

Sicherheits- und Nachweiskonzept

Bericht zum Arbeitspaket 4

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Sicherheits- und Nachweiskonzept

Bericht zum Arbeitspaket 4

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Jörg Mönig
Dieter Buhmann
André Rübel
Jens Wolf
Bruno Baltés
Klaus Fischer-Appelt

Juni 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 für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

Ursprüngliche Zielsetzung

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

Aktualisierte Zielsetzung

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

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

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

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

Aktualisierte Projektplanung

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

Projektpartner

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

Arbeitspakete

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

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

Deskriptoren:

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Endlager, Geotechnische Barriere, Hochaktiver Abfall, Nachweis, Nachweiskonzept, Sicherheitsanalyse, Salz, Sicherheitskonzept, Wirtsgestein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Randbedingungen und Zielsetzungen	7
2.1	Randbedingungen	7
2.2	Zielsetzungen	8
3	Sicherheitskonzept.....	11
3.1	Relevante Vorgaben der BMU-Sicherheitsanforderungen.....	11
3.2	Leitgedanken	14
3.3	Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase	17
3.3.1	Grundanforderung A – Einschlussgedanke.....	18
3.3.2	Grundanforderung B – Integritätsgedanke /Wartungsfreiheit	23
3.3.3	Grundanforderung C – Kritikalitätsausschluss	26
4	Nachweiskonzept.....	29
4.1	Relevante Vorgaben der BMU-Sicherheitsanforderungen.....	29
4.2	Allgemeines	35
4.3	Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.....	37
4.4	Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum.....	39
4.4.1	Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	39
4.4.2	Integrität der geologischen Barriere	40
4.4.3	Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke	41
4.5	Kritikalitätsausschluss.....	43
4.6	Einschluss der Radionuklide im ewG	44
4.6.1	Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweisverfahren für in Lösung befindliche Radionuklide.....	45
4.6.2	Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweisverfahren für gasförmig freigesetzte Radionuklide	47

4.6.3	Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage.....	48
4.7	Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien.....	51
5	Umgang mit Ungewissheiten	53
5.1	Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG	54
5.2	Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung.....	55
5.3	Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen.....	57
5.4	Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten	58
5.5	Umgang mit Modellungewissheiten	59
5.5.1	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten.....	59
5.5.2	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen	60
6	Zusammenfassung	63
	Literaturverzeichnis.....	65
	Abbildungsverzeichnis.....	69
	Anhang – Glossar	71

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 von über und unter Tage 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 (BMU) 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.“

Bei Projektbeginn lagen daher die Ziele der VSG in einer Aufbereitung und wissenschaftlich nachvollziehbaren Zusammenstellung des Erkundungsstandes zur Salzstruktur Gorleben sowie zu sicherheitsrelevanten Prozessen in *Endlagersystemen* in steilstehenden Steinsalzformationen, insbesondere als Grundlage für das geplante nachfolgende internationale Peer Review. Auf dieser Basis sollten drei übergeordnete Ziele verfolgt werden.

1. Gestützt auf die Ergebnisse von Analysen zur *Integrität* der Salzstruktur Gorleben und einer radiologischen Konsequenzenanalyse, die entlang der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung *wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* des BMU /BMU 10b/ zu bewerten sind, sollte eine vorläufige Eignungsaussage zum Standort Gorleben abgeleitet werden. Dabei war nachvollziehbar darzulegen, ob und gegebenenfalls unter welchen Umständen am Standort Gorleben *wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle* sicher endgelagert werden könnten oder ob schon jetzt Fakten vorliegen, die gegen eine Eignung des Salzstocks sprechen.
2. Da die Beurteilung eines *Endlagersystems* nicht allein auf der Basis der Standorteigenschaften, sondern nur unter Einbeziehung standortspezifisch entwickelter Einlagerungs- und Verschlusskonzepte möglich ist, sollten Endlagerkonzepte unter

Berücksichtigung der betrieblichen *Sicherheit* entwickelt werden, welche, soweit dies während der Laufzeit des Vorhabens VSG möglich ist, optimiert werden,

3. Weiterhin sollte der noch notwendige zukünftige Untersuchungs- und Erkundungsbedarf identifiziert und systematisch zusammengestellt werden.

