

Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen

Bericht zum Arbeitspaket 14

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Erstellt von:



Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen

Bericht zum Arbeitspaket 14

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Bruno Thomauske (nse)
Frank Charlier (nse)

März 2013

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnisstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

Aktualisierte Zielsetzung

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

Aktualisierte Projektplanung

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

Projektpartner

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

Arbeitspakete

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

Deskriptoren:

Empfehlungen, Erkundungsbedarf, Forschungsbedarf, Forschungs- und Entwicklungsbedarf, Gelingen, Konzeptoptimierung, VSG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorgehensweise und Grundlagen	3
3	Forschungs- und Entwicklungsbedarf.....	5
3.1	Charakterisierung von Standorten und radioaktiven Abfällen	5
3.1.1	Modell- und Methodenentwicklung, Erkundungsmethoden und -strategien.....	6
3.1.2	Kohlenwasserstoffe	11
3.1.3	Thermomechanische Verformungseigenschaften	12
3.1.4	Konvergenz- und Spannungsmessungen	12
3.1.5	Mechanische Eigenschaften und Stoffgesetze.....	13
3.1.6	Abfälle	15
3.2	Endlagerkonzepte.....	16
3.2.1	Behälterkonzepte.....	16
3.2.2	Transport und Handhabung.....	17
3.2.3	Versatzkonzept.....	19
3.2.4	Verschlussbauwerke.....	21
3.2.5	Rückholbarkeit.....	22
3.3	Sicherheitsanalysen.....	23
3.3.1	Szenarienentwicklung.....	23
3.3.2	Konsequenzenanalyse	23
4	Empfehlungen.....	27
4.1	Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten sowie Endlagerkonzepten.....	27
4.1.1	Entwicklung anforderungsoptimierter Sicherheits- und Nachweiskonzepte.....	27
4.1.2	Anforderungsoptimierte Entwicklung von Endlagerkonzepten.....	28
4.1.3	Behälterkonzept.....	30

4.2	Endlagerkonzept und Rückholbarkeit.....	31
4.3	Methodisches Vorgehen bei der Erkundung	31
4.4	Iterative Durchführung von Sicherheitsanalysen	33
4.5	Berücksichtigung von Art und Umfang vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle	33
4.6	Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.....	34
5	Zusammenfassung	35
	Literaturverzeichnis.....	37

1 Einleitung

Gegenstand dieses Berichts ist die systematische Zusammenstellung des identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs sowie die Benennung der aus der Befassung mit der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) resultierenden Empfehlungen. Grundlagen und Vorgehensweise sind in nachfolgendem Kapitel beschrieben.

Bei den Arbeiten zur vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben wurden der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zu Grunde gelegt und die vor Beginn des Moratoriums zu Gorleben im Herbst 2000 erzielten Erkundungsergebnisse sowie diejenigen, die ab dem im Jahr 2010 fortgesetzten Erkundungsarbeiten gewonnen und noch zeitlich in das Projekt Eingang finden konnten, berücksichtigt. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass sich aus der weiteren Erkundung des Salzstocks Gorleben Sachverhalte ergeben, die zusätzlichen Forschungsbedarf nach sich ziehen.

Der aus der Befassung mit der VSG resultierenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf (FE-Bedarf) ist in Kapitel 3 zusammengestellt. Die Begründungen des jeweils ausgewiesenen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs werden in diesem Bericht kurz skizziert. Die ausführlichen Begründungen lassen sich den Arbeitspaketberichten der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben entnehmen. Die identifizierten Forschungs- und Entwicklungsthemen sind kapitelübergreifend nummeriert und in kursiver Schreibweise wiedergegeben.

Eine Sicherheitsanalyse fußt insbesondere auf den Kenntnissen über den Standort und den einzulagernden Abfallarten, dem Behälterkonzept, dem Einlagerungskonzept sowie dem gewählten Verschlusskonzept. Insofern liegen der Zusammenstellung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs die Abfalldatenbasis (VSG-Arbeitspaket 3, „Abfallspezifikation und Mengengerüst“ /PEI 11/), das optimierte Einlagerungs-, Rückholdungs- und Verschlusskonzept (VSG-Arbeitspaket 5, „Endlagerkonzepte“ /BOL 11/, VSG-Arbeitspaket 6, „Endlagerauslegung und -optimierung“ /BOL 12/ und VSG-Arbeitspaket 12, „Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten“ /PEI 12/) sowie der aktuelle Kenntnisstand über den Standort zugrunde (/BOR 08/, /KLI 07/, /KÖT 07/, /BRÄ 11/ sowie VSG-Arbeitspaket 2, „Geowissenschaftliche Langzeitprognose“ /MRU 11/ und „Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben“ /KUK 11/).

Weiterhin ergibt sich Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus den Systemanalysen der Arbeitspakete 7 – 10 (VSG-Arbeitspaket 7, „FEP-Katalog“ /WOL 12a/, /WOL 12b/; VSG-Arbeitspaket 8, „Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung“ /BEU 12/; VSG-Arbeitspaket 9, „Integritätsanalyse der geologischen geotechnischen Barriere“ /KOC 12/, /MÜL 12a/, /MÜL b/ sowie VSG-Arbeitspaket 10 „Radiologische Konsequenzenanalyse“ /LAR 13/).

Im Vorhaben VSG wurden in Übereinstimmung mit dem Sicherheits- und Nachweiskonzept (VSG-Arbeitspaket 4, „Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“ /MÖN 12/) Endlagerkonzepte entwickelt. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Endlagerkonzepte zukünftig weiter optimiert oder auch variiert werden können und auch das Sicherheits- und in Folge das Nachweiskonzept einer Optimierung unterzogen werden können. Veränderungen an diesen Grundlagen führen demgemäß zu einer erneuten Analyse des erforderlichen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs.

Die Bewertung des identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zeigt, dass dieser für die Endlagerung in Salzstöcken allgemein gilt und nicht auf den Salzstock Gorleben allein beschränkt ist.

In Kapitel 4 sind die aus der Befassung mit der vorläufigen Sicherheitsanalyse identifizierten Empfehlungen für das weitere Vorgehen dargestellt und begründet. Kapitel 5 enthält eine Zusammenfassung.

2 Vorgehensweise und Grundlagen

Der derzeit erkennbare Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurde im Rahmen der Bearbeitung der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben in den jeweiligen Arbeitspaketen identifiziert. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurde den folgenden drei Kriterien zugeordnet:

- K1 Notwendige Arbeiten für die Durchführung weiterführender Sicherheitsanalysen (nach VSG)
- K2 Notwendige Arbeiten für die Durchführung eines Genehmigungsverfahrens.
- K3 Arbeiten, die einer weiterführenden wissenschaftlichen Absicherung dienen (Abbau von Konservativitäten/Verbesserung des Prozessverständnisses).

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf in diesem Bericht ist in Anlehnung an die Struktur der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben den folgenden Themenbereichen zugeordnet:

- Charakterisierung von Standorten und radioaktiven Abfällen
- Endlagerkonzepte
- Sicherheitsanalysen

Über den identifizierten FE-Bedarf hinaus werden in Kapitel 4 Empfehlungen für die folgenden Themenbereiche formuliert:

- Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten sowie Endlagerkonzepten
- Endlagerkonzept und Rückholbarkeit
- Methodisches Vorgehen bei der Erkundung
- Iterative Durchführung von Sicherheitsanalysen
- Berücksichtigung von Art und Umfang vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle
- Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

3 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

In diesem Kapitel ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf zusammengestellt, der in den folgenden Arbeitspaketen sowie Arbeitsgruppen der VSG identifiziert wurde.

- AP 2 Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3 Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4 Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes
- AP 5 Endlagerkonzepte
- AP 6 Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7 FEP-Katalog
- AP 8 Szenarienentwicklung
- AP 9 Integritätsanalysen
- AP 10 Radiologische Konsequenzenanalyse
- AP 11 Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager
- AP 12 Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten
- Arbeitsgruppe „Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben“

Die Bewertung des identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs zeigt, dass dieser im Wesentlichen für die Endlagerung in Salzstöcken allgemein gilt und nicht auf die Fortführung der Eignungsbewertung des Salzstocks Gorleben beschränkt ist. Eine Übertragbarkeit des FE-Bedarfes auf das Wirtsgestein Salz in flacher Lagerung muss im Einzelfall geprüft werden.

