

Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes

Bericht zum Arbeitspaket 4

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes

Bericht zum Arbeitspaket 4

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Jörg Mönig
Dieter Buhmann
André Rübel
Jens Wolf
Bruno Baltes
Frank Peiffer
Klaus Fischer-Appelt

Juni 2011

mit Corrigendum Dezember 2011
und Änderung der Vorbemerkung
Dezember 2012

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 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 Kenntnissstands 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

Corrigendum:

Gegenüber der Version vom Juni 2011 wurde folgender Fehler behoben: In der Anmerkung auf dem Innentitel wurde die FuE-Vorhaben-Nummer „UM10R03100“ durch „UM10A03200“ ersetzt.

Deskriptoren:

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Endlager, Geotechnische Barriere, Hochaktiver Abfall, Nachweis, Nachweiskonzept, Safety Case, Sicherheitskonzept, Wirtsgestein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Randbedingungen und Zielsetzungen	5
3	Sicherheitskonzept.....	9
3.1	Allgemeines	9
3.2	Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase.....	10
3.3	Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Nachverschlussphase ...	11
4	Umgang mit Ungewissheiten	17
4.1	Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG	18
4.2	Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung.....	20
4.3	Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen.....	21
4.4	Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten	22
4.5	Umgang mit Modellungewissheiten	23
4.5.1	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standort- gegebenheiten.....	23
4.5.2	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen	25
5	Nachweiskonzept.....	27
5.1	Überprüfung der Sicherheit in der Betriebsphase.....	28
5.2	Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgs- bereichs.....	28
5.3	Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeit- raum	30
5.4	Integrität der geologischen Barriere	31
5.5	Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke	32

5.6	Kritikalitätsausschluss.....	33
5.7	Einschluss der Radionuklide im ewG	34
5.7.1	Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweis- verfahren	35
5.7.2	Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaus- sage.....	36
5.8	Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien.....	39
6	Zusammenfassung	41
7	Literatur.....	43
	Abbildungsverzeichnis.....	45
	Anhang – Glossar	47

1 Einleitung

In Deutschland steht seit den siebziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts der Salzstock Gorleben als möglicher Standort für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle zur Diskussion. Seitdem wurde der Salzstock ober- und unterirdisch erkundet. Aufgrund einer Vereinbarung zwischen der damaligen Bundesregierung und den Energieversorgungsunternehmen im Oktober 2000 (Moratorium) waren die Erkundungsarbeiten seitdem unterbrochen. Im März 2010 wurde das Moratorium aufgehoben und die Erkundungsarbeiten wurden vom zuständigen Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) im Herbst 2010 wieder aufgenommen /BMU 10a/.

Im Zusammenhang mit der Aufhebung des Moratoriums wurde vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit beschlossen /BMU 10a/: „In einem mehrstufigen Verfahren soll auf der Basis einer *Sicherheitsanalyse*, eines aktualisierten Endlagerkonzeptes und eines internationalen Reviews unabhängiger Wissenschaftler zunächst geprüft werden, ob Gorleben als *Endlager* in Frage kommt.“

Im Rahmen des Forschungsvorhabens VSG sind für den Standort Gorleben keine Nachweise zu führen, wie sie in einem Genehmigungsverfahren zu erbringen wären. Allerdings ergibt sich aus der Zielsetzung des Vorhabens – einer nachvollziehbaren Eignungsprognose –, dass Überprüfungen und Bewertungen sicherheitsrelevanter Aspekte durchzuführen sind, die vergleichbare Fragestellungen betreffen und Vorgehensweisen erfordern wie bei formalen Nachweisen in einem Genehmigungsverfahren.

Im Vorhaben Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), in dessen Rahmen der vorliegende Bericht erstellt wurde, werden die Grundlagen für ein internationales Peer-Review erarbeitet. Vorrangiges Ziel des Vorhabens VSG ist eine nachvollziehbar dokumentierte Eignungsprognose für den Standort Gorleben auf der Basis einer vorläufigen standortspezifischen *Sicherheitsanalyse*. Dabei ist insbesondere die Frage zu klären, ob und gegebenenfalls unter welchen Umständen am Standort Gorleben wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (z. B. bestrahlte Brennelemente) nach den aktuellen Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums /BMU 10b/ sicher endgelagert werden könnten oder ob schon jetzt Fakten vorliegen, die gegen eine Eignung des Salzstocks sprechen. Die Arbeiten im Vorhaben VSG betreffen folgende generelle Aufgaben:

- Durchführung einer vorläufigen *Sicherheitsanalyse* mit dem Schwerpunkt auf der Langzeitsicherheit,
- Entwicklung eines Endlagerkonzeptes unter Berücksichtigung der betrieblichen Sicherheit, welches, soweit dies während der Laufzeit des Vorhabens VSG möglich ist, optimiert wird und
- Feststellung von Untersuchungs- und Erkundungsbedarf.

Bei den Arbeiten im Vorhaben VSG werden der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) zu Grunde gelegt und alle bisherigen Erkundungsergebnisse berücksichtigt. Diejenigen Erkundungsergebnisse, die bei den jetzt laufenden Erkundungsarbeiten gewonnen werden, können nur dann in das Vorhaben VSG einfließen, wenn sie in Bezug auf die laufenden Arbeiten in der VSG rechtzeitig qualitätsgesichert dokumentiert vorliegen.

Im Vorhaben VSG wird ein Sicherheits- und *Nachweiskonzept* entwickelt, dem die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU /BMU 10b/ als regulatorische Grundlage zugrunde liegen. Dabei werden nicht alle Aspekte aus den Sicherheitsanforderungen des BMU (z. B. zum Sicherheitsmanagement), die sich auf die Nachweisführung beziehen, vollumfänglich einbezogen. Das hier vorgestellte Sicherheits- und *Nachweiskonzept* bezieht sich auf die Aspekte und Anforderungen, die die technische *Sicherheit* betreffen. Aufgrund der Tatsache, dass die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ erstmalig auf einen konkreten Standort und auf Endlagerkonzepte, die im Rahmen der VSG entwickelt werden, angewendet werden, besitzt die Ableitung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes einen gewissen iterativen Charakter und wird daher über die Projektlaufzeit fortgeschrieben. Der vorliegende Zwischenbericht enthält daher zunächst die Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für die VSG.

Das *Sicherheitskonzept* beschreibt, durch welche Gegebenheiten und Maßnahmen die geforderte *Sicherheit* im technischen Sinn durch ein *Endlager* auf der Basis eines geeigneten Konzeptes am Standort Gorleben erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Das *Nachweiskonzept* für die VSG legt dar, welche Nachweise unter der Voraussetzung der Umsetzung des *Sicherheitskonzeptes* für die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen und insbesondere für den sicheren *Einschluss* der radioaktiven Abfälle im *Endlager* Gorleben zu führen sind. Zur Durchführung der VSG bedarf es der planerischen Umsetzung des *Sicherheitskonzeptes*. Dies sind insbesondere die

Planung des Endlagers sowie die Planung und Auslegung des Einlagerungskonzeptes, der Verschlussbauwerke und der Versatzmaßnahmen.

Im vorliegenden Bericht werden das Sicherheits- und das *Nachweiskonzept* beschrieben, die im Rahmen des Arbeitspaketes 4 des Vorhabens VSG entwickelt worden sind. Damit wird der Rahmen für die Arbeiten in den zentralen Arbeitspunkten des Vorhabens VSG festgelegt und somit deren inhaltliche Ausrichtung bestimmt. In diesem Bericht wird eine Reihe von Begriffen verwendet, die für das Vorhaben VSG relevant sind. Sie sind im Text *kursiv* dargestellt. Diese und weitere für die VSG relevante Definitionen sind in einem Glossar im Anhang dieses Berichtes zusammengestellt.

2 Randbedingungen und Zielsetzungen

Die nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen legen die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle fest. Dazu gehören unter anderem das Atomgesetz /AtG 10/, die Strahlenschutzverordnung /STV 08/ sowie das Bundesberggesetz /BBG 09/ mit der zugehörigen Bundesbergverordnung /ABV 09/. Sie sind somit auch für das Vorhaben VSG einschlägig; darüber hinaus sind vor allem die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU /BMU 10b/ maßgeblich. Im Vorhaben VSG sind ferner die einschlägigen internationalen Empfehlungen der ICRP, der IAEO sowie der OECD-NEA zu berücksichtigen, vor allem /IAEA 06/ sowie /NEA 04/, insbesondere soweit sie Ergänzungen oder Konkretisierungen zu den nationalen Regelungen enthalten.

In /BMU 10b/ werden für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle zwei wesentliche Schutzziele formuliert:

- Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle und
- die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Darüber hinaus werden insgesamt acht Sicherheitsprinzipien genannt, unter deren Beachtung die beiden Schutzziele zu erreichen sind. Von diesen lassen sich aus den nachfolgend genannten drei Sicherheitsprinzipien konkrete Hinweise für die Erstellung des Sicherheits- und *Nachweiskonzeptes* im Vorhaben VSG ablesen:

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden. (Sicherheitsprinzip 4.1)
- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem *Endlager* langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen. (Sicherheitsprinzip 4.2)
- Das *Endlager* ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen *Einschluss* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* in der *Nachverschlussphase* keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden. (Sicherheitsprinzip 4.6)

Außerdem muss sich das *Endlagersystem* durch *Robustheit* auszeichnen. Schließlich muss das *Sicherheitskonzept* auch eine sichere Betriebsführung des *Endlagerbergwerks* ermöglichen.

Das im Vorhaben VSG erstellte Sicherheits- und *Nachweiskonzept* dient der Konkretisierung der für das Vorhaben relevanten Vorgaben in /BMU 10b/. Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben durchgeführt:

- Entwicklung eines *Sicherheitskonzepts* zur Gewährleistung der
 - *Sicherheit* in der *Betriebsphase* und der
 - *Sicherheit* in der *Nachverschlussphase*
- Entwicklung eines *Nachweiskonzepts*
 - Festlegung von *Indikatoren* und Kriterien zur Bewertung des Einschlussvermögens, z. B. „*sicherer Einschluss*“, „*vollständiger Einschluss*“, sowie der radiologischen Sicherheit
 - für die betriebliche *Sicherheit* sind im Wesentlichen die Nachweisziele der StrlSchV einschlägig
 - für die Phase nach *Verschluss* des Endlagers wurden die *Indikatoren* und Kriterien aus den Sicherheitsanforderungen abgeleitet
 - Ausweisung der Lage und der Grenzen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (ewG)
 - Festlegung von methodischen Konzepten
 - für die Bewertung der betrieblichen Sicherheit
 - für die Bewertung der *Integrität* der geologischen *Barriere*
 - für die Bewertung der *Integrität* der geotechnischen *Barrieren*
 - für die radiologische Konsequenzenanalyse
 - für den Ausschluss der Kritikalität in allen Phasen
 - für die Bewertung der Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens

Bei der Entwicklung des Sicherheits- und *Nachweiskonzeptes* sind auch geeignete Methoden zum systematischen Umgang mit inhärenten Ungewissheiten anzuwenden. Diese Ungewissheiten betreffen u. a. die vorliegenden Standortdaten, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems über die zu betrachtenden langen Zeiträume, aber auch die Kenntnisse über die ablaufenden Prozesse.

Die Ergebnisse der Arbeiten sind im vorliegenden Bericht dokumentiert.

3 Sicherheitskonzept

3.1 Allgemeines

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ wird die Entwicklung eines *Sicherheitskonzeptes* für die *Betriebsphase* und die *Nachverschlussphase* des Endlagers gefordert. Das *Sicherheitskonzept* beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen Gegebenheiten, die technischen Maßnahmen und die ablaufenden Prozesse in ihrer Gesamtheit dazu führen, dass die *Sicherheit* im technischen Sinn erreicht wird.