Während der Laufzeit des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der zukünftige Standort für ein *Endlager* für *wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle* im Rahmen eines gestuften Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Vor diesem Hintergrund wurde in Abstimmung mit dem Zuwendungsgeber BMU im Rahmen des 3. Änderungsvertrages zur VSG vom 21.08.2012 vereinbart, auf eine dezidierte vorläufige Eignungsprognose mit alleinigem Fokus auf den Standort Gorleben im Rahmen des Vorhabens VSG zu verzichten. Wohl aber soll geprüft werden, 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 /BMU 10b/ zu erfüllen. In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung soll im Synthesebericht, in dem die Ergebnisse der VSG zusammenfassend gewürdigt werden, dargelegt werden, welche methodischen Ansätze der vorläufigen *Sicherheitsanalyse* zweckmäßig für einen Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können und welche technischen, konzeptionellen Überlegungen übertragbar auf Endlagerkonzepte in anderen geologischen Gesamtsituationen sind.

Als eine der ersten Arbeiten im Vorhaben VSG wurden ein Sicherheits- und ein Nachweiskonzept entwickelt, die den weiteren Arbeiten im Vorhaben VSG in den verschiedenen Arbeitspaketen zu Grunde gelegt wurden. Ein *Sicherheitskonzept* beschreibt, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte *Sicherheit* für ein *Endlager* an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Dem *Sicherheitskonzept* liegen Leitgedanken zu Grunde, die in übergeordneter und sehr qualitativer Weise beschreiben, wie im konkreten Fall die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Diese Leitgedanken werden auf Basis der vorliegenden Kenntnisse zu den im *Endlagersystem* möglicherweise ablaufenden Prozessen, die die *Sicherheit* des *Endlagers* beeinflussen können, sowie zu den geologischen Standortgegebenheiten entwickelt und sind im Kap. 3.2 dargestellt. Diese Kenntnisse stammen aus entsprechenden, zum Teil generi-

schen Forschungsarbeiten und aus Erkundungsarbeiten oder wurden in vorangehenden Analysen für diesen Standort dokumentiert.

Aus dem *Sicherheitskonzept* leiten sich 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 dessen charakteristischen Eigenschaften gewährleistet sein muss, lassen das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung gestalterische Freiheiten zur Erfüllung der Anforderungen zu.

Durch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ werden bereits bestimmte Vorgaben hinsichtlich des *Sicherheitskonzeptes* gemacht. Dies betrifft den *Einschluss* der radioaktiven Abfälle in einem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG)*, der einen definierten Bereich im Salzgestein um die Grubenbaue des *Endlagerbergwerks*, mindestens um die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* einschließt, und den Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterung der *geologischen Barriere*. Außerdem ist die *Sicherheit* des *Endlagers* nach seiner *Stilllegung* durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, dass einzelne *Barrieren* nicht ihre volle Wirkung entfalten. Vor dem Hintergrund dieser Vorgaben in /BMU 10b/ ist es nicht möglich, ein *Sicherheitskonzept* zu formulieren, bei dem die Einschlussfunktion ganz überwiegend durch *technische Barrieren* wie die Endlagerbehälter sichergestellt wird.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert. Für eine Anwendung auf einen konkreten Standort mit seiner geologischen Situation muss das *Sicherheitskonzept* im Rahmen der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen konkretisiert werden.

Bei dem im Vorhaben VSG entwickelten *Sicherheits-* und *Nachweiskonzept* wurden nicht alle Aspekte aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ (z. B. zum Sicherheitsmanagement) vollumfänglich einbezogen. Da das Vorhaben VSG nicht die *Sicherheitsanalyse* eines Vorhabensträgers ist, sondern sich eher im konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Sicherheitsanforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen, im Wesentlichen im Abschnitt 9 zum Sicherheitsmanagement, für das Vorhaben VSG nicht einschlägig. Das hier vorgestellte *Sicherheits- und Nachweis-*

konzept bezieht sich auf die Aspekte und Anforderungen, die die technische *Sicherheit* in der *Nachverschlussphase* betreffen.