3.1 Charakterisierung von Standorten und radioaktiven Abfällen

Die Charakterisierung eines Standortes ist eine der Grundlagen für eine Endlagerplanung sowie für die langzeitsicherheitsgerichteten Systemanalysen. Die Ergebnisse der Standorterkundung liegen in vier zusammenfassenden, von der BGR veröffentlichten Bänden vor /BOR 08/, /KLI 07/, /KÖT 07/, /BRÄ 11/. Basis dieser Darstellung sind die Erkenntnisse der bis zum Jahre 2000 gewonnenen Ergebnisse aus der Erkundung des

Standortes Gorleben. Zwischenzeitlich sind die Erkundung und die Auswertung der Erkundungsergebnisse fortgeführt worden. Auch sind weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, neu begonnen oder auch zum Teil abgeschlossen worden. Dieses wurde aber bislang nicht zusammenfassend dargestellt oder veröffentlicht.

Die Bewertung des Erkundungsprogramms, die Datenerhebung sowie deren Auswertung erfolgt unter dem Aspekt des Standes von Wissenschaft und Technik hinsichtlich einer Standortcharakterisierung.

Die Standortcharakterisierung orientiert sich hinsichtlich ihres Umfangs und ihrer Erkundungstiefe nicht nur an den Erfordernissen der Sicherheitsanalyse, sondern an der für ein Genehmigungsverfahren erforderlichen, umfassenden Kenntnis über den Standort, seine geologische Entwicklung und seine Prognose. Insofern ist die Standortcharakterisierung Basis für die Sicherheitsanalysen. Durch die Sicherheitsanalysen kann daraufhin bewertet werden, welche der Ergebnisse aus der Standortcharakterisierung für die Langzeitsicherheit von Bedeutung sind. Eine zusammenfassende Bewertung langzeitsicherheitsrelevanter Parameter erfolgt im Synthesebericht /FIS 13/.

3.1.1 Modell- und Methodenentwicklung, Erkundungsmethoden und -strategien

Gemäß dem Sicherheitskonzept der VSG /MÖN 12/ soll der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle und ihrer Inhaltsstoffe in der Nachverschlussphase in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) erfolgen. Dieser Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum erhalten bleiben und seine Barrierenwirksamkeit soll weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden.

Zum langfristigen Erhalt des ewG tragen maßgeblich die den ewG überlagernden, mehrere hundert Meter mächtigen Salzsichten bei. Grundwasserfließvorgänge in den geologischen Schichten über dem Salinarkörper sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung und bei den entsprechenden Nachweisen zu berücksichtigen, da sie u. a. die Auswirkungen der Subrosion des Salzgesteins bestimmen und damit direkt auf die Salzsichten wirken, die den ewG schützen und dessen Erhalt im Nachweiszeitraum sicherstellen sollen.

Am Standort Gorleben wurde ein umfangreiches Bohr- und Untersuchungsprogramm durchgeführt, mit dem die Geometrien des Grundwassersystems und alle relevanten hydrogeologischen und hydrochemischen Parameter umfangreich erfasst wurden. Für eine abschließende Beurteilung des hydraulischen Systems oberhalb eines Salzstocks im Hinblick auf Strömungsgeschwindigkeiten, Lösungs- und Transportraten sollten im Rahmen zukünftiger Erkundungen von Salzstöcken realitätsnahe dreidimensionale Grundwassermodelle erstellt werden, die alle wirksamen Prozesse der Grundwasserbewegung berücksichtigen.

Bei dem nachfolgend genannten Forschungs- und Entwicklungsbedarf handelt es sich um Fragestellungen, die nicht nur für den Standort Gorleben, sondern generell für potenzielle Salzstandorte von Interesse sind. Die Fragestellungen bestehen also standortunabhängig und die Ergebnisse sind übertragbar.

- (1) *Entwicklung eines dreidimensionalen thermisch-hydraulisch gekoppelten Grundwassermodells auf Basis einer validierten bzw. auch in ihren Ungewissheiten quantifizierten Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sowie hydraulisch wirksamer Größen (Porosität, Permeabilität).*

(K1)

Es besteht Forschungsbedarf für die weitere methodische Qualifizierung des EMR Messverfahrens (Elektromagnetisches Reflexionsverfahren) für eine verbesserte untertägige Erkundung in Salzstrukturen nach der VSG. Aktuell wird das EMR-Verfahren zur geologischen Erkundung routinemäßig eingesetzt und hat sich als leistungsfähig zur Identifikation z.B. von lithologischen Schichtgrenzen erwiesen.

Mit Blick auf Lösungsvorkommen sind die verbesserte Erfassung der räumlichen Verteilung von lösungsführenden Bereichen sowie die Verbesserung des Auflösungsvermögens für unterschiedliche und auch geringe Fluidvorkommen von Bedeutung. Mit den eingesetzten EMR-Verfahren lassen sich lösungsführende Bereiche im Salz aufgrund der diffusen Verteilung in der Regel bislang weniger scharf abgrenzen. Hier könnte weitere Forschung zu einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR-Daten führen, die möglicherweise wichtige Informationen zur Verteilung, Größe und Geometrie der Lösungsvorkommen erbringen würden. Insofern wird empfohlen:

- (2) *Verbesserung der Erfassung von lösungsführenden Bereichen mittels einer kombinierten Auswertung von seismischen und EMR-Daten durch Erhöhung*

der Abbildungsgenauigkeit und Identifizierbarkeit von Lösungsvorkommen, die von ergänzenden Laboruntersuchungen (systematische Untersuchungen von Änderungen der akustischen und elektrischen Eigenschaften bei lösungsführenden Salzgesteinen) flankiert werden sollten.

(K1)

- (3) *Verbesserung der Erfassung der Internstruktur eines Salzstocks sowie Verringerung der Ungewissheiten bezüglich Raumlagen und Distanzen der Strukturelemente durch Verschneidung hoch aufgelöster Seismik mit EMR-Messungen und einer mikroseismischer Analyse.*

(K1)

Aufgrund der Relevanz von Lösungsvorkommen im Salzgebirge, u. a. für die Bestimmung des möglichen Wasserangebots für Behälterkorrosion oder als mögliche Transportpfade, stellt das Verständnis von Migrationsprozessen von Fluiden im Salz (räumlich/zeitliche Entwicklung sowie mit der Veränderung der Fluidgehalte) eine wichtige Randbedingung dar, die im Kontext der geologischen Langzeitentwicklung zu betrachten ist:

- (4) *Entwicklung eines dynamischen Modells der Mobilität und Migration der Fluide über lange Zeiträume in Salzstöcken sowie die geostatistische Analyse von Lokationen, Größen, Drucken und Volumina von Fluidvorkommen. Dies ist für weiterführende Sicherheitsanalysen wichtig, um ein Modell mit quantitativen Vorhersagen für nicht erbohrte Lösungsvolumina zu erstellen.*

(K1)

Die Aufstiegsgeschwindigkeit eines Salzstocks bestimmt neben anderen Einflussfaktoren die mögliche Reduzierung der Mächtigkeit der Salzbarriere über einem darin angelegten Endlager während der Nachbetriebsphase. Der Prozess kann daher für die Beurteilung der Langzeitsicherheit relevant sein. Aus der Untersuchung der Sedimente des Deck- und Nebengebirges können verlässliche Informationen über die langfristigen Geschwindigkeiten des Salzaufstiegs in der Vergangenheit abgeleitet werden. Zur Absicherung der Kenntnisse über kurzfristige Geschwindigkeitsänderungen während einer Kaltzeit können Ergebnisse aus Modellberechnungen beitragen, in denen die mechanischen Auswirkungen von Gletscherauflasten während einer Vereisung berücksichtigt werden.

- (5) *Entwicklung von Methoden zur Ermittlung der Auswirkung von Kaltzeiten auf den Diapirismus von Salzstöcken, z. B. durch Veränderung des isostatischen Gleichgewichts durch Gletscherauflast, mittels geomechanischer Modellberechnungen.*

(K1)

In bestimmten Bereichen des Salzstocks Bokeloh werden verheilte Klüfte beobachtet. Je nachdem, ob diese Klüfte als kryogen einzustufen sind, sind ggf. entsprechende zukünftige kryogene Klufthbildungen für Salzstöcke in Langzeitsicherheitsbetrachtungen zu berücksichtigen. Eine Sicherheitsrelevanz besteht dann, wenn im Zuge der Klufthbildungen Wegsamkeiten im ewG geschaffen werden können.