Dabei muss das *Sicherheitskonzept* sowohl sicherheitsrelevante Aspekte der *Betriebsphase* als auch der *Nachverschlussphase* in einem ganzheitlichen Ansatz widerspruchsfrei berücksichtigen. Aus dem *Sicherheitskonzept* leiten sich schließlich konkrete Anforderungen an den Standort Gorleben, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die im Rahmen des Vorhabens VSG zu erbringenden Bewertungen ab. Während die Erfüllung der Anforderungen an den Standort durch seine charakteristischen Eigenschaften gewährleistet sein muss, lassen das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung gestalterische Freiheiten zur Erfüllung der Anforderungen zu.

Bei der Entwicklung des *Sicherheitskonzeptes* müssen die aktuellen natürlichen Verhältnisse sowie die zukünftigen Entwicklungen am Standort Gorleben berücksichtigt werden. In Verbindung mit einem vertieften Verständnis von möglicherweise am Standort ablaufenden Prozessen, die die *Sicherheit* des *Endlagers* beeinflussen können, werden planerisch und konzeptionell technische Maßnahmen vorgesehen, um die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen zu erreichen.

Leitgedanke bei der Entwicklung des *Sicherheitskonzeptes* ist neben der sicheren Betriebsführung des Endlagerbergwerks der *sichere Einschluss* der radioaktiven Abfälle und ihrer Inhaltsstoffe in der *Nachverschlussphase* in einem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich*, der einen ausgewiesenen Bereich um die Grubenbaue des *Endlagerbergwerks* im Salzgestein, mindestens um die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche*, darstellt. Als *sicherer Einschluss* wird der Zustand des *Endlagersystems* bezeichnet, bei dem es im *Nachweiszeitraum* allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* kommt. Dieser Ansatz basiert auf der Anforderung gemäß /BMU 10b/, dass die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem *Endlager* langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen dürfen.

3.2 Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase

Für die *Betriebsphase* werden mit dem *Sicherheitskonzept* die folgenden konkreten Zielsetzungen verfolgt, die durch die technische Auslegung von Systemen und Komponenten, ein entsprechendes Qualitätsmanagementsystem, definierte Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle, entsprechend abgestimmte Maßnahmen zur Produktkontrolle sowie eine sicherheitsgerichtete Betriebsführung erreicht werden sollen:

- Zur Handhabung in der Betriebsphase des Endlagers werden die Abfälle in Abfallbehältern dicht eingeschlossen. Die Abfallbehälter – als technische Barrieren – werden so ausgelegt, dass Betriebsstörungen zu keiner Freisetzung von Radionukliden führen.
- Das System aus Transport- und Abfallbehälter wird gegen ionisierende Strahlung ausgelegt, um die Handhabung im Transport- und Einlagerungsbetrieb sicher zu gewährleisten und im Falle von Betriebsstörungen oder Störfällen, die das Transport- und Einlagerungssystem betreffen, deren Behebung zu ermöglichen. Nach Einlagerung werden die Einlagerungsorte durch Maßnahmen wie Versatz, Streckenabmauerungen oder durch Verschlüsse derart abgeschirmt, dass aus radiologischen Gesichtspunkten ein uneingeschränkter Betrieb möglich ist.
- Die Planung sieht vor, dass bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen eine Rückholung der Abfälle möglich ist. Hierzu werden, solange die Schächte und Rampen nicht verschlossen sind, Transport- und Lagermöglichkeiten für die Rückholung der Abfälle eingeplant.
- Die Abfallbehälter werden so ausgelegt, dass für *wahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems* ihre Handhabbarkeit bei einer eventuellen *Bergung* aus dem stillgelegten und verschlossenen *Endlager* für einen Zeitraum von 500 Jahren möglich ist. Die Bergung soll möglich sein, ohne dass radioaktive Aerosole in einem Maße freigesetzt werden, die Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung erforderlich machen. Die Einlagerungsbehälter werden so ausgelegt und eingelagert, dass sie weder durch den Gebirgsdruck noch durch die sie umgebenden chemischen Verhältnisse in 500 Jahren so angegriffen werden, dass größere Mengen an Aerosolen freigesetzt würden.
- Durch eine entsprechende Beladung und Auslegung der Behälter wird die Unterkritikalität aller Abfälle stets gewährleistet.

- Die Temperaturentwicklung der Einlagerungsbehälter wird so ausgelegt, dass die Integrität des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* nicht verletzt wird. Die Oberflächentemperatur der Behälter wird durch Maßnahmen wie Beladungsdichte oder eine geeignete Zwischenlagerzeit vor Einbringung der Abfälle in das Endlagerbergwerk auf den zugelassenen Wert begrenzt. Der zulässige Wert gewährleistet, dass sich keine chemischen, mineralogischen oder geomechanischen Veränderungen der natürlichen Verhältnisse im ewG entwickeln, die integritätsgefährdend sind. Den Ungewissheiten bei der Auslegung wird durch Sicherheitszuschläge Rechnung getragen.
- Die Abfälle werden im Rückbau eingelagert, d. h. die schachtfernen *Einlagerungsfelder* werden zuerst befüllt. Die verbleibenden Hohlräume werden mit Salzgrus versetzt.
- Bereiche, in denen kerntechnische Tätigkeiten (Handhabung der Abfälle) stattfinden, sind jeweils möglichst klein zu halten und so von den übrigen Bereichen zu trennen, dass eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann. Hierzu gehört auch eine angepasste Wetterführung für die beiden Bereiche.
- Die Planung und Auslegung des Endlagers erfolgt derart, dass für den Gebindetransport in Schächten oder auf Rampen Störfälle wie
 - Förderkorbabsturz oder
 - Gebindeabsturz im Bohrloch

unwahrscheinlich sind. Ferner wird durch Planung und Auslegung des Endlagers sichergestellt, dass Störfälle, deren Eintreten nicht als unwahrscheinlich einzustufen ist, in ihren betrieblichen und radiologischen Auswirkungen begrenzt werden.

3.3 Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes für die Nachverschlussphase

Das im Vorhaben VSG entwickelte *Sicherheitskonzept* basiert unter Bezug auf die Sicherheitsanforderungen des BMU, insbesondere die Kapitel 4, Sicherheitsprinzipien, und Kapitel 8, Endlagerauslegung, darauf, einen möglichst weitgehenden, sofortigen und dauerhaften *Einschluss* der radioaktiven Abfälle im ewG zu erreichen und zu erhalten. Dies soll durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrierensystemen gewährleistet werden.

Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines *Endlagers* im Salzgestein ist die praktische Dichtheit des Salzgesteins gegenüber Fluiden. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist das visko-elastische bzw. visko-plastische Verhalten, das langfristig zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken führt, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt.

Ein Teil der technischen Maßnahmen im *Endlager* dient der Beschleunigung des auto-genen *Verschlusses* durch Konvergenz. Dies wird z. B. erreicht durch Versatz der aufgefahrenen Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* mit arteigenem Material (Salzgrus) und durch Vorsorgemaßnahmen zur Minimierung von Lösungszutritten zu den Abfällen in der Anfangsphase bis zum Erreichen des dichten Wiederverschlusses mittels schnellwirkender *Barrieren*.

Für die *Nachverschlussphase* werden mit dem *Sicherheitskonzept* folgende konkrete Zielsetzungen verfolgt:

- Die eingelagerten Abfallgebände sollen schnell vom Salzgestein eingeschlossen werden.
- Der ausgewiesene *einschlusswirksame Gebirgsbereich* bleibt im *Nachweiszeitraum* erhalten und seine Barrierefunktion wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt.
- Bei den als wahrscheinlich eingestuftem möglichen zukünftigen Entwicklungen des *Endlagersystems* erfolgt allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen.
- Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuftem möglichen Entwicklungen des *Endlagersystems* kommt es allenfalls zu einem geringen Zutritt von Lösungen zu den Abfällen.
- Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes oder die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des *Endlagerbergwerks* soweit reduziert, dass kein Frac im Salzgestein entsteht.
- Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, wird der Transport dieser Schadstoffe aus dem *einschlusswirksamen*

Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert.

- Eine Kritikalität wird durch die Einlagerungsplanung und durch entsprechende Be-
ladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter in jeder Phase der Endlager-
entwicklung ausgeschlossen.
- Auswirkungen bei einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in das
Endlager (Human Intrusion Szenarien) sowie ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten
werden durch entsprechende Auslegung des *Endlagers* nach Möglichkeit reduziert,
wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die
Langzeitsicherheit haben.

Zur Erreichung dieser Zielsetzungen werden entsprechende planerische Festlegungen
in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des *Endlagerberg-
werks* im Salzstock getroffen sowie verschiedene technische Maßnahmen vorgesehen,
die nachfolgend beschrieben sind. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer
Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des *Sicherheitskonzeptes* zu erreichen.

Die planerischen Festlegungen betreffen vor allem die Errichtung des *Endlagerberg-
werks*. Für die Auffahrung der Grubenbaue des *Endlagerbergwerks* gelten folgende
Aspekte:

- Die *Einlagerungsbereiche* werden in einer Teufenlage von mehr als 800 m und mit
großer Mächtigkeit der hangenden Salzsichten sowie mit großen Abständen zu
den Salzstockflanken errichtet. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass das
Endlagerbergwerk in dem Salzstock eingebettet liegt und große Mächtigkeiten der
Salzgesteinsbarriere zu den Seiten sowie nach oben zum Salzspiegel vorhanden
sind.
- Das *Endlagerbergwerk* wird in einem Salzstock errichtet, bei dem der natürliche
Salzstockaufstieg praktisch abgeschlossen ist. In Verbindung mit der Tatsache,
dass der Salzstock in einem tektonisch ruhigen Subsidenzgebiet liegt, kann daher
im *Nachweiszeitraum* keine nennenswerte Hebung des Endlagerhorizontes
erfolgen, die in Verbindung mit Subrosionsvorgängen oder einer glazial verstärkten
Erosion zu einer relevanten Verringerung der Barrierenmächtigkeit und möglicher-
weise in Folge zu einer Beeinträchtigung des *einschlusswirksamen Gebirgs-
bereichs* von außen führen könnte.

- Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des *Endlagerbergwerks* wird so klein wie möglich gehalten, und die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das anstehende Salzgestein und damit auf die *geologische Barriere* insgesamt minimiert.

Zusätzlich gelten besondere Festlegungen für die Auffahrung der Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche*, mit denen erreicht werden soll, dass ein direkter Lösungszutritt zu den *Einlagerungsbereichen* in die unmittelbare Nähe der Abfälle praktisch ausgeschlossen ist:

- Die *Einlagerungsbereiche* werden in einem gut charakterisierbaren Salzereich mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften aufgefahren, z. B. im Hauptsalz (z2HS). Diese Salzbereiche sollen frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sein und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen.
- Die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Tagesschächten, zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potentiellen Fließwegen für Lösungen errichtet.