Grundzüge des *Sicherheits- und Nachweiskonzeptes* für die VSG wurden im Mai 2011 in einem Zwischenbericht veröffentlicht /MÖN 11/. Da die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ im Rahmen des Vorhabens VSG erstmalig auf einen konkreten Standort angewendet wurden, für den Endlagerkonzepte zu entwickeln waren, ergab sich im Zuge der dabei gewonnenen Erfahrungen die Notwendigkeit zu Iterationsschritten. Der vorliegende Bericht stellt eine Revision des Zwischenberichtes dar. Er konkretisiert und ergänzt das *Sicherheits- und Nachweiskonzept* an verschiedenen Stellen.

Ausgehend von den Leitgedanken werden unter Berücksichtigung der Vorgaben in /BMU 10b/ zunächst Zielsetzungen für das *Sicherheitskonzept* abgeleitet. Aus diesen Zielsetzungen werden strategische planerische und technische Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet und ggf. Anforderungen an diese Maßnahmen formuliert. In ähnlicher Form werden für das *Nachweiskonzept* die erforderlichen Einzelnachweise identifiziert und die Bewertungsmaßstäbe benannt. Mit dem *Sicherheits- und Nachweiskonzept* werden in Form von überwiegend qualitativen Zielsetzungen und Maßnahmen die Sicherheitsanforderungen des BMU für die Zwecke des Vorhabens VSG präzisiert. Die auf diese Weise abgeleiteten Zielsetzungen und Maßnahmen sind auch auf andere Standorte mit Salzstöcken übertragbar, solange das jeweilige *Sicherheits- und Nachweiskonzept* auf denselben Leitgedanken basiert.

Ausgehend von den Vorgaben des *Sicherheits- und Nachweiskonzeptes* wurden in den einzelnen Arbeitspaketen der VSG die geforderten Maßnahmen, vor allem bei der Entwicklung detaillierter Endlagerkonzepte, technisch konkretisiert und in Form quantitativer Auslegungskennzahlen präzisiert. Weiterhin erfolgte in den einzelnen Arbeitspaketen, die sich mit sicherheitsanalytischen Modellrechnungen beschäftigten, eine quantitative Präzisierung der im *Nachweiskonzept* geforderten *Sicherheitsnachweise*. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt.