Die beobachteten Risse bzw. Klüfte müssen mineralogisch-geochemisch untersucht sowie in die Strukturentwicklung und die regionalgeologische Entwicklung eingeordnet werden. Auf der Grundlage dieser Analyseergebnisse können dann Aussagen zur Genese der Klüfte und zur Übertragbarkeit auf die Verhältnisse an anderen Salzstandorten erfolgen. Durch Modellberechnungen sind die thermomechanischen Bedingungen und Prozesse während einer Eiszeit zu simulieren und mit den Spannungsbedingungen, die für eine Klufthbildung erforderlich sind, zu vergleichen.

- (6) *Entwicklung eines konsistenten geowissenschaftlichen Verständnisses der Genese von Klüften, insbesondere in den als geologische Barriere vorgesehenen Salzpartien von Salzstöcken.*

(K1)

Während des Abtauens eines Gletschers im Verlauf einer Eiszeit können durch Schmelzwässer insbesondere leicht erodierbare Sedimente mechanisch-hydraulisch umgestaltet werden. Die möglichen Erosionstiefen solcher glazialer Rinnen bestimmen die dadurch mögliche und in einer Sicherheitsanalyse zu unterstellende Reduzierung der Mächtigkeit der Schichten über dem ewG eines Endlagers infolge Rinnenbildung. Durch geeignete Untersuchungen an unterschiedlichen Standorten und die Ermittlung der jeweils zugehörigen Gletschermächtigkeiten und sonstigen glazigenen Bedingungen sollen die möglichen Erosionstiefen glazialer Rinnen ermittelt werden.

- (7) *Entwicklung belastbarer Methoden zur Ermittlung der möglichen Erosionstiefen glazialer Rinnen, insbesondere bei mehrmaligen Eisüberfahrungen.*

(K1)

In anhydrithaltigen Salzgesteinen kann es unter bestimmten Bedingungen zur thermochemischen Sulfatreduktion (TSR) kommen. Die Kinetik der TSR bestimmt den Einfluss des Prozesses auf den Spannungszustand im Gebirge und damit auf die Einhaltung eines Kriteriums für die Integrität der Salzbarriere. Deshalb sind die limitierenden Parameter für den Ablauf des Reaktionsprozesses, z. B. Gehalte, Zusammensetzung und Verteilung von Kohlenwasserstoffen sowie Höhe der erforderlichen Mindesttemperatur, zu klären, um qualitative und quantitative Abschätzungen des möglichen Ausmaßes der Stoffumsätze im Ergebnis des Reduktionsprozesses unter Berücksichtigung der Reaktionskinetik vornehmen zu können.

(8) *Ermittlung quantitativer Randbedingungen für den Ablauf der thermochemischen Sulfatreduktion.*

(K1)

Durch Kohlenwasserstoffe (KW) können Prozesse ausgelöst werden, die den Spannungszustand im Gebirge und damit die Einhaltung eines Kriteriums für die Integrität der geologischen Barriere in der Nachbetriebsphase beeinflussen können. Die Kenntnis der dafür ausschlaggebenden Menge an KW kann verbessert werden, wenn neben den aufgeschlossenen Vorkommen auch nicht aufgeschlossene Vorkommen detektiert werden können. Die Entwicklung entsprechender Detektionsverfahren wurde begonnen.

(9) *Weiterentwicklung von zerstörungsfreien Verfahren zur verbesserten Detektion von Fluiden im Allgemeinen sowie von Kohlenwasserstoffvorkommen im Salzgestein im Besonderen.*

(K3)

Verfüll- und Verschlusskonzepte für Endlager im Wirtsgestein Salz sehen eine Verfüllung von Strecken mit Salzgrus vor. Durch die Konvergenz der Grubenbaue infolge der Kriechfähigkeit des Salzgesteins kommt es zur Kompaktion des Salzgrusversatzes, der damit im Laufe der Zeit eine Barrierewirkung entwickelt. Im Zusammenhang mit der Dauer der Wirksamkeit anderer Barrieren ist diese zeitliche Entwicklung der Barrierewirkung des Salzgruses sicherheitsrelevant. Der zeitliche Verlauf der Salzgruskompaktion wird einerseits durch die Eigenschaften des Salzgruses selbst und andererseits durch die Konvergenzgeschwindigkeit des umgebenden Salzgebirges beeinflusst. Letztere kann infolge von Luftfeuchte-Variationen im Wetterstrom oder durch die Mobilisierung inhärenter Gesteinsfeuchte maßgeblich beeinflusst werden, so dass Unge-

wissheiten in Sicherheitsanalysen durch die Erweiterung der Datenbasis zur Wirkung von Feuchte verringert werden können.

(10) *Verbesserung des Prozessverständnisses zur Wirkung von Feuchte auf die mechanischen Eigenschaften von Steinsalz.*

(K3)

Zum Nachweis der Barrierewirksamkeit in der Umgebung eines im Salinar aufgefahrenden Endlagerbergwerks ist das komplexe mechanische Verhalten der anstehenden Salinargesteine unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkung in entsprechenden geomechanischen Berechnungsmodellen unter Abprüfung der allgemein akzeptierten Integritätskriterien zu beschreiben /BMU 10/. Aufgrund der Entstehung durch sedimentäre Ablagerung und der Entwicklung von Salzlagerstätten liegen im Salzgebirge immer Schichtgrenzen zwischen Steinsalz und benachbarten Salinargesteinen (Kalisalze, Anhydrit, Salzton) vor. Da diese Schichtflächen und Diskontinuitäten in Salzstöcken häufig steil stehen und bis in wasserführende Bereiche hochreichen, stellen sie potenzielle Schwachstellen in der geologischen Barriere dar. Sie müssen deshalb bei der Integritätsbewertung betrachtet werden. Für die Beurteilung ihres Dichtheitsverhaltens unter fluiddruck-bedingter Aufweitung und verschiebungsbedingter Scherdilatanz sind unlängst belastbare geomechanische Modellansätze entwickelt worden (z. B. /MIN 10/). Für eine abschließende Absicherung der Modellansätze fehlen aber noch ausreichende Untersuchungen und Erfahrungen. Deshalb ist für die Klärung der allgemeinen Bedeutung und einer standortbezogenen Einschätzung die Durchführung folgender Arbeiten erforderlich:

(11) *Weiterführung gesteinsmechanischer Untersuchungen an salinaren Schichtflächen und Diskontinuitäten und, davon ausgehend, Durchführung von geomechanischen Modellrechnungen bzgl. ihrer Relevanz als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen.*

(K1)

3.1.2 Kohlenwasserstoffe

Es kann aus heutiger Sicht nicht ausgeschlossen werden, dass Kohlenwasserstoffvorkommen im Endlager sicherheitsrelevante Auswirkungen auf das Korrosionsverhalten der Behälter hervorrufen. Daraus resultiert als Forschungsbedarf:

- (12) *Weiterführende Untersuchungen der Auswirkungen der Kohlenwasserstoffvorkommen auf das geochemische Milieu im Wirtsgestein und auf das bergsmechanische Verhalten.*

(K1)

3.1.3 Thermomechanische Verformungseigenschaften

Es ergibt sich aufgrund des vorliegenden Kenntnisstandes aus den durchgeführten thermomechanischen Modellrechnungen als Forschungs- und Entwicklungsbedarf die Notwendigkeit, geostatistische Methoden anzuwenden, um die Ungewissheiten der angesetzten geomechanischen Parameter zu reduzieren. Voraussetzung hierfür ist eine fundierte Datenbasis, welche alle Messdaten aus den verschiedenen Erkundungsphasen vereint. Es sollten die möglichen Konsequenzen aus nicht zuverlässig bestimmten Gesteinseigenschaften (z. B. zu große bzw. zu kleine Kriechraten) sowie der Einschränkungen der zumeist durchgeführten 2D-Modellierungen mit umfassenden, dreidimensionalen thermo-mechanischen Modellrechnungen überprüft werden.

- (13) *Bestimmung der thermomechanischen Verformungseigenschaften von Salz unter Berücksichtigung der Druck- und Temperaturabhängigkeiten, sowie ihre repräsentative Zuordnung zu den Modelleinheiten für Modellierungen (Homogenbereichseinheiten) unter Berücksichtigung eines geologischen Standortmodells, bei welchem der Salzstock sowie das Umgebungsgestein detailliert und dreidimensional erfasst werden soll.*

(K2)

3.1.4 Konvergenz- und Spannungsmessungen

Im Hinblick auf die geomechanischen in-situ Spannungsmessungen ergibt sich der folgende Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- (14) *Entwicklung eines verbesserten Modells der Dichteverteilung (ausgehend vom Standortmodell) und der Geometrie des Salzstocks. Hierfür sind einerseits in-situ-Messungen (z. B. Hydro-Frac) bzw. mikrostrukturelle Untersuchungen (z. B. Bestimmung der Subkorngröße) notwendig, um die wahrscheinlich geringen, aber dennoch signifikanten Abweichungen vom bisher*

angenommenen isotropen Spannungszustand bei der Integritätsanalyse besser berücksichtigen zu können.