Ein Teil der technischen Maßnahmen dient dazu, die unvermeidbare Durchörterung der geologischen *Barriere* schnell und wirksam abzudichten, langfristig zur Wiederherstellung ihrer *Integrität* beizutragen und Systementwicklungen zu vermeiden, bei denen es zu einer Verletzung der *Integrität* des ewG kommen kann. Im Einzelnen sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- In den Tagesschächten und in den Zugangstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den *Einlagerungsbereichen* werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet. Die *Verschlussbauwerke* müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU, insbesondere die Sicherheitsprinzipien (Kapitel 4) und die Anforderungen an die Endlagerauslegung (Kapitel 8) erfüllt sind. Auf dieser Basis werden Untergrenzen für die Zeitdauer ihrer Wirksamkeit bestimmt, die größer oder gleich der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigten Zeit sind. Bei der Auslegung der *Verschlussbauwerke* werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen

Entwicklungen während ihrer geforderten Wirkungsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt.

- Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der *Einlagerungsbereiche* werden mit kompaktierendem Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. Die Hohlraumkonvergenz wird aber mit der Zeit aufgrund des zunehmenden Stützdrucks des kompaktierenden Salzgruses verlangsamt und in ihrem Gesamtausmaß begrenzt. Der im Vergleich mit unverfüllten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck sowie der insgesamt geringere Umfang des Salzkriechens führen zu einer Reduzierung der im Gebirge induzierten Differenzspannungen. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert.
- In den Richtstrecken soll insbesondere in der Nähe der *Verschlussbauwerke* eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird für diese Bereiche der Salzgrus ggf. geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen.
- Die in das *Endlager* abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Da die Abfälle trocken eingebracht werden, erfordert diese Maßnahme vor allem betriebliche Vorkehrungen, insbesondere bei der Handhabung des bei der Auffahrung gewonnenen Salzgruses. Gegebenenfalls wird der Salzgrusversatz vor seiner Einbringung in diese Bereiche getrocknet. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im *Endlager* zu begrenzen.
- Die maximalen Temperaturen im Hauptsalz, in dem die wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Bei den vorgesehenen Sicherheitsabständen der *Einlagerungsfelder* von mindestens 50 m zu nicht-halitischen Salzschichten, zu denen auch Carnallit gehört, ist aufgrund der Begrenzung der Temperaturentwicklung in diesen Schichten sichergestellt, dass Carnallit thermisch nicht zersetzt werden kann.

4 Umgang mit Ungewissheiten

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/, ebenso wie die einschlägigen internationalen Regelwerke, fordern für die *Sicherheitsanalyse* den Umgang mit Ungewissheiten. Insbesondere wird in /BMU 10b/ im Abschnitt 7.2 „die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten“ gefordert. Des Weiteren wird für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des *Endlagers* ausgeführt: „Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen *Sicherheitsanalysen* ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.“

Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten¹ lässt sich in den folgenden Schritten zusammenfassen /VIG 07/:

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Diese Vorgehensweise ist dabei als iterativer Prozess zu verstehen, der bei jeder neuen Fassung eines *Sicherheitsnachweises* (im Sinne eines Safety Case) wiederholt werden muss. In einem frühen Stadium wird vor allem das Ziel verfolgt, die Erkundung des Standortes sowie die Auslegung des *Endlagers* zu steuern. In dieser Phase bestehen vielfältige Möglichkeiten, erkannte Ungewissheiten zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren. Allerdings werden niemals alle Ungewissheiten zu reduzieren oder gänzlich vermeidbar sein. Die Behandlung von Ungewissheiten muss deshalb stets letztendlich mit einer Würdigung der nicht vermeidbaren Ungewissheiten im Hinblick auf die Sicherheitsaussage in der Nachweisführung abgeschlossen werden. Der

¹ Auf den Begriff „Unsicherheit“, der teilweise synonym mit dem Begriff „Ungewissheit“ verwendet wird, wird hier verzichtet, da er mit der Unsicherheit im Sinne einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann.

Umgang mit Ungewissheiten erstreckt sich somit sowohl auf das *Sicherheitskonzept* als auch auf das *Nachweiskonzept*.

In einer *Sicherheitsanalyse* müssen die inhärenten Ungewissheiten im Hinblick auf die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung des *Endlagersystems*, die zukünftige Entwicklung des *Endlagersystems* aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen identifiziert und ihre Auswirkungen auf das *Endlagersystem* über den *Nachweiszeitraum* bewertet werden. Die Ungewissheiten werden in der Regel in Szenariungewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des *Endlagersystems*), Daten- und Parameterungewissheiten und Modellungewissheiten eingeteilt.

4.1 Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG

Im Vorhaben VSG ist den derzeit bestehenden Ungewissheiten Rechnung zu tragen. Eine bedeutende Quelle von Ungewissheiten im Vorhaben resultiert aus der nicht abgeschlossenen Erkundung des Standortes. Die hieraus resultierenden Kenntnislücken sind von Einfluss u. a. für die Planung, die Modellierung, die Datenbereitstellung und die Prognose der Endlagersystementwicklung.

Wesentliche Ungewissheiten im Vorhaben VSG resultieren aus folgenden Gegebenheiten:

- Der Stand der Erkundung des Standortes ist derart, dass die obertägige Erkundung als weitgehend abgeschlossen zu bezeichnen ist. Die untertägige Erkundung beschränkt sich derzeit auf einen kleinen Teilbereich des Salzkörpers.
- Der Stand der Kenntnisse über den Standort beruht auf dem heutigen Stand der Erkundung, d. h. die Charakterisierung des Standortes ist nur eingeschränkt möglich.
- Die modellhafte Vorstellung des Standortes und seiner geowissenschaftlichen Interpretation im Hinblick auf die Ziele der VSG beruhen auf dem heutigen Kenntnisstand und sind somit mit Ungewissheiten behaftet, z. B. die laterale Struktur des Salzstockes.
- Die Befunde und die Datenerhebung sind im Hinblick auf die Erfordernisse einer endgültigen Sicherheitsaussage eingeschränkt vorhanden.

- Es bestehen nur eingeschränkte Kenntnisse über das Verhalten und die Entwicklung von wesentlichen Komponenten des *Sicherheitskonzeptes* wie der geotechnischen *Barrieren*. Als Beispiel ist das Kompaktionsverhalten von Salzversatz zu nennen.
- Aufgrund der eingeschränkten Charakterisierung des Salzstockes ist die Langzeitprognose des *Endlagersystems* ebenfalls nur eingeschränkt möglich.

Um die VSG durchführen zu können, muss mit diesen Ungewissheiten in geeigneter Weise umgegangen werden. Dies geschieht beispielsweise durch plausible Annahmen oder durch Vorgaben von Prämissen, da die Ungewissheiten insbesondere aus zeitlichen Gründen nicht durch ein gezieltes F+E Programm reduziert oder beseitigt werden können.

Die VSG gründet sich auf die vorliegenden umfangreichen geowissenschaftlichen Befunde; bestehenden Ungewissheiten (z. B. zur Geologie in bisher nicht untertage erkundeten Gebirgsbereichen, zu Daten und ihren Bandbreiten, zu Prozessverläufen sowie zu Entwicklungen des Endlagerstandortes) wird durch fachlich begründete Annahmen Rechnung getragen. Diese fachlich begründeten Annahmen werden mittels Expertenurteil abgeleitet und müssen in einem späteren Standorterkundungsprogramm so weit wie möglich Bestätigung finden oder weiter untermauert werden.

Wesentliche in der VSG zugrunde gelegte fachliche Annahmen sind beispielsweise:

- Laterale Ausbildung des Salzstockes Gorleben gemäß dem Schnitt von Bornemann /BGR 03/,
- Laterale Ausdehnung der auf der Grundlage der im EB1 erhobenen Befunde ermittelten Gesteinseigenschaften in allen Teilen des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge,
- Ausreichende Mächtigkeit des Hauptsalzes der Staßfurt-Folge.

Der Umgang mit Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des *Endlagersystems* sowie mit den Daten-, Parameter- und Modellungswissheiten wird im Folgenden ausführlich behandelt.

4.2 Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung

Die zukünftige Entwicklung des Standortes ist nur eingeschränkt prognostizierbar. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen zukünftiger Ereignisse am Standort Gorleben nicht immer eindeutig bestimmbar. Dies betrifft zum Beispiel die Auswirkungen zukünftiger Kaltzeiten. Obwohl das mehrfache Auftreten solcher Kaltzeiten mit Permafrostbildung am Standort innerhalb der nächsten 1 Million Jahre als gesichert angesehen werden kann, ist eine exakte Vorhersage, wann diese auftreten und bis in welche Gebiete der mit den Kaltzeiten einhergehende Vorstoß der Inlandeisgletscher aus dem Norden führt, nicht möglich. Aus der geologischen Vergangenheit können lediglich Bandbreiten für das zyklische Auftreten der Kaltzeiten sowie die möglichen Ausprägungen, zum Beispiel die Überfahung des Standortes mit einem Inlandeisgletscher, abgeleitet werden.

Wegen der eingeschränkten Prognostizierbarkeit der tatsächlichen Entwicklung des *Endlagersystems* im *Nachweiszeitraum* wird auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder entworfen werden. Dies geschieht mit Hilfe einer *Szenarientwicklung*. Deren Ziel ist die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien zur Entwicklung des *Endlagersystems*, die für eine zuverlässige Beurteilung der *Sicherheit* des Endlagers nach dessen *Stilllegung* relevant sind. Ein *Szenarium* bildet jeweils alle oder bestimmte Aspekte einer denkbaren, zukünftigen Systementwicklung ab. Die Gesamtheit der in der *Szenarientwicklung* abgeleiteten *Szenarien* soll die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des *Endlagersystems* abdecken.

In der *Szenarientwicklung* werden aus den Kenntnissen zu den derzeitigen Standortgegebenheiten, der Analyse der geologischen Vergangenheit des Standortes (gegebenfalls auch vergleichbarer Standorte oder geologischer Situationen) und den Wechselwirkungen, die durch die Schaffung von untertägigen Hohlräumen und die Einbringung von wärmeentwickelnden hochradioaktiven und anderen Abfällen verursacht werden, denkbare zukünftige Entwicklungen des *Endlagersystems* systematisch abgeleitet. Darüber hinaus werden mögliche Abweichungen von den Auslegungsanforderungen bei den technischen Komponenten berücksichtigt.

Ein auf diese Weise abgeleitetes *Szenarium* beschreibt eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonsti-

ger Überlegungen denkbare zukünftige Entwicklung eines Teilsystems bzw. des gesamten *Endlagersystems* mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften. Ein *Szenarium* wird durch das Zusammenwirken von Merkmalen, Prozessen und Ereignissen (nach den englischen Begriffen features, events and processes zusammenfassend als *FEPs* bezeichnet) in jeweils festgelegten Ausprägungen eindeutig charakterisiert.

Die *Szenarientwicklung* wird in vier Schritten durchgeführt:

1. Zusammenstellung einer Universalliste von Eigenschaften, Prozessen und Ereignissen (*FEPs*), die an einem Endlagerstandort vorkommen,
2. Identifizierung relevanter *FEPs* zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des *Endlagersystems* (*FEP-Screening*),
3. Ableitung von Szenarien aus den relevanten *FEPs*,
4. Zuordnung der Szenarien in die Klassen „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „unwahrscheinlich“.

Für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien sind die Auswirkungen auf der Basis von quantitativen Modellrechnungen zu bewerten. Dazu werden Rechenfälle definiert, die jeweils eine modellmäßige Abstraktion eines *Szenariums* mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen. Szenarien, die der Klasse „unwahrscheinlich“ zugeordnet werden, sind gemäß /BMU 10b/ in den quantitativen Analysen nicht zu betrachten.