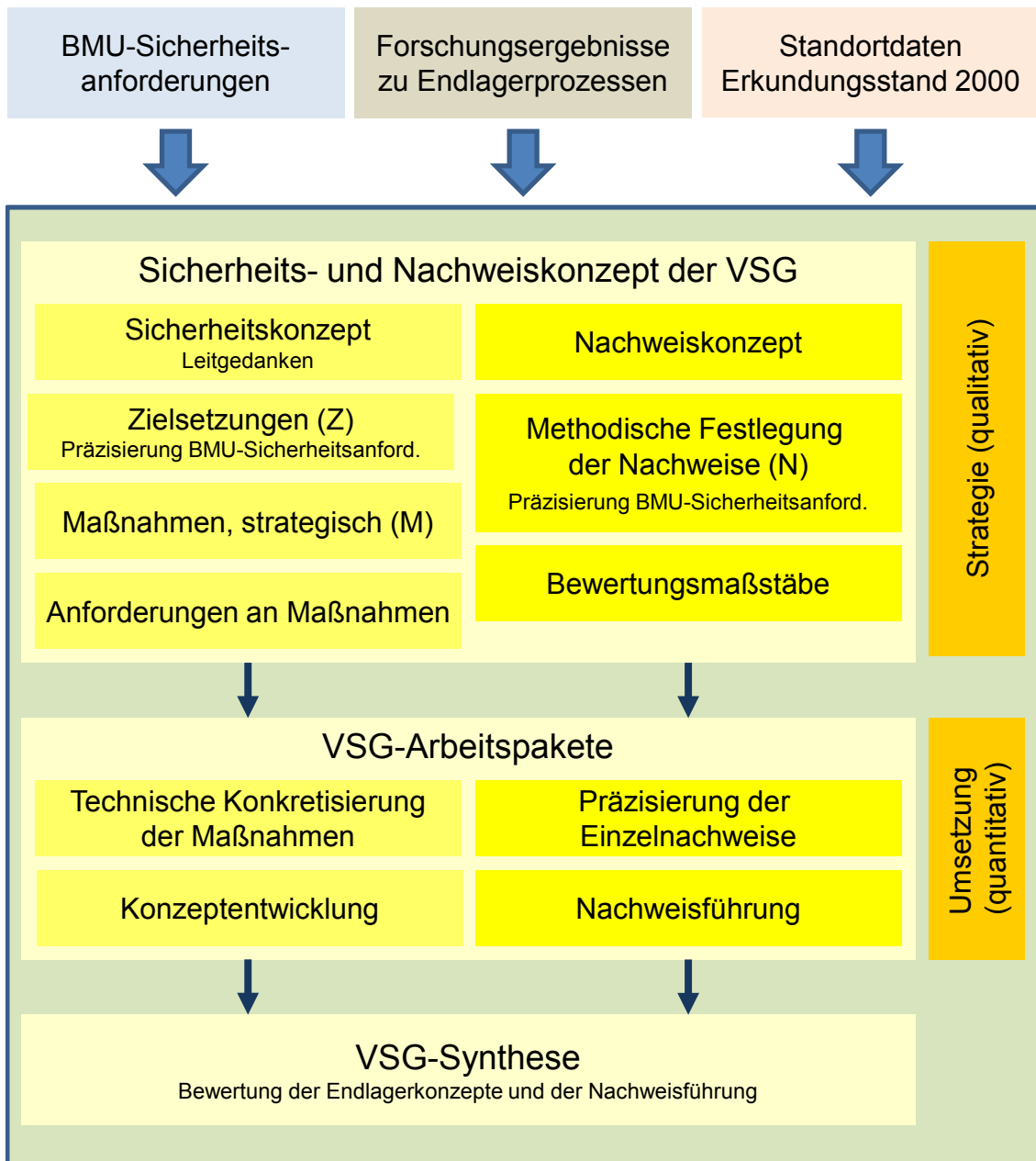


Abb. 1.1 Schematische Darstellung der Einbindung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in die VSG-Arbeiten

Das im Vorhaben VSG entwickelte *Sicherheitskonzept* ist im Detail in Kapitel 3 dargestellt. Dieses *Sicherheitskonzept* stellt eine Möglichkeit dar, die darauf ausgerichtet ist, die nach den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderte *Sicherheit* am Standort Gorleben zu erreichen. Es sind auch Modifikationen dieses *Sicherheitskonzeptes* denkbar, die teilweise auf anderen Leitgedanken basieren und ebenfalls den Anforderungen nach /BMU 10b/ gerecht werden können.

Das *Nachweiskonzept* legt dar, welche Nachweise bei der Umsetzung des *Sicherheitskonzeptes* für die Gewährleistung der *Sicherheit* zu führen sind. Dadurch werden alle zu führenden Einzelnachweise qualitativ beschrieben. Dazu gehört auch die Benennung der Bewertungsmaßstäbe, soweit derartige Festlegungen nicht durch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ oder andere regulatorische Vorgaben erfolgen. Das *Nachweiskonzept* für die VSG ist detailliert im Kapitel 4 beschrieben.

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ fordern, ebenso wie die einschlägigen internationalen Regelwerke, für eine *Sicherheitsanalyse* einen systematischen und transparenten Umgang mit inhärenten Ungewissheiten. Diese betreffen die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung zum *Endlagersystem*, die zukünftige Entwicklung des *Endlagersystems* über die zu betrachtenden langen Zeiträume, aber auch die Kenntnisse über die einzelnen am Standort ablaufenden Prozesse, ihre Beschreibung, ihr Zusammenwirken und ihre Auswirkungen auf das *Endlagersystem* über den *Nachweiszeitraum*. Der Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG wird in Kapitel 5 beschrieben.

Mit dem *Sicherheits- und Nachweiskonzept* wurde der Rahmen für die Arbeiten in den zentralen Arbeitspaketen 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 Fließtext *kursiv* dargestellt. Diese und weitere für die VSG relevante Definitionen sind in einem Glossar im Anhang dieses Berichtes zusammengestellt.

2 Randbedingungen und Zielsetzungen

2.1 Randbedingungen

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 IAEA /IAEA 11/ sowie der OECD-NEA /NEA 04/ zu berücksichtigen, insbesondere soweit sie Ergänzungen oder Konkretisierungen zu den nationalen Regelungen enthalten. Das Dokument /IAEA 11/ ist für alle Arten von Endlager, auch für oberflächennahe, formuliert worden, weshalb im Vorhaben VSG auch noch auf die früheren, spezifischeren Anforderungen für ein Endlager in tiefen geologischen Schichten /IAEA 06/ zurückgegriffen wird.

