlagen, den Schacht 2 zur Beweissicherung des Systemverhaltens bis zur Einstellung harmonischer (prognostizierbarer) Verhältnisse offen zu lassen und nur einen temporären Verschluss in der Phase des pneumatischen Stützdruckes zu realisieren. Damit würde zunächst keine Salzlösung (mit oder ohne Kontamination) in das Deckgebirge gepresst werden bzw. die Auspressung der anfangs größeren Volumina wird verhindert. Eine solche Konzeptoptimierung könnte zur Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz bei der Rechtfertigung des Sicherheitskonzeptes für die Rückfalloption beitragen.

Literaturverzeichnis

- [1] IfG Leipzig - Kamlot, P.; Günther, R.-M.: „Gebirgsmechanische Defizitanalyse der HMGU-Antragsunterlagen zur Schließung der Schachtanlage Asse II“, Bericht an das Bundesamt für Strahlenschutz, Leipzig, 04.04.2012
- [2] Stellungnahme ESK/SSK zur „Notfallplanung für die Schachtanlage Asse II“, Bonn, 11.07.2013
- [3] Unterlagen der Workshops des BfS
„Fachworkshop zum Sachstand der Rückholung“, Braunschweig, 18. bis 19.01.2012,
„Fachworkshop zur Beschleunigung der Rückholung“, Wolfenbüttel, 24. bis 25.09.2012 und
„Fachworkshop zum Strahlenschutz und zur Notfallvorsorge“, Wolfenbüttel, 20. bis 21.11.2012
- [4] Stellungnahme ESK zum „Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)“, Bonn, 31.01.2013
- [5] SSK „Radiologische Anforderungen an die Langzeitsicherheit des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM)“, Bonn, 15.12.2010
- [6] BMU: „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“, Bonn, 30.09.2010
- [7] GRS: „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)“, Berichte zu den Arbeitspaketen 8 (Szenarientwicklung) und 13 (Synthesebericht), Braunschweig, 2012
- [8] IAEA: Disposal of Radioactive Waste“, Specific IAEA Safety Requirements No. SSR-5, 2011
- [9] Asse-GmbH: „Notfallplanung zur Minimierung der Konsequenzen eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts“, Remlingen, 24.02.2010, BfS-KZL: 9A/34000000/EBM/RB/0003/00
- [10] BfS: „Notfallplanung für das Endlager Asse“, Salzgitter, 28.02.2010, BfS-KZL: 9A/34000000/EBM/RB/0002/00
- [11] IfG Leipzig - Kamlot, P.; Brückner, D.; Günther, R.-M.: „Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachtanlage Asse in der Betriebsphase, Revision 02“, Leipzig, 06.10.2006
- [12] IfG Leipzig - Kamlot, P.; et al.: „Untersuchung des Festigkeits- und Kriechverhaltens von Steinsalz sowie der Versatzsackung unter dem Einfluss der Deckgebirgslösung in

- einem längerfristigen Offenhaltungsbetrieb“, Leipzig, 20.12.2013, BfS-KZL: 9A/64330000/GC/RB/0038/00
- [13] IfG Leipzig - Kamlot, P.; et al.: „Untersuchung der Versatzsackung bzw. des Tragwiderstandsverlustes bei Einleitung einer $MgCl_2$ -Lösung gemäß Notfallkonzept“, Leipzig, 03.06.2013, BfS-KZL: 9A/64330000/GCA/RA/0001/00
- [14] IfG Leipzig - Schroers, Ch.; Kamlot, P.; Günther, R.-M.: „Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse“, Leipzig, 03.11.2006, BfS-KZL: 9A/GC/RB/0008/00
- [15] IfG Leipzig - Kamlot, P.; Günther, R.-M.; Brückner, D.; Schroers, C.: „Gebirgsmechanische Langzeitprognose für die Schachanlage Asse“, Revision 02, Leipzig, November 2006
- [16] CDM: „Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachanlage Asse II“, erstellt im Auftrag des BMBF, Referat 713, Bochum, 12.09.2008, BfS-KZL: 9A/23130000/GHR/RB/0001/00
- [17] Freyer, D.; Popp, T.: „Einsatz von Magnesiabaustoffen im Salzgebirge – Fragestellungen und neue Erkenntnisse“, Vortrag zum 44. Geomechanik Kolloquium, Leipzig, 13. 11. 2015
- [18] BGR: Stellungnahme zur Gebirgsmechanik und Seismologie, Beauftragung durch LBEG innerhalb des Rahmenvertrages „Sicherheitstechnische und geowissenschaftliche Begutachtung der von der GSF geplanten Maßnahmen zur Schließung der Schachanlage Asse“, Hannover, 08.02.2008
- [19] BfS: Prüfung von Unterlagen zur Schließung der Schachanlage Asse II im Hinblick auf die Anforderungen eines atomrechtlichen Planfeststellungsverfahrens, Fachbereich Sicherheit nuklearer Entsorgung, Salzgitter, 26.09.2007
- [20] Arbeitsgruppe Optionenvergleich: Stellungnahme zum Bericht des Helmholtz Zentrums München „Entwicklung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse, Stand 29.09.2008