4.3 Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen

Stilisierte Szenarien spielen generell eine wichtige Rolle beim Umgang mit Ungewissheiten, die Entwicklungen betreffen, die kaum oder gar nicht zu prognostizieren sind. Solche Ungewissheiten sind nur eingeschränkt zu quantifizieren und sie können nicht im Rahmen einer systematischen *Szenarientwicklung* behandelt werden. Durch den Einsatz stilisierter Szenarien wird auf nachvollziehbare Weise festgelegt, wie mit diesen Ungewissheiten umgegangen wird. Beispielsweise ist die Hydrogeologie nach einer Glazialzeit mit Eisüberfahung nicht zu prognostizieren. Daher müssen für sie zur Modellierung in der Langzeitphase plausible (stilisierte) Annahmen getroffen werden.

Ein gesonderter Aspekt bei der Beurteilung der Anforderung des *Einschlusses* radioaktiver Abfälle an das *Endlagersystem* ist die Berücksichtigung zukünftiger menschlicher Handlungen, die das Potenzial haben, diesen *Einschluss* zu gefährden. Im Hinblick auf die *Sicherheit* eines *Endlagersystems* ist insbesondere das menschliche Eindringen in ein *Endlager* von Bedeutung (siehe Kap. 5.8). Es gibt aber keine wissenschaftliche Grundlage für eine belastbare Prognose der menschlichen Gesellschaft, ihrer Handlungsweisen und ihrer technologischen Fähigkeiten über einen Zeitraum hinaus, der mehr als ein paar Generationen umfasst. Ihre langfristige Entwicklung entzieht sich einer wissenschaftlich systematischen Behandlung. Generell werden daher Verhaltensweisen der Gesellschaft und der Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend der heutigen Situation unterstellt und in stilisierter Form den *Sicherheitsnachweisen* zu Grunde gelegt.

4.4 Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten

Einige Ungewissheiten, die bei der Beschreibung der ablaufenden Prozesse auftreten, ergeben sich aus Ungenauigkeiten bei der Erhebung der notwendigen Daten oder aus den für die Modellierung notwendigen Abstraktionen, vor allem bei der Parametrisierung der eingesetzten Modelle. Zu ihrer Behandlung werden diese Daten- und Parameterungewissheiten im Zusammenhang mit der Beschreibung der entsprechenden Modelle identifiziert bzw. bei der Auswertung von Modellrechenergebnissen behandelt. Dabei werden Verfahren eingesetzt, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. So werden u. a. probabilistische Verfahren zur Berücksichtigung von Parameterungewissheiten bei der Bewertung des *Einschlusses* der Radionuklide im ewG und ggf. bei der radiologischen Konsequenzenanalyse sowie Teilsicherheitsbeiwerte bei der Berücksichtigung von Ungewissheiten der Lastfälle für die geotechnischen Bauwerke eingesetzt.

Im Rahmen der VSG werden die Datenungewissheiten systematisch identifiziert und dokumentiert.

Es wird festgestellt, welche der für die *Sicherheitsanalyse* benötigten Daten vorliegen und vorhabensspezifisch erhoben wurden. Die Daten werden hinsichtlich ihrer Qualität bewertet und die mit ihnen verbundenen Ungewissheiten in Form von Bandbreiten und Wahrscheinlichkeitsverteilungen ihrer Ausprägung abgeleitet. Darüber hinaus wird festgestellt, welche der benötigten Daten bislang nicht erhoben wurden.

Daten, die für die *Sicherheitsanalyse* von Relevanz sind (z. B. zur Beschreibung von Prozessen), aber bislang nicht standortspezifisch erhoben wurden, werden mittels Expertenschätzung aus vergleichbaren Abläufen an anderen Standorten ermittelt. Dabei wird die Übertragbarkeit dieser Daten begründet. Für eine in einem Genehmigungsverfahren abschließend durchzuführende *Sicherheitsanalyse* müssten diese Daten – soweit möglich – standortspezifisch erhoben werden.

Bei der Behandlung von Parameterungewissheiten geht man der wichtigen Frage nach, wie aus den erhobenen Daten (effektive) Parameter für die Modelle abgeleitet werden. Hier ist zu bestimmen, welche Methoden zur Ermittlung der Parameter eingesetzt werden und welche zusätzlichen Ungewissheiten sich aus der Transformation der Daten in Modellparameter ergeben können.

4.5 Umgang mit Modellungewissheiten

4.5.1 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten

Wie weiter oben beschrieben, werden als Quellen von Ungewissheiten der Stand der Erkundung des Standortes, die auf diesem Stand beruhenden Standortkenntnisse sowie die daraus zu entwickelnde modellhafte Beschreibung der Standortgegebenheiten identifiziert.

Während die übertägige Erkundung weitestgehend abgeschlossen ist, liegen aufgrund des untertägigen Erkundungsstandes nur begrenzte Kenntnisse vor. Hieraus folgt, dass im Vorhaben VSG mit erheblichen Ungewissheiten, z. B. des Stoffbestandes und seiner räumlichen Verteilung im Salzstock, umzugehen ist. Eine Reduzierung dieser Ungewissheiten kann nur durch eine Untertageerkundung erreicht werden, deren Ergebnisse aufgrund des hierzu erforderlichen Zeitbedarfs innerhalb der Dauer des Vorhabens VSG nicht verfügbar sein werden.

Es ist jedoch anzumerken, dass auch nach einer umfassenden Erkundung die Kenntnisse über den Standort und seine geowissenschaftlichen Gegebenheiten mit nicht vermeidbaren Ungewissheiten behaftet bleiben werden. Dies liegt in der Natur der geowissenschaftlichen Erkundung und der Notwendigkeit begründet, Befunde, die immer

nur in Teilbereichen des Standortes erhoben werden können, auf größere räumliche Standortbereiche zu übertragen.

Im Vorhaben VSG wird wie folgt mit den derzeit sich abzeichnenden Modellungswissheiten umgegangen:

4.5.1.1 Ungewissheiten im Standortmodell

Zur Beschreibung des Standortes wird nach Stand von Wissenschaft und Technik ein geologisches Modell entwickelt, in das die heutigen Kenntnisse aus den geowissenschaftlichen Erkundungen am Standort einfließen. Für das Vorhaben VSG bedeutet dies, dass ein geologisches Modell des gesamten Salzstocks Gorleben aufgebaut wird, für das vertiefte Kenntnisse nur aus dem Bereich der Schächte, dem Infrastrukturbereich und dem Erkundungsbereich EB1 vorliegen. Für die bislang nicht erkundeten Bereiche wird eine auf Expertenschätzung beruhende modellhafte Vorstellung über den Aufbau und die Materialverteilung des Standortes entwickelt. Dies gilt insbesondere für die Struktur und den Innenaufbau des Salzstockes jenseits der bislang erkundeten Bereiche.

4.5.1.2 Ungewissheiten im Endlagermodell

Die Entwicklung eines Endlagermodells (Endlagerkonzept, Endlagerauslegung) muss auf den Vorgaben des Standortmodells aufbauen. Insofern pflanzen sich die Ungewissheiten im Standortmodell bei der Entwicklung des Endlagermodells fort. Im Rahmen des Vorhabens VSG wird ein vorläufiges Endlagermodell entwickelt, welches in das Standortmodell räumlich eingepasst wird. Der Platzbedarf für das *Endlager* ergibt sich u. a. aus dem Abfallaufkommen und den maximal zulässigen Gebirgstemperaturen.

Standortmodell und Endlagermodell stellen die Basis für die analytischen Nachweise wie etwa den Integritätsnachweis oder den Nachweis des *Einschlusses* der Radionuklide dar. Daher muss bei einer späteren Würdigung der Analyseergebnisse den Modellungswissheiten Rechnung getragen werden.

4.5.2 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen

Am Standort ablaufende Prozesse, die für die Beurteilung der Endlagersicherheit von Bedeutung sind, können im Hinblick auf ihre modellhafte Beschreibung und ihre Ungewissheit wie folgt eingeteilt werden:

- Prozesse, für die ein gutes Prozessverständnis, d. h. ein Prozessverständnis mit geringen Ungewissheiten, vorliegt und die gut modellierbar sind,
- Prozesse, für die ein gutes Prozessverständnis vorliegt, die aber nur beschränkt modellierbar sind,
- Prozesse, für die ein weniger gutes Prozessverständnis, d. h. ein Prozessverständnis mit Ungewissheiten, vorliegt.

Im ersten Fall unterliegt die Beschreibung des Prozesses keiner wesentlichen Ungewissheit, ihre Modellierung ist nicht problematisch. Im zweiten Fall können Gründe für die Beschränkung beispielsweise die Komplexität des Prozesses sein oder die Beschreibung durch Ansätze, deren Parameter für die Anwendung am Standort nicht erhoben werden können. Mit der Einschränkung der Modellierbarkeit sind Ungewissheiten verbunden. Im Vorhaben VSG wird diesen Ungewissheiten durch vereinfachte Ansätze begegnet, die den zu behandelnden Prozess im Hinblick auf die Sicherheitsaussage konservativ abbilden. Diese Vorgehensweise erfordert den Nachweis der Konservativität, was ggf. nicht immer eindeutig möglich sein wird. Die Bewertung der Konservativität muss innerhalb des Vorhabens VSG auf Expertenurteile abgestützt werden.

Im dritten Fall liegen entweder noch nicht ausreichende Untersuchungen zum Prozessverständnis vor oder aber der Prozess entzieht sich der Befunderhebung, z. B. durch eine extrem lange Versuchszeit. Diese Ungewissheiten lassen sich nur bedingt reduzieren. In den Fällen, in denen durch weitere Erkundung oder F+E das Prozessverständnis verbessert werden kann, wird im Rahmen des Vorhabens VSG diese Anforderung erhoben und dokumentiert. Die hieraus resultierenden Ergebnisse werden in der Regel dem Vorhaben nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen. Dort wo keine weitere Befunderhebung oder F+E zu vertiefenden Kenntnissen führen, werden im Rahmen des Vorhabens VSG vereinfachte Ansätze herangezogen. Die Ansätze müssen durch Expertenurteil begründet sein. Wo möglich, gelangen mehrere alternative Ansätze durch alternative Rechencodes und Anwendergruppen zur Anwendung.

Für die quantitativen Bewertungen wie etwa den Integritätsnachweis oder die Bewertung des *Einschlusses* der Radionuklide werden zur Umsetzung der Modelle und Prozesse in Rechenmodelle qualifizierte, d. h. für die hier ausgewiesenen Einsatzbereiche verifizierte und validierte Rechenverfahren und Stoffgesetze herangezogen.

Letztlich müssen im Rahmen des Vorhabens VSG bei der Sicherheitseinschätzung eines potenziellen *Endlagers* am Standort Gorleben die Ungewissheiten angemessen berücksichtigt werden.

5 Nachweiskonzept

Das *Nachweiskonzept* beschreibt detailliert die Vorgehensweise, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die *Sicherheit* des *Endlagersystems* bewertet und damit Aussagen zur Eignungsprognose abgeleitet werden. Im *Nachweiskonzept* werden auf Basis des *Sicherheitskonzeptes* die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10b/ erfüllt werden. Aus dem *Nachweiskonzept* leiten sich alle Arbeiten in den Arbeitspaketen 7 bis 12 im Rahmen des Vorhabens VSG ab, die in der Synthese schließlich zu einer Gesamtaussage zusammengefasst werden. Bei einer Antragstellung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens würde das *Nachweiskonzept* beschreiben, wie die *Sicherheit* des *Endlagersystems* auf Basis des *Sicherheitskonzeptes* nachgewiesen werden soll.