(K2)

- (15) Verbesserte Integration aller Spannungs- und Versatzmessungen in einem konsistenten, quantifizierten (inklusive der Ungewissheiten) Modell für Salzstrukturen. Dazu sollten die jeweils aktuellen Modelle (und ihre Ungewissheiten) der Geometrie, der physikalischen Eigenschaften und der Randbedingungen genutzt werden, um einen Vergleich der Messungen mit den Vorhersagen (in-situ Spannung, Bewegungen) durchführen zu können. So könnte ein integriertes und validiertes Modell des Salzstocks erstellt werden, welches signifikant genauere Vorhersagen des zukünftigen Verhaltens des Endlagers erlaubt.*

(K2)

- (16) Eine umfassende, quantitative Evaluierung der Konvergenzmessungen mit einer Rückrechnung mittels geomechanischer Modellrechnungen würde zur weiteren wissenschaftlichen Absicherung eine sinnvolle Validierung der verwendeten Stoffgesetze erlauben. Hierzu wäre auch die Einbindung eines Modells, welches die komplex gefalteten Geometrien beinhaltet, erforderlich.*

(K3)

3.1.5 Mechanische Eigenschaften und Stoffgesetze

Im Folgenden wird der Forschungsbedarf zur verbesserten Abschätzung der mechanischen Eigenschaften bzgl. fluidunterstützter Verformungsmechanismen und für eine zuverlässigere Anwendung der Stoffgesetze aufgelistet.

Neben weiteren experimentellen Arbeiten sind vor allem weiterführende mikrostrukturelle und mikromechanische Untersuchungen aller Einheiten des Endlagers für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG) erforderlich, um die Deformationsmechanismen zu evaluieren und Vorhersagen des Langzeitverhaltens des Endlagersystems besser zu quantifizieren.

Diese Untersuchungen sollten den Beginn der fluid-unterstützten Rekristallisation bestimmen sowie die Korngrenzstruktur und die Drucklösungsprozesse nach aktuellem Stand der Forschung quantifizieren.

(17) *Entwicklung eines umfassenden, integrierten, mikrophysik-basierten Modells zur Mobilität und mechanischen Wirkung von Fluiden entlang von Korngrenzen im Steinsalz zur Beschreibung von Fluidtransportprozessen in der Wirtsgesteinsmatrix für weiterführende Sicherheitsanalysen (nach VSG), u. a. zur Bewertung einer möglichen Verheilung z. B. der Auflockerungszone. Darüber hinaus ist die Kenntnis der mikrostrukturellen Prozesse und ihres Einflusses auf die mechanischen und Transport-Eigenschaften notwendig, um für die Langzeitprognose für geologische Zeiträume verbesserte, physikalisch-basierte Stoffgesetze zu entwickeln.*

(K2)

(18) *Mit Blick auf mögliche Verheilungsprozesse, die bisher nicht hinreichend in ihrer Wirkung und zeitlich quantifizierbar sind, sind mikrostrukturelle Untersuchungen der Auflockerungszone und des Versatzes für weiterführende Sicherheitsanalysen notwendig, um das Ausmaß von fluidunterstützten Rekristallisationsprozessen und den Einfluss von Drucklösung bestimmen zu können.*

(K2)

Das zeitliche mechanische Verhalten von Materialien wird anhand von Stoffgesetzen beschrieben. Im Hinblick auf die Extrapolation der zeitlichen Entwicklung kommt diesen Stoffgesetzen eine hohe Bedeutung zu. Daraus resultiert folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

(19) *Weiterentwicklung geomechanischer Stoffmodelle und Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration oder Perkolation von Fluiden zum Integritätsnachweis der geologischen Barriere unter Berücksichtigung von THM-Prozessen als Voraussetzung für die Konsequenzenanalyse bei lokaler Verletzung des Minimalspannungskriteriums.*

(K1)

(20) *Weiterentwicklung von Stoffmodellen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus und seines Endzustandes und deren Implementierung in numerische*

Rechencodes mit Parametrisierung von Stoffeigenschaften bis zu kleinen Porositäten.

(K1)

- (21) Entwicklung von Stoffgesetzen zu hydro-mechanischen Wechselwirkungen in Steinsalz. Unter Berücksichtigung einer verbesserten Beschreibung von hydro-mechanischen Wechselwirkungen über belastbare Materialparameter (z. B. über unterschiedliche Biot-Faktoren für unterschiedlich dilatantes Salzgestein) auf Basis gezielter Laborversuche.*

(K1)

- (22) Erweiterung der experimentellen Datengrundlage aus Versuchsergebnissen zur Weiterentwicklung der vorhandenen Stoffansätze, z. B. des Composite Dilatancy Model (CDM), für die verbesserte stoffgesetzliche Beschreibung der Schädigung und insbesondere der Verheilung von Steinsalz.*

(K3)

- (23) Für zukünftige Sicherheitsanalysen ist eine Integration geowissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Sichtweisen in die numerischen Modelle zu empfehlen. Diese sollen auf einem geometrischen Standortmodell (Common Earth Model) mit quantifizierten Ungewissheiten beruhen.*

(K3)

- (24) Qualifizierung der Modelle anhand eines Vergleichs der Modellrechnungen mit den in einer Datenbank abgelegten Messungen von Spannungen und Bewegungen des Salzstocks Gorleben für zukünftige Sicherheitsanalysen.*

(K3)

3.1.6 Abfälle

Grundlage der Sicherheitsanalysen sind die Abfallmengen sowie die radiologische und stoffliche Charakterisierung der Abfälle. Für die Endlagerplanung und die durchzuführenden Sicherheitsanalysen ist es notwendig, auf abgesicherte Informationen zu den endzulagernden radioaktiven Abfällen zugreifen zu können. Diese Informationen betreffen insbesondere das Radionuklid- und Stoffinventar der Abfälle.

Die Ableitung dieser Inventare über Modellrechnungen muss möglichst durch Messwerte abgesichert werden. Darüber hinaus muss der Radionuklidvektor für einen definierten Zeitpunkt ermittelt werden, von dem aus über Abklingrechnungen das Zeitverhalten des Radionuklid-Inventars beschrieben werden kann. Dadurch sollen zudem Über- oder Unterschätzungen der Inventare, die durch die modellhaften Berechnungen entstehen könnten, vermieden werden.

Für die Zukunft ist nicht auszuschließen, dass eine gemeinsame Einlagerung wärmeentwickelnder und bestimmter vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle in einem Endlager angestrebt wird. Die Menge und die radiologischen und chemischen Eigenschaften der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle können das Endlagerkonzept und die durchzuführenden Sicherheitsanalysen nachhaltig beeinflussen. Insofern ist es wesentlich, die Eigenschaften dieser Abfälle frühzeitig in den Planungen berücksichtigen zu können.

(25) *Entwicklung eines Quellterms bei Anwesenheit sehr geringer Feuchtemengen in den Behältern bzw. im Versatz.*

(K1)

(26) *Ableitung von Anforderungen, unter denen vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle im Salinar zusammen mit wärmeentwickelnden Abfällen endgelagert werden können.*

(K1)

3.2 Endlagerkonzepte

3.2.1 Behälterkonzepte

Für die zu berücksichtigende Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen wurden im Vorhaben VSG bei der Endlagerplanung und -auslegung Endlagerbehälter ausgewählt, die geeignet erscheinen, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Für keinen dieser Behälter gibt es bisher aber genehmigungsreife Planungen oder bereits erteilte Zulassungen zur Nutzung als Endlagerbehälter. Dies führt zu folgendem Entwicklungsbedarf:

(27) Für die in den betrachteten Einlagerungsvarianten zugrunde gelegten Endlagerbehälter sind unter der Berücksichtigung der Forderungen nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit /BMU 10/ die Planungen und Untersuchungen dahingehend weiterzuführen, dass für jeden der folgenden Behältertypen eine Genehmigungsreife erreicht wird:

- Variante B1: POLLUX[®]-Behälter (Typ 10 für abgebrannte Brennelemente, Typ 9 für HAW-Kokillen);
- Variante C: Brennstabkokillen (BSK-R) und Triple-Packs (modifizierte Brennstabkokillen);
- Variante B2: Transport- und Lagerbehälter vom Typ CASTOR[®].