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. Aus diesen lassen sich einige konkrete Hinweise für die Erstellung des *Sicherheits- und Nachweiskonzeptes* im Vorhaben VSG ableiten. Außerdem muss sich das *Endlagersystem* durch *Robustheit* auszeichnen.

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 werden soll.

Dabei muss das *Sicherheitskonzept* sowohl sicherheitsrelevante Aspekte der *Betriebsphase* als auch der *Nachverschlussphase* in einem ganzheitlichen Ansatz widerspruchsfrei berücksichtigen. Es muss gewährleistet sein, dass gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/, Abschnitt 8.6, in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung der Abfallbehälter möglich ist. Dabei dürfen Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung getroffen werden, die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht beeinträchtigen. Die sicherheitsrelevanten Aspekte der *Betriebsphase* (Abschnitte 8.1 und 8.8 der Sicherheitsanforderungen) können dagegen nicht detailliert bewertet werden, da die Planung der Endlagerkonzepte im dazu notwendigen Detaillierungsgrad nicht vorliegt und im Vorhaben VSG auch nicht zu entwickeln ist. Es ist aber zu prüfen, ob die für die VSG entwickelten Endlagerkonzepte dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und ob aus Sicht der Betriebssicherheit grundlegende Bedenken gegen die Machbarkeit erkennbar sind.

2.2 Zielsetzungen

Das im Vorhaben VSG erstellte *Sicherheits- und Nachweiskonzept* bezieht sich im Wesentlichen auf die *Nachverschlussphase* und dient der Konkretisierung der für das Vorhaben relevanten Vorgaben in /BMU 10b/. Im Einzelnen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Entwicklung eines *Sicherheitskonzepts* zur Gewährleistung 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.
 - Festlegung der Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und der Grenzen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (ewG)

- Festlegung von methodischen Konzepten
 - 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

- Identifizierung von Maßnahmen, um durch Hinweise auf die Existenz eines *Endlagers* die *Wahrscheinlichkeit* eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* oder um die Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens zu verringern, und Ableitung möglicher Optimierungen für das Endlagerkonzept

Die Ergebnisse der Arbeiten zu diesen Aspekten sind in den folgenden Kapiteln dokumentiert.

3 Sicherheitskonzept

3.1 Relevante Vorgaben der BMU-Sicherheitsanforderungen

Im *Sicherheitskonzept* müssen für die zur Durchführung des Vorhabens VSG relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ Konkretisierungen vorgenommen werden. Für die VSG sind vor allem bestimmte Aspekte in den Abschnitten 4 (Sicherheitskriterien), 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen), 7 (Sicherheitsnachweise) und 8 (Endlagerauslegung) relevant. Da das Vorhaben VSG nicht die *Sicherheitsanalyse* eines Vorhabensträgers ist und sich eher im konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Sicherheitsanforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen (i. W. Abschnitt 9: Sicherheitsmanagement) dagegen für die VSG nicht einschlägig. Nachfolgend sind die für das Vorhaben VSG zutreffenden Bestimmungen auszugsweise zitiert (in Kursivschrift) und die entsprechenden Abschnitte angegeben, um später eine einfachere Zuordnung der für das *Sicherheitskonzept* der VSG formulierten Ziele und der daraus abgeleiteten Maßnahmen zu diesen Vorgaben zu ermöglichen:

- 4 *Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung folgender Sicherheitsprinzipien zu erreichen:*
 - 4.1 *Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.*
 - 4.2 *Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.*
 - 4.3 *Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.*
 - 4.4 *Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.*

[...]

Zur Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen sind folgende Sicherheitsprinzipien zu beachten:

- 4.6 *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.*

- 5.1 *[...] Entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses ist ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind, das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut prognostizierbar ist und die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind. [...]*

- 5.2 *Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist nachrangig zu den oben aufgeführten Optimierungszielen durchzuführen. [...]*

- 6.1 *Maßgeblich für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Nachverschlussphase ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen können. Zusätzliche Expositionen sollen nur in einem begrenzten Gebiet auftreten können, so dass möglichst wenige Personen einer Generation betroffen sein können.*

- 7.2.4 *Ausschluss von Kritikalität: Es ist zu zeigen, dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.*

- 8.2 *Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen,*

dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben.