Das *Nachweiskonzept* im Rahmen des Vorhabens VSG umfasst die folgenden Aspekte:

- Bewertung der *Sicherheit* in der *Betriebsphase*
- Ausweisung der Lage und Grenze des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (ewG)
- Bewertung des Erhalts des ewG im *Nachweiszeitraum*
- Bewertung der *Integrität* der geologischen *Barriere*
- Bewertung der *Integrität* der geotechnischen *Verschlussbauwerke*
- Bewertung des Kritikalitätsausschlusses
- Bewertung des *Einschlusses* der Radionuklide im ewG
- Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG
- Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Im Folgenden wird auf jeden dieser Aspekte ausführlich eingegangen. Alle Aspekte sind gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ für sämtliche Szenarien zu bewerten, deren Eintreten als wahrscheinlich oder wenig wahrscheinlich eingestuft wird. Szenarien der Kategorie „unwahrscheinlich“ sind dagegen nicht zu betrachten. Bei

Szenarien, bei denen es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann, sind sowohl der *Lösungspfad* als auch der *Gaspfad* zu berücksichtigen.

Wenn der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung nachgewiesen werden kann, sind gemäß /BMU 10b/ die Voraussetzungen zum Nachweis des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt auch vor sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle gegeben, wobei die Nachweise selbst jedoch nach den wasserrechtlichen Bestimmungen zu führen sind. Die Nachweise gemäß den wasserrechtlichen Bestimmungen sind nicht Gegenstand des Nachweiskonzeptes für das Vorhaben VSG.

5.1 Überprüfung der Sicherheit in der Betriebsphase

Für das Vorhaben VSG ist es nicht das Ziel, alle in /BMU 10a/ angeführten *Sicherheitsnachweise* zu erbringen. Ein solches Ansinnen würde bereits daran scheitern, dass eine Anlagenplanung im notwendigen Detaillierungsgrad nicht vorliegt und im Rahmen von VSG auch nicht zu entwickeln ist.

Im Vorhaben VSG erfolgt die Überprüfung der Betriebssicherheit vor dem Hintergrund, ob das für das VSG-Vorhaben entwickelte Endlagerkonzept dem Stand von Wissenschaft und Technik entspricht und insoweit keine grundlegenden Bedenken gegen die Machbarkeit ggf. später durchzuführender *Sicherheitsnachweise* im oben angesprochenen Sinne erkennbar sind. In diese Bewertung fließen Erfahrungen mit nationalen und internationalen Endlagerplanungen sowie vorliegenden *Sicherheitsanalysen zu Endlagern* für radioaktive Abfälle ein. Als Ergebnis der Untersuchungen zur Betriebssicherheit im VSG-Vorhaben sind zu erwarten:

- Grundsätzliche Einschätzungen zur betrieblichen Sicherheit,
- Einschätzung zu einem noch bestehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarfs,
- Generische Anforderungen an Endlagerungsbedingungen.

5.2 Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ machen keine konkreten Vorgaben bzw. Einschränkungen für die Größe des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (ewG).

Allerdings würde ein ewG mit einer sehr großen räumlichen Erstreckung dem den Sicherheitsanforderungen des BMU innewohnenden Gedanken widersprechen, die Abfälle am Ort der Einlagerung zu konzentrieren. In einem Genehmigungsverfahren ist der ewG vom Antragsteller räumlich und zeitlich zu definieren.

Der ewG ist daher auch von zentraler Bedeutung für das im Vorhaben VSG verfolgte *Nachweiskonzept*. Er ist „... der Teil des *Endlagersystems*, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den *Einschluss* der Abfälle sicherstellt“ /BMU 10b/. Um diese Aufgabe leisten zu können, muss die Integrität des ewG über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben sein. Hierüber ist ein entsprechender Nachweis für die als wahrscheinlich eingestuften Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems zu führen. Unter der Voraussetzung, dass die Integrität der geologischen Barriere des ewG nachgewiesen werden kann und sich folglich keine Wegsamkeiten durch die geologische Barriere ausbilden, können Radionuklide den ewG lediglich entlang der bei der Auffahrung geschaffenen Hohlräume verlassen, sofern sie nicht durch die geotechnischen Verschlussbauwerke zurückgehalten werden.

Es ist Aufgabe im Vorhaben VSG zu untersuchen, ob auf der Grundlage der am Standort Gorleben angetroffenen geologischen Verhältnisse und in Verbindung mit dem Endlagerkonzept ein ewG identifiziert werden kann. Hierzu sind die Integritätsnachweise für die geologische Barriere und die geotechnischen Verschlussbauwerke zu führen sowie das Einschlussvermögen des ewG zu bewerten. Bei entsprechend positiven Ergebnissen können Lage und Abmessung des ewG ausgewiesen werden. Lassen die Befunde Spielräume für die Festlegung des ewG zu, d. h. gibt es mehrere sinnvolle Alternativen hinsichtlich Lage und Ausdehnung, dann erfolgt die Festlegung des ewG für die weiteren Arbeiten in VSG mittels eines Abwägungsverfahrens, welches das Einschlussverhalten, das potenzielle Freisetzungverhalten sowie die Robustheit der Integrität und des Einschlusses würdigt. Die Kriterien zur Abwägung umfassen folgende Aspekte:

1. Die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der betreffenden Gesteinsbereiche und die allgemeine Datenlage
2. Die Qualität des Einschlusses (mittels RGI; Kap. 5.7) unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Freisetzungsrechnungen

3. Die Aussagesicherheit des Integritätsnachweises unter Berücksichtigung der Ungewissheiten des Integritätsnachweises (z. B. Homogenität der geomechanischen Materialeigenschaften, Einbeziehung der Modellungsgewissheiten)

5.3 Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum

Eine zentrale Forderung im *Sicherheitskonzept* ist, dass der ausgewiesene *einschlusswirksame Gebirgsbereich* über den gesamten *Nachweiszeitraum* erhalten bleibt und seine gemäß /BMU 10/ geforderte Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird. Daher ist auch zu prüfen, ob in diesem Zeitraum die Mächtigkeit der Salzbarriere im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* durch geologische Prozesse von außen reduziert wird. Die zu betrachtenden Prozesse, die am Standort Gorleben potenziell den Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* beeinträchtigen können, wurden während der Entwicklung des *FEP-Katalogs* identifiziert. Nach heutigem Kenntnisstand sind für diese Fragestellung zu berücksichtigen:

- Subrosion,
- Erosion,
- Glazigene Rinnenbildung,
- Salzstockaufstieg (Diapirismus) sowie
- Ausbildung von Kälterissen im Salzgestein.

Um den Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* zu zeigen, muss im Rahmen der geologischen Standortprognose geprüft werden, ob die Grenzen des ewG stets im *Nachweiszeitraum* außerhalb von Salzgesteinsbereichen liegen, deren hydraulische Dichtwirkung durch geologische Prozesse beeinträchtigt ist, wobei die Ungewissheiten bezüglich der Prozesse und ihrer Ausprägungen berücksichtigt werden müssen. Von großer Bedeutung bei der Anwendung dieses Kriteriums sind beispielsweise die Subrosionsrate über den gesamten Zeitraum und die Aufstiegsrate des Hauptsalzes der Staßfurt-Serie (z2HS). Die Subrosionsrate kann sich dabei in zukünftigen Interglazialen und Glazialen unterscheiden.

5.4 Integrität der geologischen Barriere

Das unverritzte Salz im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* stellt den über den gesamten *Nachweiszeitraum* primär relevanten Teil der geologischen *Barriere* dar, der den *Einschluss* der Schadstoffe im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* sicherstellen muss. Als weiterer Teil der geologischen *Barriere* wirken die Salzpartien zwischen dem Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und den wasserführenden Schichten des Deckgebirges. Deren Aufgabe besteht vorrangig im Schutz und Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*.

Solange die *Integrität* der geologischen *Barriere* gewährleistet ist, kann ausgeschlossen werden, dass sich in ihr Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen oder für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und der Biosphäre bilden. Die *Integrität* wird mit den folgenden Kriterien überprüft:

- Dilatanzkriterium:
Der Spannungszustand muss unterhalb der Dilatanzgrenze bleiben.
- Laugendruckkriterium:
Die minimale Hauptspannung muss größer sein als der hydrostatische Druck in der entsprechenden Teufe.

Die Nachweisführung erfolgt über gebirgsmechanische, bevorzugt dreidimensionale, Modellrechnungen. Die *Integrität* bleibt erhalten, wenn beide Kriterien nicht verletzt werden. Dann ist gewährleistet, dass sich keine durchgehende Wegsamkeit von wasserführenden Schichten bis zu den Porenräumen des Grubengebäudes ausbilden.

Für die *geologische Barriere* muss weiterhin die Bedingung erfüllt werden, dass die Temperatur im Hauptsalz der Staßfurt-Serie (z2HS), in dem die wärmeentwickelnden Abfälle eingelagert werden, einen Wert von 200 °C nicht überschreitet. Diese Temperaturanforderung wird im Vorhaben VSG auf Basis der vorliegenden Daten bei der Auslegung des jeweiligen Grubengebäudes für die verschiedenen betrachteten Optionen mit Hilfe von thermomechanischen Rechnungen berücksichtigt. In einem späteren *Sicherheitsnachweis*, d. h. nach erfolgter Auffahrung des Grubengebäudes, müssten entsprechende Nachweisrechnungen mit den tatsächlichen Geometrien und aktuellen thermischen Daten für die Abfallbinde durchgeführt werden. Dies ist für die hier betrachtete Analyse nicht möglich.

5.5 Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke

Als geotechnische *Verschlussbauwerke* sind die Schachtverschlüsse und ausgewählte Streckenverschlüsse zu betrachten. Sie gewährleisten als schnell wirksame *Barrieren* im Verbund mit dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* den *Einschluss* der Abfälle in dem Zeitraum, in dem der Salzgrusversatz seine Dichtwirkung noch nicht entfaltet. Die Anforderung an ein geotechnisches *Verschlussbauwerk* ist dann erfüllt, wenn der vorgegebene hydraulische Widerstand des *Verschlusses* und die *Integrität* des Baukörpers über den vorgesehenen Wirkzeitraum gegeben sind. Der Integritätsnachweis für den Baukörper besteht aus dem Nachweis der Rissbeschränkung, dem Nachweis der chemischen Langzeitbeständigkeit und dem Nachweis der mechanischen Stabilität des Baukörpers /ISI 08/. Diese Nachweise sind für alle zu betrachtenden Lastfälle zu erbringen.

Die *Integrität* der *Verschlussbauwerke* muss mindestens über den Zeitraum gegeben sein, in dem der Salzgrusversatz im Grubengebäude noch keine ausreichende Dichtfunktion übernimmt. Die Einhaltung der Anforderungen wird bei der Auslegung der *Verschlussbauwerke* mit Modellrechnungen dadurch gezeigt, dass entweder keine oder nur sehr geringe Mengen Lösungen von außerhalb des Grubengebäudes zu den Abfällen gelangen. Dabei werden die folgenden Aspekte untersucht:

- Rissbeschränkung,
- Standsicherheit,
- Dauerhaftigkeit (Alterungsbeständigkeit),
- Integrale Permeabilität sowie
- Wahrscheinlichkeit des Ausfalls.

Mit den Rechnungen zur Ermittlung der Auslegungsanforderungen wird u. a. der Zeitpunkt ermittelt, ab dem der durch den Kompaktionsvorgang infolge von Salzkriechen verdichtete Salzgrus eine ausreichend hohe hydraulische Dichtwirkung erreicht, um einen Zutritt von nennenswerten Lösungsmengen zu den Abfällen zu verhindern. Diese Rechnungen basieren auf einem Stoffmodell, das einen phänomenologischen Zusammenhang zwischen der Porosität des Salzgruses und der zeitabhängigen Permeabilität herstellt. Bis zu dem ermittelten Zeitpunkt muss die *Integrität* der geotechnischen *Barrieren* gewährleistet sein.