(K2)

(28) Untersuchung der Auswirkungen der Kohlenwasserstoffvorkommen auf das Korrosionsverhalten der Behälter.

(K1)

3.2.2 Transport und Handhabung

Das im Rahmen des Vorhabens VSG konzipierte Streckenlagerungskonzept sieht vor, dass die wärmeentwickelnden Abfälle in dem hierfür vorgesehenen Endlagerbehälter POLLUX[®] endgelagert werden sollen. Dieses Konzept basierte auf der Annahme, dass noch während der Nutzung der Kernenergie ein Endlager zur Verfügung steht und die Transport- und Lagerbehälter (z. B. CASTOR[®]-Behälter) lediglich eine begrenzte Zwischenphase abdecken müssen. Hierfür wäre nur eine begrenzte Anzahl von Transport- und Lagerbehältern erforderlich gewesen. Nachdem sich die Einrichtung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle auf einen Zeitraum weit nach der Nutzung der Kernenergie in Deutschland verschoben hat, wird eine Zwischenlagerung sämtlicher wärmeentwickelnder Abfälle in Zwischenlagerbehältern erforderlich. Insofern stellt sich die Frage, ob ein Endlagerkonzept nicht ganz auf die Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern abgestellt werden kann. Hierfür sind dann entsprechende Untersuchungen und Planungen erforderlich. Dies betrifft nicht unwesentlich die Handhabung von im Vergleich zu POLLUX[®]-Behältern deutlich höheren Massen.

Neben dem Streckenlagerungskonzept wurde im Vorhaben VSG die Lagerung von Abfallbehältern (Kokillen) in tiefen Bohrlöchern betrachtet.

Im Hinblick auf die Transport-, Handhabungs- und Einlagerungstechnik wurde folgender Entwicklungsbedarf identifiziert:

(29) *Weiterentwicklung der Schachtfördertechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung der Schachtförderanlage zur Vermeidung eines Absturzes von Abfallgebinden in den Schacht und zur Reduktion der Auswirkungen eines solchen Ereignisses.*

(K2)

(30) *Weiterentwicklung der Einlagerungstechnik im Hinblick auf die sicherheitstechnische Auslegung der Einlagerungsmaschine für die Bohrlochlagerung unter der sinngemäßen Berücksichtigung der KTA 3902, Abschnitt 8.*

(K2)

(31) *Untersuchung und Nachweis der Genehmigungsreife der Transport- und Einlagerungstechnik für den Einsatz in einem Endlagerbergwerk im Rahmen weiterer Planungen und Demonstrationsvorhaben.*

(K2)

(32) *Entwicklung eines Handhabungskonzeptes für schwere Lasten (Transport- und Lagerbehälter):*

Optimierung der sicherheitstechnischen Auslegung der Schachtförderanlage und bei den weiteren Handhabungseinrichtungen unter und über Tage bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle für die Handhabung von Massen von bis zu 160 Mg.

(K2)

(33) *Weiterentwicklung des Konzeptes der verrohrten Bohrlochlagerung unter Einbezug von Sicherheitsanalysen (u. a. FEPs, Szenarien):*

- *Ableitung des zulässigen Wärmeeintrags im Hinblick auf die Integrität,*
- *Festlegung der Bohrlochabstände und -teufen.*

(K1)

- (34) *Weiterentwicklung des Bohrlochkonzeptes mit Verrohrung:*
- *Anforderungen an die maximale Abweichung aus der Vertikalen, Rückholtechnik,*
 - *Handhabungs- und Einlagerungsmaschinen.*

(K1)

- (35) *Machbarkeitsnachweis:*
- *In-situ-Erprobung der Herstellbarkeit tiefer Bohrlöcher,*
 - *Entwicklung und Erprobung eines qualitätsgesicherten Einbaus von Verrohrungen.*

(K1)

- (36) *In-situ-Demonstrationsversuch zur Einlagerung*

(K2)

3.2.3 Versatzkonzept

Abhängig vom gewählten Sicherheits- und Nachweiskonzept kann dem Versatz eine wesentliche Bedeutung zukommen. Das im Rahmen der VSG entwickelte Sicherheits- und Nachweiskonzept weist Salzgrusversatz eine mit der Zeit zunehmende sicherheitstechnische Bedeutung zu. Im Hinblick auf den Nachweis, dass der Versatz diese Funktion auch erfüllen kann, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Der für das Versatzkonzept abgeleitete Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist:

a) mechanisches Verhalten

- (37) *Weiterentwicklung von Stoffmodellen zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus (feucht/trocken) und deren Implementierung in numerische Rechen-codes mit Parametrisierung von Stoffeigenschaften bis zu kleinen Porositäten als Funktion von Belastungsgeschwindigkeit, Feuchtegehalt, Porendruck und Temperatur.*

(K1)

- (38) *Parametrisierung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz als Funktion von Spannungszustand und der spezifischen Randbedingungen*

(z. B. feucht/trocken, Korngrößenverteilung) auf Basis experimenteller Untersuchungen im Labor- und Feldmaßstab.

(K1)

(39) Entwicklung eines qualifizierten Verfahrens zur gleichmäßigen Anfeuchtung von Versatz für definierte Feuchten kleiner 1 %.

(K1)

b) hydraulisches Verhalten

(40) Bestimmung von Transporteigenschaften von Salzgrus bei kleinen Porositäten für eine hydro-mechanische Modellierung; Ermittlung, ob die Feuchtemengen mobil sind und somit zu einer potenziellen Radionuklidfreisetzung beitragen können oder ob sie immobil sind, z. B. eingeschlossen bzw. an Korngrenzen gebunden. Dies umfasst die kombinierte Durchführung experimenteller Untersuchungen und anschließende gefügekundliche und geochemische/mineralogische Analyse im Mikrostrukturmaßstab.

(K1)

(41) Untersuchung der Durchlässigkeitseigenschaften von Salzgrusversatz als Funktion von Spannungszustand und zeitlicher Entwicklung: Bestimmung von Permeabilität und Diffusivität als Funktion der Porosität (und Zeit).

(K1)

(42) Systematische Ermittlung von Zweiphasenflussparametern (Sättigungabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrucke) zum Salzgrusversatz.

(K1)

(43) Weiterentwicklung und Erprobung von Einbauverfahren für Verfüll-, Verschlussmaterialien wie angefeuchteter Versatz oder Einbau der Baustoffe für den Speicherraum in den Infrastrukturbereichen mit Basalt- respektive Serpentin-Schotter sowie bei den Strecken- und Schachtverschlüssen.

(K2)

3.2.4 Verschlussbauwerke

Aus der Befassung mit dem Verschlusskonzept, abgestellt auf das zugrunde gelegte Sicherheits- und Nachweiskonzept, ergibt sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die Verschlussbauwerke:

(44) *Untersuchung der langfristigen Beständigkeit von Verschlussbauwerken im salinaren Milieu: weiterführende Untersuchungen zur Alteration der verwendeten Materialien.*

(K1)

(45) *Zur Wirkung der Kontaktzone Verschluss-Wirtsgestein (Anschluss, Auflockerung, Verheilungsphase, feucht und trocken) sind Arbeiten durchzuführen:*

- *Weiterentwicklung der Einbringtechnik,*
- *Weiterentwicklung eines Konzeptes des Schachtverschlusses mit arteigenem Material.*
- *Weiterentwicklung der Nachweismethodik der Funktionsfähigkeit der Barrieren über die jeweils zugrunde gelegten Zeiträume.*

(K1)

(46) *Entwicklung eines Versuchskonzeptes zur laborativen Ermittlung hydraulischer und geochemischer Eigenschaften von Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen und Weiterentwicklung entsprechender Modellkonzepte. Ermittlung hydraulischer und geochemischer Eigenschaften der Kontaktzonen zwischen Steinsalzkontur und Dichtelementen (Salzbeton, Sorrelbeton, Bentonit) sowie Weiterentwicklung entsprechender Modellierungskonzepte.*

(K1)

(47) *Standortspezifische Ermittlung der chemischen Parameter, die die Beeinflussung von Bentonit durch Zementphasen aus dem Schachtausbau beschreiben.*

(K1)

(48) *Hydraulische Eigenschaften von Salzgrus-versetzten Strecken und Streckenverschlüssen und die zeitliche Entwicklung der integralen Transporteigenschaften von Streckenverschlüssen einschließlich der Auflockerungszo-*

ne in Hinblick auf Strömung und Stofftransport für den Gas- und Flüssigkeitstransport.