8.3 *Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohrlöchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden. Die Tiefenlage und der Abstand sind im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen abzuleiten.*

8.5 *Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.*

8.6 *Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:*

- *Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.*
- *In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.*

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.

8.7 *Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach sei-*

ner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.

- 9.7 [...] Für die Zeit nach erfolgtem Verschluss sind administrative Vorkehrungen zu treffen, die so effektiv wie praktisch erreichbar bewirken, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschliche Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Diese Maßnahmen müssen außerdem so konzipiert sein, dass sie möglichst lange in die Zukunft wirksam bleiben.

3.2 Leitgedanken

Das im Vorhaben VSG entwickelte *Sicherheitskonzept* basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum *Sicherheitskonzept* in /BMU 10b/, auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender *Einschluss* der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden. (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- Der *Einschluss* soll dabei sofort nach Verschluss des *Endlagerbergwerks* wirksam werden und durch das *Endlagersystem* dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (→ Abschnitt 4.6 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- Der sofortige und dauerhafte *Einschluss* der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

Die *geologische Barriere* soll den *Einschluss* der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines *Endlagers* im Salzgestein ist die *geologische Barriere* im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* mit ihrer praktischen Dichtheit gegenüber Fluiden. Dazu muss die *Integrität* der *geologischen Barriere* sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* gewährleistet werden muss.

Steinsalz und Kalisalze besitzen die Fähigkeit zur bruchlosen duktilen Deformation mit gleichzeitigem Abbau lokaler Spannungen. Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell, insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit. Verheilung bedeutet, dass sich zwischen benachbarten Rissflächen wieder Kohäsion aufbaut oder aber, dass ein Riss durch Sekundärmineralisation wieder verschlossen wird. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Riss-schließungs- und Verheilungsprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins; durch In-situ-Messungen wurde eine Abnahme der Permeabilität nachgewiesen (WIE 04/).

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchfahung der *geologischen Barriere* unvermeidbar. Dadurch werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen. Außerdem wird die *geologische Barriere* in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Das visko-elastische bzw. visko-plastische Verhalten des Salzgesteins führt, allerdings erst mit der Zeit, zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt. Durch Einbringung von Versatz kann dieser Prozess unterstützt werden, wobei das Versatzmaterial langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo- und geomechanische Eigenschaften wie das unverritzte Steinsalz aufweisen sollte.

Eine Verfüllung der bergbaulich geschaffenen Hohlräume mit Versatzstoffen, die sofort nach Verschluss des *Endlagers* zu einer wirksamen Abdichtung führen, ist prinzipiell möglich. Nach dem Stand der Technik müssten dazu aber Versatzstoffe verwendet werden, die sich in ihrer Zusammensetzung deutlich vom Salzgestein der *geologischen Barriere* unterscheiden, was möglicherweise zu Wechselwirkungen führt, die langfristig die Wirksamkeit der Versatzstoffe in Frage stellen können.

Um eine dauerhafte und langzeitstabile Hohlraumverfüllung sicherzustellen, soll daher als Versatzstoff der bei der Auffahrung anfallende Salzgrus, und damit dasselbe Salzgestein wie die umgebende *geologische Barriere*, verwendet werden. Durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes entfaltet der Versatz mit der Zeit eine Dichtwirkung, die vergleichbar mit derjenigen der anstehenden, ungestörten *geologischen Barriere* ist. Die bis zum Erreichen der Endzustände erforderlichen Zeiträume liegen je nach Konvergenzrate, Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur zwischen einigen zehn bis einigen tausend Jahren. Deshalb sind zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke

wie Schacht- und Streckenverschlüsse vorgesehen, die sofort nach Verschluss des *Endlagers* eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen. Dabei muss insbesondere der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den *Einlagerungsbereichen* bereits zum Zeitpunkt des Verschlusses des *Endlagers* verhindert werden oder hinreichend klein sein.

Diese Verschlussbauwerke sind in der *Nachverschlussphase* Einwirkungen und Alterationsprozessen ausgesetzt, so dass möglicherweise die Wirksamkeit dieser Verschlussbauwerke nicht über den gesamten *Nachweiszeitraum* gegeben ist bzw. nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. So müssen die Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse mindestens solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des Versatzstoffes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass das Schutzniveau gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ erreicht wird.