Die Modellrechnungen zur Auslegung der geotechnischen *Verschlussbauwerke* enthalten Ungewissheiten. Wie oben ausgeführt, ergibt sich die Anforderung an den Wirkungszeitraum des *Verschlussbauwerks* aus der zur Kompaktion des Salzgruses benötigten Zeit. Hieraus folgt, dass zum einen das Stoffmodell für das Salzkriechen, aus dem die Hohlraumkonvergenz abgeleitet wird, zu validieren ist. Zum anderen ist die Gültigkeit der Extrapolation des Zusammenhangs zwischen Porosität und Permeabilität auf kleine Porositätswerte ungewiss: Die bei der Salzgruskompaktion unter Endlagerbedingungen erreichbaren Werte der Porosität und der Permeabilität sowie der Wert der Porosität, ab der der Versatz hydraulisch undurchlässig ist, sind nicht bekannt. Auf der Grundlage des heutigen Kenntnisstandes wird davon ausgegangen, dass bei einem angefeuchteten Versatz (etwa 1 % Feuchte) auch unter Endlagerbedingungen schnell sehr kleine Porositätswerte erreichbar sind, bei denen der Versatz als hydraulisch undurchlässig angesehen werden kann.

Neben der Erfüllung der o.g. Anforderungen muss gezeigt werden, dass die geotechnischen *Verschlussbauwerke* herstellbar sind. Außerdem ist die *Robustheit* der Bauwerke zu zeigen, d. h. die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und äußeren Einflüssen sowie die Unempfindlichkeit gegenüber Wechselwirkungen im zeitlich gestaffelten Wirken von *Barrieren*, die für kurze Zeit die *Sicherheitsfunktion* übernehmen und solchen für lange Zeit².

5.6 Kritikalitätsausschluss

In einem *Endlager* für hoch radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente befindet sich spaltbares Material. Es muss ausgeschlossen werden, dass sich dieses Material in einer kritischen Anordnung sammelt. Diese Kritikalität kann nur auftreten, wenn eine genügend große Menge an spaltbarem Material in Gegenwart einer ausreichenden Menge von Wasser (oder einem anderen Moderator) vorhanden ist. Kritische Anordnungen müssen für alle als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuft Szenarien ausgeschlossen werden /BMU 10b/.

² Der Versatz wird nicht als Barriere betrachtet, die zu Beginn in Verbindung mit dem ewG den Einschluss der Abfälle gewährleistet. Zu späten Zeiten – d. h. nach Kompaktion – übernimmt er diese Aufgabe jedoch.

Für die Bewertung des Kritikalitätsausschlusses sind die Randbedingungen und Ereignisabläufe der zu betrachtenden Szenarien zu berücksichtigen. Dies betrifft die Moderatormenge, die mit dem spaltbaren Material in Kontakt treten kann, den Zeitpunkt der möglichen Kritikalität und die Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parameterwerten. Als *Indikator* für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor k_{eff} verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen. Eine Kritikalität kann bei einem Wert

$$k_{eff} < 0,95 \quad (5.1)$$

ausgeschlossen werden.

5.7 **Einschluss der Radionuklide im ewG**

Die Bewertung des Einschlussvermögens des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* für die Radionuklide und sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle ist eines der zentralen Elemente der Eignungsprognose für den Standort Gorleben. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den *Lösungspfad* und über den *Gaspfad* für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Für alle Freisetzungen wird eine radiologische Konsequenzenanalyse durchgeführt.

Wenn die Integrität des ewG nachgewiesen werden kann, werden die Aufpunkte für die Bewertung des Einschlussvermögens des ewG entlang der Transportwege der Radionuklide festgelegt. Hierbei sind alle Wegsamkeiten, die zu einem Transport von Radionukliden aus dem ewG beitragen können, zu berücksichtigen. Zur Bewertung des Einschlussvermögens werden an den Aufpunkten die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden analysiert und im Hinblick auf ihre radiologische Konsequenz bewertet.

Wie in Kapitel 3 ausgeführt, ist der *sichere Einschluss* der radioaktiven Abfälle und ihrer Inhaltsstoffe im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* ein Leitgedanke des *Sicherheitskonzeptes*. Der *sichere Einschluss* ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind. Ein noch besseres Einschlussvermögen ist beim *vollständigen Einschluss* der

Radionuklide gegeben, bei dem überhaupt keine Radionuklide aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* freigesetzt werden.

5.7.1 Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweisverfahren

Zur Bewertung des Einschlussvermögens bietet sich der vereinfachte Nachweis für die radiologische Langzeitaussage gemäß den Sicherheitsanforderungen des /BMU 10b/ an, bei dem die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* betrachtet wird. Es ist dabei rechnerisch zu zeigen, dass für Freisetzungen – unter Berücksichtigung eines konservativen generischen Expositionsmodells – bei wahrscheinlichen Szenarien kleinere effektive Individualdosen als 0,1 mSv pro Jahr und bei weniger wahrscheinlichen Szenarien kleinere effektive Individualdosen als 1 mSv pro Jahr auftreten werden. Dabei werden Annahmen zu den Verzehrgewohnheiten und zum Entnahmebrunnen gemäß /BMU 10b/ getroffen. Die dort vorgegebene Berechnung einer Verdünnung auf Trinkwasserqualität ist jedoch nicht eindeutig, insbesondere bei diffusiven Freisetzungen aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich*.

Im Vorhaben VSG wird daher ein modifiziertes Verfahren zur Bewertung des Einschlussvermögens des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* angewendet, das auf einem Vorschlag des Vorhabens ISIBEL /ISI 10/ beruht und kompatibel mit der Vorgehensweise für den vereinfachten Nachweis nach /BMU 10b/ ist. Der im Vorhaben VSG verwendete *Indikator* zur Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen ist ein relativer Index, der das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* im Verhältnis zu einem Freisetzungswert angibt, der als geringfügig angesehen wird. Der *Indikator* wird **Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI)** genannt und ist eine dimensionslose Zahl.

Der *Indikator* RGI wird aus dem jährlichen Radionuklidstrom S [Bq/a] über den Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, d. h. bei Undurchlässigkeit der geologischen *Barriere* des ewG lediglich über das geotechnische Verschlussbauwerk am Rand des ewG, berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf einen angenommenen Wasserstrom W [m³/a] im Grundwasser verteilt. Mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren DKF [Sv/a / Bq/m³] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den *Indikator* RGI,

$$RGI = \frac{\sum_i S_i \cdot DKF_i}{W \cdot K_{RGI}} \quad (5.2)$$

Bei einem Wert für den $RGI \leq 1$ ist die Freisetzung geringfügig.

Die Berechnung des RGI-Wertes wird im Rahmen des Vorhabens VSG wie folgt durchgeführt:

- Der Grundwasserstrom W , in dem die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5000 m^3 pro Jahr ³.
- Die Dosiskonversionsfaktoren DKF werden gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 90/ ermittelt, siehe den untenstehenden Abschnitt.
- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien $0,1 \text{ mSv/a}$, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 mSv/a .

Zur Berücksichtigung von Daten- und Modellungswissheiten sind probabilistische Analysen durchzuführen.

5.7.2 Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* werden in vier Stufen bewertet, siehe Abbildung 5.1, wobei auch hydraulische Gegebenheiten im System in die Bewertung einfließen. In den ersten drei, in der Abbildung grün dargestellten Stufen, wird der *sichere Einschluss* der radioaktiven Abfälle im ewG nachgewiesen. Bei Nichteinhaltung der Schutzziele – Stufe 4 – wird das Endlagersystem als ungeeignet bewertet.

³ Dieser Wert ergibt sich aus der Annahme eines jährlichen Wasserbedarfs pro Person von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ und einer Referenzgruppe von 10 Personen gemäß /BMU 10b/.

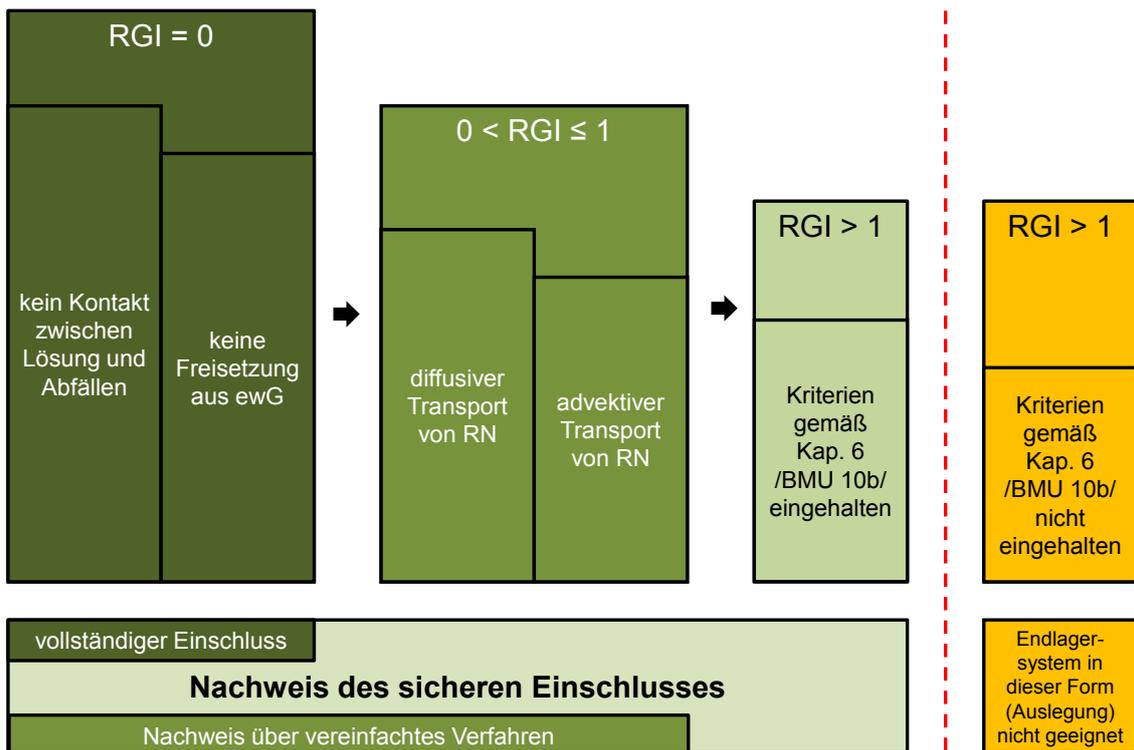


Abb. 5.1 Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage

Das optimale Einschlussvermögen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* ist gegeben, wenn es zu keinem Kontakt zwischen Lösungen und Abfällen kommt und wenn keine Radionuklide über den *Gaspfad* freigesetzt werden. Ein *vollständiger Einschluss* ist auch dann gegeben, wenn es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommt, aber keine Radionuklide aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* freigesetzt werden, weder über den Lösungs- noch über den *Gaspfad*. In diesen Fällen ist der RGI-Wert gleich 0.

Der *sichere Einschluss* der Radionuklide ist mit dem vereinfachten Verfahren nachgewiesen, wenn die aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* freigesetzten Mengen einen RGI-Wert von kleiner gleich 1 ergeben. In der Bewertung wird zusätzlich unterschieden, welche Transportprozesse vorrangig zur Radionuklidfreisetzung beitragen. Eine Freisetzung über Diffusionsprozesse wird etwas positiver bewertet als eine advektive Freisetzung.