(K1)

- (49) Umsetzung der vorgegebenen Eigenschaften für den Versatz und der Abdichtbauwerke in überprüfbare Kenngrößen für einen qualitätsgesicherten Einbau.*

(K2)

3.2.5 Rückholbarkeit

Die Rückholbarkeit ist eine neue Randbedingung, die aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ resultiert. Die Endlagerplanung musste diesbezüglich angepasst werden. Daraus resultiert weiterer Entwicklungsbedarf:

- (50) Ableitung der Anforderungen an die Ausgestaltung der Rückholbarkeit von wärmeentwickelnden Abfällen aus einem Endlager im Steinsalz:*

- Ableitung der limitierenden Faktoren für die Handhabung von Einlagerungsbehältern, z. B. Temperatur, Masse, Strahlung;*
- Ableitung der Anforderungen zur Gewährleistung der Rückholung bei hohen Umgebungstemperaturen.*

(K1)

- (51) Weiterentwicklung des Rückholungskonzeptes für endgelagerte Abfallgebände im Hinblick auf*

- die Rückholtechnik für die endgelagerten Abfallgebände,*
- den Umgang und den Verbleib zurückgeholter Abfallgebände sowie des ggf. kontaminierten Haufwerks,*
- die Entwicklung eines Notfallplans zur Vorgehensweise, falls bei der Rückholung eine Beschädigung an einem Abfallgebände auftritt oder festgestellt wird,*
- die notwendigen bergbaulichen Techniken für Rückholarbeiten bei Umgebungstemperaturen von bis zu 200 °C und*
- die Erprobung der Rückholungskonzepte in Demonstrationsvorhaben*

(K2)

Es muss vorgesehen werden, dass die rückgeholtten Behälter über Tage zwischengelagert und den Anforderungen an die Zwischenlagerung entsprechend in Transport- und Lagerbehälter verpackt werden können.

3.3 Sicherheitsanalysen

Die Szenarientwicklung und Konsequenzenanalyse betreffend wurde folgender Forschungsbedarf identifiziert:

3.3.1 Szenarientwicklung

(52) *Erarbeitung von Methoden zur Überprüfung von Szenarien im Hinblick auf die Abdeckung sicherheitsrelevanter Phänomene und Entwicklungen (ggf. unter Einbeziehung diversitärer Ansätze zur Szenarientwicklung).*

(K1)

(53) *Weiterentwicklung von Methoden, ähnlich ablaufende Entwicklungen zu gruppieren und zur umfassenden Behandlung ein repräsentatives Szenarium zu identifizieren bzw. abzuleiten.*

(K3)

(54) *Entwicklung von Methoden zur systematischen Ableitung von Rechenfällen für die numerische Modellierung aus Szenarien.*

(K3)

3.3.2 Konsequenzenanalyse

(55) *Verbesserung der Beschreibung der Mobilität von Fluiden in Sorelbeton und anderen Betonen (z. B. aus der Konditionierung oder dem Behältermaterial).*

(K1)

(56) *Verbesserung der Beschreibung der Temperaturabhängigkeiten von chemischen Prozessen im Endlager im Hinblick auf Freisetzung und Löslichkeit von Radionukliden, Sorption- und Redoxprozesse, Korrosion von Strukturteilen und deren Radionuklidfreisetzung für eine verbesserte Quelltermbe-*

schreibung sowie zur Minimierung der Unsicherheiten in der Konsequenzenanalyse.

(K1)

- (57) Berücksichtigung der geochemischen Prozesse im Zusammenhang mit der Einlagerung von Brennelementen aus Forschungs- und Versuchsreaktoren in den vorgesehenen bzw. noch vorzusehenden Behälterkonzepten zum Nachweis der Kritikalitätssicherheit.*

(K1)

- (58) Wirkung der Behälter nach Verlust ihrer Integrität in Hinblick auf die Radionuklidfreisetzung.*

(K1)

- (59) Hydromechanisch gekoppelte Modellierung der Aufsättigung von Bentonitdichtelementen.*

(K3)

Entwicklungsbedarf ergibt sich bzgl. der Berücksichtigung des 2-Phasen-Flusses bei Mehrphasen-Mehrkomponenten-Transporten in den hydraulischen Berechnungsmethoden zur Bewertung der Langzeitsicherheit:

- (60) Weiterentwicklung hydraulischer Berechnungsmethoden unter Berücksichtigung des 2-Phasen-Flusses bei extrem geringen Porositäten zur Bewertung der Langzeitsicherheit.*

(K1)

Auf die geologische Barriere eines Endlagers wirken sowohl hydraulische Drücke als auch Gasdrücke. Im Ergebnis der für die VSG durchgeführten Analysen wird deutlich, dass vorrangig das Minimalspannungskriterium für den großräumigen Nachweis der Barrierenintegrität von Bedeutung ist, wobei Schichtflächen mögliche Schwachstellen in der Salzstruktur darstellen. Gleichzeitig basieren die durchgeführten Berechnungen zur Integrität der geologischen Barriere fast ausschließlich auf thermomechanischen Berechnungen ohne hydraulische Kopplung (Thermisch-hydraulisch-mechanische Prozesse (THM)). Deshalb besteht notwendiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Weiterentwicklung geomechanischer Berechnungsmethoden zur Bewertung druck-

getriebener Infiltration von Fluiden in das Salzgestein unter Berücksichtigung gekoppelter THM-Prozesse.

Die gekoppelten fluidmechanischen Prozesse sind in zukünftige Sicherheitsanalysen einzubeziehen, wobei entsprechend neueren Untersuchungen zu berücksichtigen ist, dass die Infiltration bzw. Perkolation von Fluiden im Steinsalzgebirge ganz entscheidend von der diskontinuumsmechanischen Struktur im mikro- und makroskopischen Maßstab abhängt. Daraus wird folgender Forschungsbedarf abgeleitet:

(61) *Weiterentwicklung geomechanischer Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration von Fluiden in das Steinsalz der geologischen Barriere unter Berücksichtigung von THM-Prozessen.*

(K3)

4 Empfehlungen

In diesem Kapitel werden Empfehlungen abgeleitet und dargestellt, die sich aus der Beschäftigung mit den genannten Datengrundlagen, der Endlagerplanung, den Sicherheitsanalysen sowie der Auseinandersetzung mit dem Sicherheits- und Nachweiskonzept für die zukünftigen Iterationsschritte ergeben. Ergänzend werden Empfehlungen formuliert, die aus übergeordneten Gesichtspunkten auf Basis der gewonnenen Erfahrungen im Vorhaben VSG resultieren.

(E 1) Es wird empfohlen, den im Rahmen der VSG identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarf in ein systematisch periodisch fortzuschreibendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm einzubringen.

4.1 Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten sowie Endlagerkonzepten

Ziel ist, durch eine systematische anforderungsbasierte Prüfung, Auswahl und Kombination vorstellbarer Endlagerkomponenten ein anforderungsoptimiertes Sicherheits- und Nachweiskonzept sowie Endlagerkonzept als Basis für zukünftige Genehmigungsverfahren zu entwickeln.

4.1.1 Entwicklung anforderungsoptimierter Sicherheits- und Nachweiskonzepte

Es ist zu berücksichtigen, dass das im Rahmen der VSG entwickelte Sicherheitskonzept eine Möglichkeit darstellt, wie die nach den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderte Sicherheit für ein Endlager in einem Salzstock zu erreichen ist. Neben der Weiterverfolgung dieses Ansatzes wird empfohlen, auch alternative Sicherheits- und Nachweiskonzepte und hieraus abgeleitete Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzepte zu entwickeln.

Sicherheits- und Nachweiskonzepte unterliegen einer iterativen Entwicklung. Dies liegt zum einen an dem limitierten Kenntnisstand über die Standortverhältnisse und die Wirtsgesteinseigenschaften. Zum anderen sind aber auch die Behälter zur Aufnahme der Abfälle auf diese Gegebenheiten hin zu entwickeln und Machbarkeitsmöglichkeiten

und -grenzen zu prüfen. Im Hinblick auf ein Sicherheitskonzept sind die Standortgegebenheiten Randbedingung für die Entwicklung einer Strategie zum Ausschluss von Wasserzutritten bzw. zur Verhinderung oder Verzögerung einer Freisetzung.

Es ist auch zu klären, ob die Endlagerung eher flächenhaft oder die Teufe nutzend, eher möglichst räumlich konzentriert oder wärmedichteminimierend ausgelegt werden soll.

Nachdem diese Untersuchungen und Entwicklungen durch das Vorhaben VSG soweit weiterentwickelt wurden, dass die Standortgegebenheiten auf der Basis der durchgeführten Erkundung beschrieben werden können, und die Konzeptentwicklungen zu Abfallfixierung, Behälter, Einlagerungs- und Verschlusstechnik einen bewertbaren Stand erreicht haben, kann unter Nutzung der Ergebnisse von Sicherheitsanalysen ein optimiertes Sicherheitskonzept entwickelt werden. Das Sicherheitskonzept beschreibt die Strategie, mit der Sicherheit erreicht wird und worauf der Sicherheitsnachweis für den Standort basieren soll. Auf dieser Grundlage ergeben sich dann die Anforderungen an das Nachweiskonzept.

(E 2) Da es in der Regel mehrere alternative Möglichkeiten für ein Sicherheitskonzept gibt, sollten diese alternativen Möglichkeiten dargestellt werden und das gewählte Sicherheits- und Nachweiskonzept anforderungsorientiert begründet werden.

4.1.2 Anforderungsoptimierte Entwicklung von Endlagerkonzepten

Einlagerungskonzepte

Zu den Einlagerungskonzepten gehören u. a. Handhabungseinrichtungen und Transportsysteme und -komponenten. Insbesondere in Hinblick auf ein zukünftiges Genehmigungsverfahren unter Berücksichtigung technischer Weiterentwicklungen sollten diese Systeme und Komponenten anforderungsorientiert spezifiziert werden. Hierzu gibt es folgende Empfehlung:

(E 3) Anforderungsorientierte Entwicklung von Komponenten- und Systemspezifikationen für ein- oder mehrsöhlige Streckenlagerung.

Die Endlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle ist bislang einsöhlig geplant worden. Ob ein mehrsöhliger Betrieb sicherheitstechnische Vorteile bietet, ist anhand der Sicherheitsanforderungen zu überprüfen. Auf dieser Grundlage kann dann entschieden werden, ob die Endlagerung einsöhlig oder mehrsöhlig erfolgen sollte. Gesichtspunkte dabei sind u. a. volumenbezogener Wärmeeintrag, Größe des Grubengebäudes, Wetterführung, Wärmeentwicklung während des Betriebes sowie Induzierung von Spannungen im Gebirge.

(E 4) Überprüfung des einsöhligen Endlagerkonzeptes.

Minimierung des Einlagerungsvolumens oder der Wärmestromdichte

Das Endlagerkonzept ist im Rahmen der VSG dahingehend optimiert, dass eine minimale Einlagerungsfläche bzw. ein minimales Einlagerungsvolumen in Anspruch genommen wird. Damit konnte gezeigt werden, dass sämtliche wärmeentwickelnden Abfälle im Endlager unter standortspezifischen Verhältnissen untergebracht werden könnten. Insofern ist die Einlagerung unter dem Kriterium einer minimalen Endlagerfläche optimiert worden. Ein anderes mögliches Kriterium stellt die Minimierung der Gebirgsspannung dar. Dieses Kriterium könnte zur Forderung einer Minimierung der Wärmestromdichte führen.

Für die folgenden Iterationsschritte beim Sicherheitsnachweis sollte deshalb das Auslegungskriterium der Einlagerungsdichte anforderungsorientiert abgeleitet und begründet werden.

(E 5) Optimierung des Endlagerkonzeptes unter dem Aspekt der Einlagerungsdichte und ggf. konkurrierender Anforderungen.

Streckenlagerung von Endlagerbehältern oder Einbringung in kurze Bohrlöcher

Die bisherigen Einlagerungskonzepte gehen von einer Streckenlagerung der POLLUX®- oder CASTOR®-Behälter aus. Da die Strecken vergleichsweise große Querschnitte aufweisen, käme auch als Alternative eine Lagerung dieser Behälter in kurzen horizontalen Bohrlöchern in Betracht, die dann mittels eines Bohrlochverschlusses gegenüber dem Grubengebäude kurzfristig wirksam verschlossen und abgedichtet werden können. Diese Variante ist technisch aufwendiger, könnte aber Vorteile bei der gestaffelten Wirksamkeit der Barrieren aufweisen.

Dies sollte in zukünftigen Sicherheitsbetrachtungen anforderungsorientiert analysiert werden.

(E 6) Anforderungsorientierte Überprüfung des Streckenlagerungs-konzeptes unter Berücksichtigung einer Einlagerung in kurzen horizontalen Bohrlöchern.

Anzahl der Schächte

Im Hinblick auf die Minimierung potenzieller Wegsamkeiten wurde bislang die Anzahl der Schächte in Deutschland auf die nach Bergrecht minimal erforderliche Anzahl von zwei Schächten begrenzt. Es könnte sich als sicherheitstechnisch vorteilhaft herausstellen, die Wetterführung für den Abfallgebindertransport im Schacht von der übrigen Bewetterung zu trennen. Dann könnte der für den Abfallgebindertransport genutzte Schacht im Hinblick auf die Wetterführung hermetisiert werden, was bei einem Gebindeabsturz die Auswirkungen auf den Schacht begrenzen könnte. Ebenso sind die Einbauten dieser sicherheitstechnisch bedeutenden Einrichtung dann nicht in gleichem Maße den Korrosionseinwirkungen durch die Feuchte ausgesetzt. Insofern sollte die Anzahl der Schächte unter dem Aspekt der sicherheitstechnischen Optimierung überprüft werden.

(E 7) Sicherheitstechnische Überprüfung des Konzeptes eines separaten Schachtes für den Abfallgebindertransport.

4.1.3 Behälterkonzept

Die Behälter haben die Funktion, in der Betriebsphase die Handhabung und Transport der Abfälle zu ermöglichen. Sie dienen auch dem sicheren Einschluss der Radionuklide. Auch die Unterkritikalität muss dauerhaft sichergestellt werden. Daneben sollen die Behälter die Anforderungen im Hinblick auf die Rückholung und Bergung erfüllen können.

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit sollen die Behälter ihre Rückhaltefunktion solange erfüllen, bis andere Barrieren die Funktion des sicheren Einschlusses übernehmen.

Nachdem diese Anforderungen in einer sicherheitsanalytisch abgeleiteten ersten Iteration erarbeitet sind, können die Behälter daraufhin geprüft werden, ob sie die Anforder-

rungen erfüllen. Ansonsten sind sie anforderungsorientiert zu optimieren. Es ergibt sich folgende Empfehlung:

(E 8) Weiterentwicklung anforderungsoptimierter Endlagerbehälter.

4.2 Endlagerkonzept und Rückholbarkeit

Aus der Rückholbarkeit ergeben sich Anforderungen an die Behälter für die Strecken- und Bohrlochlagerung, aber ggf. auch an die Behälterbeladung bzgl. einer Begrenzung der Wärmeerzeugung. Die hierzu im Vorhaben VSG entwickelten, prototypischen Rückholungskonzepte sollten weiterentwickelt werden.

(E 9) Weiterentwicklung und Optimierung von Endlagerkonzepten hinsichtlich der Rückholbarkeit.

Als Konsequenz aus der Rückholbarkeit sind weiterhin vorzusehen:

- übertägige Konditionierungseinrichtung zur Prüfung der Transport- und Lagerfähigkeit der Abfallbehälter und der Möglichkeit der Umladung,
- die Lagermöglichkeiten für die rückgeholten Behälter ggf. durch Vorhaltung der zentralen bzw. dezentralen Zwischenlager,
- Vorhaltung von Behältern zur Aufnahme der Brennstäbe/Brennelemente/Kokillen bei Defekten der rückgeholten Behälter.

Es sollte regulatorisch festgelegt werden, ob diese Konsequenzen erst nach der Entscheidung zur Rückholung umgesetzt werden müssen.

(E 10) Berücksichtigung der Konsequenzen aus der Anforderung der Rückholbarkeit in Hinblick auf die Handhabung, die Konditionierung und den Verbleib der rückgeholten Abfälle.

4.3 Methodisches Vorgehen bei der Erkundung

Die Erkundung des Salzstocks Gorleben ist gekennzeichnet von einer sehr detaillierten Untersuchung des Erkundungsbereiches 1. Gleichzeitig ist der Kenntnisstand über den Aufbau des Salzstocks insbesondere im Hinblick auf die Beantwortung der Frage, ob

überhaupt hinreichend nutzbares Steinsalz zur Verfügung steht und ob in der weiteren Erstreckung nach Nord-Osten andere der Eignung möglicherweise entgegenstehende Befunde vorliegen, demgegenüber nachrangig behandelt worden. Dies führt dazu, dass die Fragen, ob der Salzstock hinreichend Endlagervolumen zur Aufnahme sämtlicher Abfälle aufweist und ob andere der Eignung entgegenstehende Befunde ausgeschlossen werden können, erst sehr spät beantwortet werden können.