Bei einem RGI-Wert > 1 ist die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nicht mehr möglich. In diesen Fällen ist zu prüfen, ob die Bewertungskriterien für die als *Indikator*

berechneten effektiven jährlichen Individualdosen gemäß Kapitel 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ eingehalten werden. Die durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG verursachte zusätzliche effektive Individualdosis darf maximal bei *wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems* 10 $\mu\text{Sv/a}$ und bei *weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems* 0,1 mSv/a betragen. Bei diesen Berechnungen ist auch der Transport der Radionuklide durch das Deckgebirge bis in die Biosphäre zu betrachten. Dazu ist die Hydrogeologie des Deckgebirges zu modellieren. Da über den Zustand des Deckgebirges nach einer Glazialzeit mit Eisüberföhrung keine Prognose möglich ist, wird für die Konsequenzenanalyse ein stilisiertes hydrogeologisches Deckgebirgsmodell in Ansatz gebracht. Aus den rechnerisch ermittelten Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser werden nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 90/ radiologische Konsequenzen berechnet.

Abbildung 5.2 zeigt schematisch die Expositionspfade in der Biosphäre bei Nutzung von radioaktiv kontaminiertem Grundwasser. Diese Expositionspfade werden bei der Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren betrachtet, vgl. die Angaben in /GSF 02/. Dieselben Dosiskonversionsfaktoren werden auch bei der Berechnung des RGI eingesetzt.

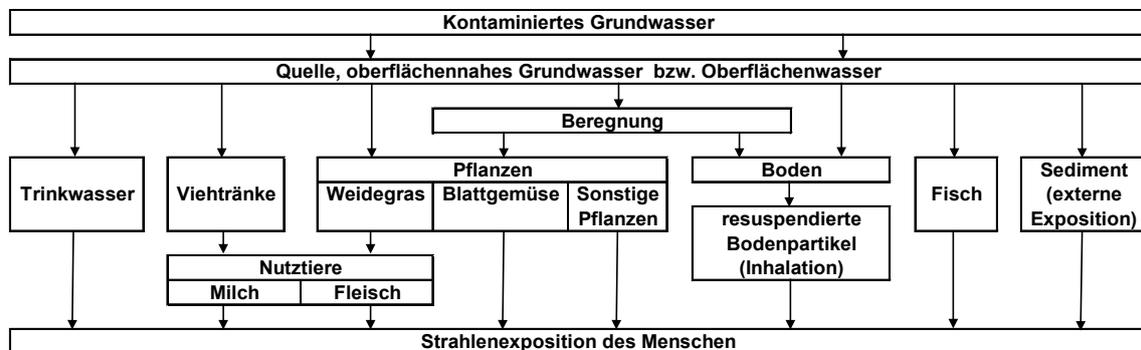


Abb. 5.2 Expositionspfade bei Nutzung radioaktiv kontaminierten Grundwassers

Wird die Unterschreitung der Bewertungskriterien gezeigt, ist der Nachweis des *sicheren Einschlusses* gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ erbracht.

Beim Nachweis des *sicheren Einschlusses* der Radionuklide kann davon ausgegangen werden, dass der sichere Einschluss auch für die sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle gegeben ist.

Bei einer Überschreitung der Bewertungskriterien gemäß den Kapiteln 6.2 und 6.3 für den *Indikator* effektive jährliche Individualdosis ist der langzeitsichere *Einschluss* der Radionuklide auf Basis des untersuchten *Endlagersystems* nicht gegeben.

5.8 Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ fordern, Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen zu analysieren, um festzustellen, ob und wenn ja welche auslegungstechnischen Optimierungsmaßnahmen möglich sind. Mögliche Ansatzpunkte für die Optimierung sind die Senkung der Eintrittswahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens oder die Verringerung der radiologischen Auswirkungen, wobei der Maßstab dafür die radiologischen Konsequenzen für die Bevölkerung und nicht für die direkt eingreifenden Personen ist. Systemimmanent reduziert die Tiefenlage des *Endlagerbergwerks* von vornherein die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten Eindringens. Im Rahmen der Optimierung des Endlagerkonzepts ist der Aspekt human intrusion jedoch nachrangig unter Beachtung der Ausgewogenheit der im Abschnitt 5.1 von /BMU 10b/ genannten Optimierungsziele, von denen insbesondere die Betriebssicherheit, der Strahlenschutz für die *Betriebsphase*, die Langzeitsicherheit und die Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen *Einschlusses* der Abfälle von Bedeutung sind, zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf das menschliche Eindringen in ein *Endlager* werden im Vorhaben VSG alle menschlichen Aktivitäten nach *Verschluss* des *Endlagerbergwerks* verstanden, die die *Barrieren* innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes oder den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* unmittelbar schädigen. Allerdings werden von den menschlichen Handlungen, die zu einem Eindringen in das *Endlager* führen, nur solche berücksichtigt, die unbeabsichtigt erfolgen. Zur Bewertung werden stilisierte Szenarien verwendet, die außerhalb der in Kapitel 3 dargestellten *Szenarientwicklung* festgelegt werden. Diese sind:

- Auffahrung eines Bergwerks im Salzstock in unmittelbarer Nähe des *Endlagers*,
- Solung einer Kaverne in unmittelbarer Nähe des *Endlagers*,
- Abteufen einer Erkundungsbohrung in den *Einlagerungsbereich*, z. B. zur Geothermie-Nutzung.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens, gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, wird in einem mehrstufigen Verfahren auf der Basis einer *Sicherheitsanalyse* und eines aktualisierten Endlagerkonzeptes geprüft, ob der Standort Gorleben für die Errichtung eines *Endlagers* in Frage kommt. Im Rahmen des Vorhabens Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) werden die Grundlagen für ein internationales Peer-Review erarbeitet. Vorrangiges Ziel des Vorhabens VSG ist eine nachvollziehbar dokumentierte Eignungsprognose für den Standort Gorleben auf der Basis eines vorläufigen Safety Case. Für das Vorhaben VSG sind vor allem die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU /BMU 10b/ sowie die einschlägigen internationalen Empfehlungen maßgeblich.

Im vorliegenden Bericht werden das *Sicherheitskonzept*, das *Nachweiskonzept* und die Methodik zum Umgang mit Ungewissheiten dargestellt. Diese Themen bilden die Basis für alle weiteren Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens VSG.

Im *Sicherheitskonzept* wird verbalargumentativ beschrieben, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und technischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu führen, dass die *Sicherheit* erreicht wird. Dabei werden sowohl sicherheitsrelevante Aspekte der *Betriebsphase* als auch der *Nachverschlussphase* in einem ganzheitlichen Ansatz widerspruchsfrei berücksichtigt. Aus dem *Sicherheitskonzept* werden konkrete Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die im Rahmen des Vorhabens VSG zu erbringenden Bewertungen abgeleitet.

Inhärente Ungewissheiten im Hinblick auf die Standortdaten, die zukünftige Entwicklung des *Endlagersystems*, aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen werden berücksichtigt. Darüber hinaus werden die Ungewissheiten der Zeitpunkte und Ausprägungen zukünftiger Ereignisse am Standort Gorleben berücksichtigt, beispielsweise im Zusammenhang mit zukünftigen Kaltzeiten. Daten-, Parameter- und Modellungsgewissheiten werden mit verschiedenen Methoden im Rahmen der Sicherheitsaussage bewertet, beispielsweise mit probabilistischen Verfahren.

Im *Nachweiskonzept* wird detailliert die Vorgehensweise dargestellt, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die *Sicherheit* des *Endlagersystems* auf Basis des *Sicherheits-*

konzeptes bewertet und damit Aussagen zur Eignungsprognose abgeleitet werden sollen. Alle Einzelaspekte werden gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU für sämtliche Szenarien bewertet, deren Eintreten als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuft wird. Die *Indikatoren* für die Bewertung der *Integrität* bzw. der Radionuklidfreisetzungen werden dargestellt; für das vereinfachte Verfahren nach /BMU 10b/ wird als *Indikator* der Radiologische Geringfügigkeitsindex RGI verwendet. Szenarien der Kategorie „unwahrscheinlich“ werden dagegen nicht betrachtet. Szenarien unbeabsichtigter menschlicher Aktivitäten nach *Verschluss* des *Endlagerbergwerks*, die die *Barrieren* innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes oder den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* unmittelbar schädigen, werden aufgrund fehlender Prognostizierbarkeit in Form von stilisierten Szenarien behandelt.

7 Literatur

- /ABV 09/ Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 22 des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /ATG 10/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Art. 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /BBG 09/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585).
- /BGR 03/ Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover 2003.
- /BMU 90/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger 42, Nr. 64a, 1990.
- /BMU 10a/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Gorleben Dialog; Pressemitteilung 037/10 v. 15.03.2010, Gorleben wird weiter erkundet: Transparenz und Verlässlichkeit des Entscheidungsprozesses stehen im Vordergrund.
- /BMU 10b/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Stand: 30. September 2010.

- /GSF 02/ Pröhl, G.; Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz. Neuherberg, 2002.
- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, ISBN 92-0-10570-9, Wien, 2006.
- /ISI 08/ Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW; ISIBEL: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
- /ISI 10/ Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW; ISIBEL: Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". Gemeinsamer Bericht GRS, DBE Technology, BGR. Braunschweig, Peine, Hannover, April 2010.
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6, Paris, 2004.
- /STV 08/ Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793).
- /MIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.-J. & Smith, R.: European Study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management, 2007.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5.1	Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage.....	37
Abb. 5.2	Expositionspfade bei Nutzung radioaktiv kontaminierten Grundwassers	38

Anhang – Glossar

Abfall,
wärmeentwickelnder,
radioaktiver

Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit einhergehende hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. Sie stellen besondere Anforderungen an ein → *Endlager* (Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Verwendung von abgeschirmten anlageninternen Transportbehältern, Anwendung spezieller Einlagerungstechniken, thermische Auslegung des → *Endlagerbergwerks*). Dazu gehören insbesondere Abfälle in Form von bestrahlten Brennelementen sowie verglaste Spaltproduktkonzentrate (ggf. gemeinsam mit Feedklärschlämmen verglast) und hochdruckverpresste Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente. Sie sind gemäß § 3 Abs. 2 Nr. 1a StrlSchV radioaktive Stoffe im Sinne des § 2 Abs. 1 des Atomgesetzes, die nach § 9a des Atomgesetzes als radioaktive Abfälle geordnet beseitigt werden müssen. /BMU 10b/

Alternativszenarium

Alternativszenarien beschreiben weniger wahrscheinliche oder im → *Referenzszenarium* nicht erfasste → wahrscheinliche Entwicklungen des → *Endlagersystems*. Solche Entwicklungen können aus dem Auftreten eines weniger wahrscheinlichen → *FEP*, der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP oder aus der Abweichung von den Prämissen der → *Szenarientwicklung* resultieren.

Barriere

Barrieren sind natürliche oder technische Komponenten des → *Endlagersystems*. Barrieren sind beispielsweise die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter, die Kammer- und Schachtverschlussbauwerke, der → *einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)* und die diesen ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten.