Dieses Vorgehen birgt ein hohes zeitliches und finanzielles Risiko, da die Eignungsfrage erst sehr spät geklärt werden kann.

(E 11) Das Erkundungskonzept sollte so orientiert werden, dass möglichst frühzeitig wesentliche die Eignung tangierende Erkenntnisse gewonnen werden können. Dazu gehört die Strategie von der großräumigen zur kleinräumigen Erkundung. Vorrang sollte zunächst die Erkundung des großräumigen Aufbaus des Wirtsgesteins besitzen, um Fragestellungen des hinreichenden Volumens, des Vorhandenseins von Klüften und Einschlüssen klären zu können, um damit den Nachweis der Grundvoraussetzungen für die Eignung zu ermöglichen.

Für zukünftige Erkundungsprojekte wird der frühzeitige Einsatz seismischer Verfahren von über und unter Tage und die großräumige untertägige Erkundung in der Fläche und Teufe empfohlen, um die Frage des Internaufbaus eines Salzstocks zur Klärung der nutzbaren Steinsalzvolumina vorrangig zu klären.

Zur Bewertung der Eignung einer geologischen Struktur als Endlager für radioaktive Abfälle ist die Kenntnis der jeweiligen Untergrundsituation erforderlich. Zur dreidimensionalen Abbildung der Gesamtstruktur liefert hierzu die 3D-Seismik die besten Voraussetzungen. Der nachfolgend genannte Punkt wird deshalb auch für den Standort Gorleben empfohlen und für die Erkundung neuer Standorte im Steinsalz als notwendig für zukünftige Sicherheitsanalysen betrachtet.

(E 12) Frühzeitige Erfassung des Internaufbaus des Endlagerstandortes durch Anwendung der Methode der 3D-Seismik.

4.4 Iterative Durchführung von Sicherheitsanalysen

Sicherheitsanalysen stellen auf jeder Verfahrensstufe ein wichtiges und international übliches Instrument zur Festlegung der weiteren Schritte zur Endlagerplanung und der dafür notwendigen Erkundung dar. Damit sind die Sicherheitsanalysen eine verfahrens- und erkundungslenkende Maßnahme. Sie sind ein geeignetes Werkzeug, auf der Grundlage des Erkenntnisstandes die Frage der Zielführung des bestehenden Sicherheits- und Nachweiskonzeptes zu bewerten und den zukünftigen Forschungs-, Entwicklungs- und Erkundungsbedarfs zu spezifizieren. Deshalb wird empfohlen, Sicherheitsanalysen iterativ – mindestens aber nach jeweils sieben Jahren – durchzuführen.

Im Hinblick auf eine transparente Bewertung der Ergebnisse sollten diese Sicherheitsanalysen einer externen Überprüfung unterzogen werden. Hier bietet sich die Überprüfung im Rahmen von Peer Reviews an. Damit wird sichergestellt, dass die Vorgehensweise einer unabhängigen Prüfung unterzogen wird.

(E 13) Iterative Aktualisierung der Sicherheitsanalysen nach jeweils maximal sieben Jahren.

4.5 Berücksichtigung von Art und Umfang vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle

Die gemeinsame Einlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen mit wärmeentwickelnden Abfällen stellt eine Herausforderung für den Sicherheitsnachweis für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle dar. Voraussetzung für einen Sicherheitsnachweis eines Endlagers ist die Kenntnis über Abfallarten und Abfallmengen. Insofern bedarf es im Hinblick auf die Planung und Durchführung eines Sicherheitsnachweises der Festlegung von Art und Menge der endzulagernden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle.

In der Bundesrepublik Deutschland ist für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle das Endlager Konrad vorgesehen. Dieses soll nach gegenwärtigem Kenntnisstand seinen Betrieb etwa 2019 aufnehmen. Die Betriebsdauer dieses Endlagers ist nicht festgelegt. Damit ist unklar, ob radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung auf Dauer an das Endlager Konrad geliefert werden sollen oder ob ab einem Zeitpunkt die danach anfallenden Abfälle in das Endlager für wärmeentwickeln-

de hochradioaktive Abfälle verbracht werden sollen oder ob ein drittes Endlager für diese Abfälle gesucht werden soll.

Für die Planung eines Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle und die Durchführung einer Sicherheitsanalyse sind Festlegungen hierzu Voraussetzung. Insofern bedarf es eines Entsorgungskonzeptes, das langfristig angelegt ist und auch die Entsorgung der dauerhaft anfallenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle langfristig in den Blick nimmt.

(E 14) Entwicklung eines langfristigen Entsorgungskonzeptes im Hinblick auf die Berücksichtigungserfordernisse vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle in einem Endlager für hochradioaktive wärmeentwickelnde Abfälle.

4.6 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Zielstellung der Erkundung ist, einerseits eine detaillierte Kenntnis über den Aufbau des Standortes zu dessen Beschreibung und Charakterisierung zu gewinnen und andererseits sämtliche für die Sicherheitsnachweise erforderliche Eingangsdaten zu erheben.

Ein gegenläufiges Ziel ist, die Durchführung von Bohrungen auf das zwingend notwendige Maß zu begrenzen und zu vermeiden, dass mögliche Einlagerungsbereiche aufgrund von Sicherheitspfeilern um die Bohrungen relevant eingeschränkt werden.

Insofern wird empfohlen, hinsichtlich der Bohrungen ein Kontrollinstrumentarium einzurichten, das sicherstellt, dass die Einwirkungen der Bohrungen auf ein zukünftiges Endlager bewertet werden und die Bohrungen auf ein begründetes Minimum begrenzt werden.

Für die Abwägung zwischen Erkundungstiefgang und Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollte ein eigenständiges Verfahren mit einem Entscheidungsträger eingerichtet werden.

(E 15) Minimierung der Durchörterung untertägiger Bereiche durch Bohrungen und Einrichtung eines formalisierten Freigabeverfahrens für die Durchführung von Bohrungen.

5 Zusammenfassung

Sicherheitsanalysen stellen ein Instrument der Bewertung der erreichbaren Sicherheit, des erreichten Standes der Planung und der Sicherheitsnachweise dar. Im Hinblick auf eine Optimierung der Planung und der Nachweisführung bedarf es der iterativen Vorgehensweise. Ein wesentliches Ergebnis der Sicherheitsanalyse ist die Identifizierung von weiterem Forschungs- und Entwicklungsbedarf und die Formulierung von Empfehlungen.

Insofern stellt die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs ein wichtiges Ergebnis der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben im Hinblick auf den gegenwärtigen Kenntnisstand über das Endlagersystem sowie die weitere Vorgehensweise für eine Standorterkundung, Laboranalysen, Methodenentwicklung und die zukünftige Nachweisführungen dar. Hierbei sind die Ergebnisse in aller Regel auch auf die Erkundung anderer Salzstandorte übertragbar.

Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurde in den jeweiligen Arbeitspaketen identifiziert und in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt. Die ausführlichen Begründungen lassen sich den jeweiligen Arbeitspaketberichten der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben entnehmen.

Ergänzt wurde dieser Katalog durch Empfehlungen, die ein zusätzliches Ergebnis der Befassung mit der Sicherheitsanalyse darstellen und die für nachfolgende Arbeiten zur Verfügung gestellt werden.

Der nicht unerhebliche Bedarf weiterer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten macht deutlich, dass bis zur genehmigungsreifen Realisierung eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle noch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten anstehen. Abschließend ist festzustellen, dass der identifizierte Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Salzstöcken im Allgemeinen gilt, und damit auch den Salzstock Gorleben umfasst.

Literaturverzeichnis

- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenari-entwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.

- /BRÄ 11/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grissemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben GRS-290, ISBN: 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2013, (in Vorbereitung).
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grissemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KUK 12/ Kukla, P.A., Pechinig, R., Urai, J.: Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-276, ISBN: 978-3-939355-52-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /MIN 10/ Minkley, W., Popp, T.: Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärme-entwickelnde Abfälle im Salzgebirge. Memo zum Arbeitspaket 9, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IFG): Köln, 2010.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wiczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wiczorek, K., Wolf, J.W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288, ISBN: 978-3-939355-64-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /PEI 12/ Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-279, ISBN 978-3-939355-55-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2012.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

**international nuclear safety
engineering GmbH**
Jesuitenstraße 4
52062 Aachen

ISBN 978-3-939355-83-0