Eine Barriere kann verschiedene → *Sicherheitsfunktio-*

nen wahrnehmen. Die → *Sicherheitsfunktion* einer Barriere kann eine physikalische oder chemische Eigenschaft oder ein physikalischer oder chemischer Prozess sein. Beispielsweise können die Ver- oder Behinderung des Zutritts von Flüssigkeiten zu den Abfällen oder der Schutz des → *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* vor Erosion → *Sicherheitsfunktionen* sein. Elemente des → *Endlagersystems*, deren → *Sicherheitsfunktion* lediglich darin besteht, aus den Abfällen freigesetzte Stoffe zu verteilen oder zu verdünnen, werden nicht als Barrieren bezeichnet. /BMU 10b/

Bergung radioaktiver Abfälle	Als Bergung wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem → <i>Endlager</i> als Notfallmaßnahme bezeichnet. /BMU 10b/
Betriebsphase	Die Betriebsphase beginnt mit der Einlagerung der Abfälle in das → <i>Endlager</i> und endet mit dem endgültigen Verschluss der Schächte und dem Rückbau der überträgigen Anlagen im Rahmen der → <i>Stilllegung</i> . /BMU 10b/
Biosphärenmodell	Als Biosphärenmodell wird eine Rechenvorschrift bezeichnet, die zur Ermittlung des → <i>Indikators</i> „Strahlenexposition von Individuen durch aus dem → <i>Endlager</i> freigesetzte Radionuklide dient.
Dichtelement	Ein Dichtelement ist Bestandteil einer technischen → <i>Barriere</i> . Es hat die Aufgabe, gegen das Eindringen/Austreten von Fluiden einerseits und den Transport von Radionukliden andererseits zu wirken.
Einlagerungsbereich	Ein Einlagerungsbereich ist Teil eines → <i>Endlagerbergwerkes</i> , in dem radioaktive Abfälle in → <i>Einlagerungsfeldern</i> eingelagert werden und der abschließend gegen den Infrastrukturbereich und ggf. weitere Einlagerungsbereiche verschlossen wird.
Einlagerungsfeld	Ein Einlagerungsfeld ist Teil eines → <i>Einlagerungsberei-</i>

ches. Es enthält Einlagerungsstrecken und / oder -bohrlöcher und -kammern, einschließlich der Querschläge, durch die das Einlagerungsfeld an die Transportstrecken des → *Einlagerungsbereiches* angebunden ist.

Einschluss	Als Einschluss wird eine → <i>Sicherheitsfunktion</i> des → <i>Endlagersystems</i> bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen. /BMU 10b/
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des → <i>Endlagersystems</i> , der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den → <i>Einschluss</i> der Abfälle sicherstellt. /BMU 10b/
Endlager	Anlage, bestehend aus dem → <i>Endlagerbergwerk</i> und dem → <i>einschlusswirksamen Gebirgsbereich</i> .
Endlagerbergwerk	Das Endlagerbergwerk besteht aus unterschiedlichen Komponenten wie Schächten, Strecken, Kammern mit den darin eingelagerten Abfallgebänden, Versatz und → <i>Dichtelementen</i> . /BMU 10b/
Endlagersystem	Das Endlagersystem besteht aus dem → <i>Endlagerbergwerk</i> , dem → <i>einschlusswirksamen Gebirgsbereich</i> und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam sind und damit im → <i>Sicherheitsnachweis</i> zu berücksichtigen sind. /BMU 10b/

Entwicklungen,
wahrscheinliche

Wahrscheinliche Entwicklungen sind die für diesen Standort prognostizierten normalen Entwicklungen und für vergleichbare Standorte oder ähnliche geologische Situationen normalerweise beobachtete Entwicklungen. Dabei ist für die technischen Komponenten des → *Endlagers* die als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften zugrunde zu legen. Falls eine quantitative Angabe zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung möglich ist, und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf den → *Nachweiszeitraum* mindestens 10 % beträgt, gilt diese als wahrscheinliche Entwicklung. /BMU 10b/

Entwicklungen,
weniger wahrscheinliche

Weniger wahrscheinliche Entwicklungen sind solche, die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind. Für die technischen Komponenten des → *Endlagers* ist dabei eine als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften bei Eintreten der jeweiligen geologischen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind auch von der normalen Entwicklung abweichende ungünstige Entwicklungen der Eigenschaften der technischen Komponenten zu untersuchen. Rückwirkungen auf das geologische Umfeld sind zu betrachten. Abgesehen von diesen Rückwirkungen sind dabei die jeweilig erwarteten geologischen Entwicklungen zu berücksichtigen. Innerhalb einer derartigen Entwicklung ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger Fehler nicht zu unterstellen. Falls eine quantitative Angabe zur Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung oder einer ungünstigen Entwicklung der Eigenschaften einer technischen Komponente möglich ist, sind diese hier zu betrachten, wenn diese Wahrscheinlichkeit bezogen auf den → *Nachweiszeitraum* mindestens 1 % beträgt. /BMU 10b/

Entwicklungen, unwahrscheinliche	Unwahrscheinliche Entwicklungen sind Entwicklungen, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können, sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungen zugeordnet. /BMU 10b/
FEP	Die auf ein → <i>Endlagersystem</i> möglicherweise Einfluss nehmenden Faktoren werden mit dem englischen Akronym FEP bezeichnet. Das Akronym FEP steht für Features, Events und Processes.
Gaspfad	Erfolgt der Transport von Radionukliden nach deren Mobilisierung aus den Abfällen in der Gasphase, wird dieser Transportweg als Gaspfad bezeichnet.
Geologische Barriere	Geologische Gesteinseinheiten zwischen → <i>Einlagerungsbereich</i> und Biosphäre, die den Zutritt von Lösungen in das → Endlager be- oder verhindern und eine Schadstoffausbreitung be- oder verhindern.
Indikator	Bewertungsgröße zur Beurteilung einer Eigenschaft.
Integrität	Der Begriff Integrität beschreibt das Vorliegen der einschlusswirksamen Eigenschaften einer → <i>Barriere</i> .
Lösungspfad	Erfolgt der Transport von Radionukliden nach deren Mobilisierung aus den Abfällen physikalisch oder chemisch gelöst in einer wässrigen Phase, wird dieser Transportweg als Lösungspfad bezeichnet.
Nachverschlussphase	Die Nachverschlussphase beginnt nach Ende der Stilllegungsarbeiten. /BMU 10b/

Nachweiskonzept	Das Nachweiskonzept beschreibt, wie die → <i>Sicherheit</i> des → <i>Endlagersystems</i> auf Basis des → <i>Sicherheitskonzepts</i> nachgewiesen werden soll.
Nachweiszeitraum	Für den Nachweiszeitraum ist die → <i>Langzeitsicherheit</i> nachzuweisen. /BMU 10b/
Rechenfall	Ein Rechenfall ist eine modellmäßige numerische Abbildung eines → <i>Szenariums</i> oder dessen Teilaspekten mit definierten Parameterwerten, deren Bandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte.
Referenzszenarium	Das Referenzszenarium beschreibt eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungen des → <i>Endlagersystems</i> . Es ergibt sich unter vorher festgelegten Prämissen aus der Kombination der wahrscheinlichen → <i>FEPs</i> mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der einschlusswirksamen → <i>Barrieren</i> . Die Ausprägung dieser → <i>FEPs</i> ergibt sich aus den kausal mit ihnen verbundenen wahrscheinlichen → <i>FEPs</i> , wobei jeweils deren wahrscheinliche Ausprägungen zu Grunde gelegt werden.
Robustheit	Mit Robustheit wird die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der → <i>Sicherheitsfunktionen</i> des → <i>Endlagersystems</i> und seiner → <i>Barrieren</i> gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der → <i>Sicherheitsanalyse</i> gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet. /BMU 10b/
Schutzgut	Schutzgut bezeichnet das rechtlich geschützte Interesse einzelner Menschen oder Rechtspersonen, und der Gesellschaft als solcher. Als Schutzgüter werden im Zusammenhang mit der Bewertung von Auswirkungen der Endlagerung die Dinge oder Aspekte, d. h. umweltbezogene Schutzgüter, angesehen, die von den Schadstoffen

beeinträchtigt werden können. Schutzgüter sind die Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Luft, Klima, Landschaft, Kultur- und sonstige Sachgüter sowie die Wechselwirkung zwischen diesen.

Sichererer Einschluss	Als sicherer Einschluss wird der Zustand des → <i>Endlagersystems</i> bezeichnet, bei dem es im → <i>Nachweiszeitraum</i> allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem → <i>einschlusswirksamen Gebirgsbereich</i> kommt.
Sicherheit	Sicherheit im technischen Sinn ist gewährleistet, wenn die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind. /BMU 10b/
Sicherheitsanalyse	In der Sicherheitsanalyse wird das Verhalten des → <i>Endlagersystems</i> unter den verschiedensten Belastungssituationen und unter Berücksichtigung von Daten- und Modellungsgewissheiten, Fehlfunktionen sowie zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf die → <i>Sicherheitsfunktionen</i> analysiert. Sie endet mit einer Einschätzung der Zuverlässigkeit der Erfüllung der → <i>Sicherheitsfunktionen</i> und damit auch der → <i>Robustheit</i> des Endlagers (Sicherheitseinschätzung, safety assessment).
Sicherheitsfunktion	Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im → <i>Endlagersystem</i> ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der → <i>Betriebsphase</i> als auch in der → <i>Nachverschlussphase</i> des Endlagers gewährleistet. /BMU 10b/
Sicherheitskonzept	Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und tech-

nischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen dass die → *Sicherheit* erreicht wird.

Sicherheitsnachweis

Der Sicherheitsnachweis (safety case) baut auf einer umfassenden → *Sicherheitsanalyse* auf. Er umfasst die Prüfung und Bewertung von Daten, Maßnahmen, Analysen und Argumenten, die die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen und damit die → *Sicherheit* des → *Endlagers* aufzeigen. Ein umfassender Sicherheitsnachweis beinhaltet die Zusammenführung aller in den Sicherheitsanforderungen genannten Nachweise und kann mit einem dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechenden Tiefgang für verschiedene Phasen der Endlagerung geführt werden. Es wird insbesondere zwischen Sicherheitsnachweisen für die → *Betriebsphase* und für die → *Nachverschlussphase* des Endlagers unterschieden. /BMU 10b/

Stilllegung

Die Stilllegung umfasst alle nach Einstellung der Einlagerung getroffenen Maßnahmen einschließlich Verschluss des → *Endlagers* zur Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die → *Langzeitsicherheit* des → *Endlagers* gewährleistet. Zur Stilllegung können schon während der → *Betriebsphase* durchzuführende Maßnahmen (z. B. Verschlussbauwerke für befüllte Einlagerungskammern) gehören /BMU 10b/.

Szenarium

Ein Szenarium beschreibt eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger → *wahrscheinliche Entwicklung* des → *Endlagersystems* mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der → *Stilllegung* des → *Endlagers*. Diese Entwicklung wird durch die Ausgangssituation sowie durch zu künftige Ereignisse und Prozesse bestimmt. Es können auch mehrere Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst werden. /BMU 10b/

Szenarientwicklung	Die Szenarientwicklung ist die systematische Herleitung und Beschreibung der Entwicklungsmöglichkeiten des → <i>Endlagersystems</i> , die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des → <i>Endlagers</i> relevant sind. Dies geschieht auf der Grundlage eines FEP-Katalogs.
Vollständiger Einschluss	Als vollständiger Einschluss wird der Zustand des → <i>Endlagersystems</i> bezeichnet, bei dem es im → <i>Nachweiszeitraum</i> zu keiner Freisetzung von Radionukliden aus dem → <i>einschlusswirksamen Gebirgsbereich</i> kommt.
Wirtsgestein	Das Wirtsgestein umfasst alle den Salzstock aufbauenden Gesteine zwischen der Salzstockbasis und der Hutgesteinsbasis ohne die bergmännisch geschaffenen Hohlräume und deren Auflockerungszonen.

**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

ISBN 978-3-939355-47-2