Neben der Verhinderung oder Begrenzung des Lösungszutritts zu den Abfällen tragen diese und weitere *Barrieren* zum dauerhaften *Einschluss* bei, indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verhindern bzw. behindern. So verzögert die Abfallmatrix die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen.

In Abbildung 3.1 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen *Barrieren* in der *Nachverschlussphase* zeitlich wirken und sich in ihrer Wirkung ergänzen. Der Zeitpunkt $t = 0$ entspricht dem Zeitpunkt, zu dem das *Endlagerbergwerk* verschlossen wird. Die Farbintensität spiegelt für die einzelnen *Barrieren* jeweils die Zu- bzw. Abnahme ihrer Barrierenwirkung wider, die für die *geologische Barriere*, die Schacht- und Streckenverschlüsse sowie die BE-Behälter nachzuweisen ist. Die auf der logarithmischen Zeitskala dargestellten Zeitmarken dienen dabei nur einer groben Orientierung und stellen keine Anforderungen oder Vorgaben dar. Allerdings ergeben sich für die Brennelement-Behälter quantitative Anforderungen aus Abschnitt 8.6 der BMU-Sicherheitsanforderungen (siehe Kap. 3.1).

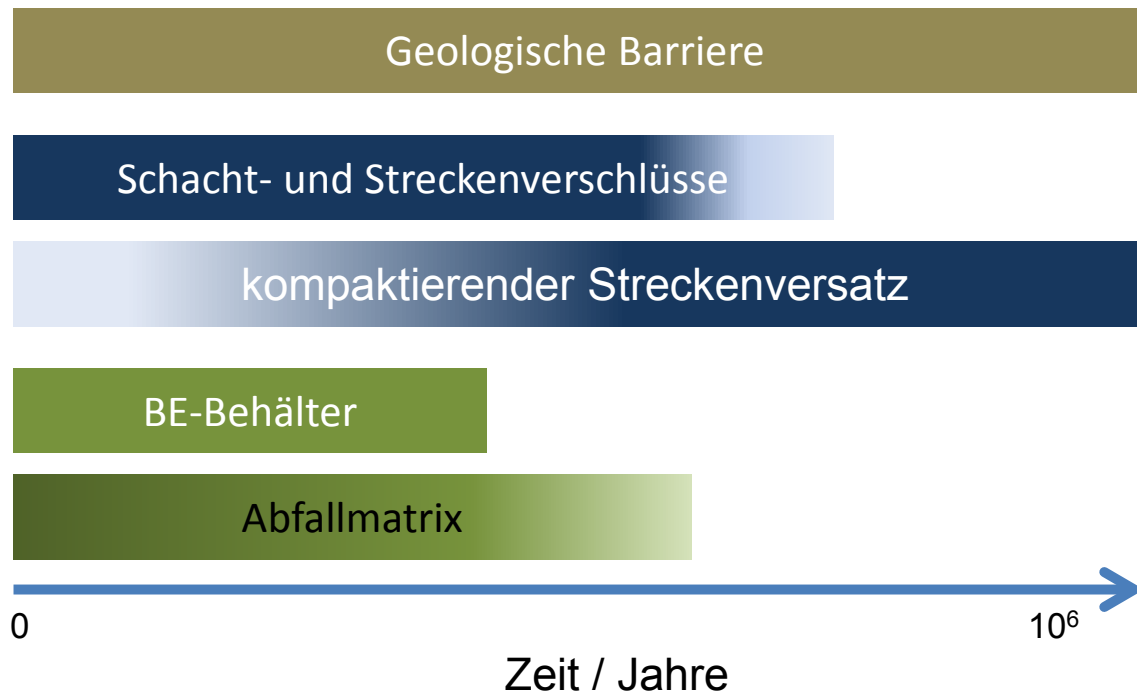


Abb. 3.1 Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase

3.3 Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase

Für die Konkretisierung des *Sicherheitskonzeptes* im Vorhaben VSG lassen sich, ausgehend von den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ und den in Kapitel 3.2 genannten Leitgedanken, drei Grundanforderungen definieren, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Grundanforderung A: Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen *Barrieren* eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- Grundanforderung B: Der ausgewiesene *einschlusswirksame Gebirgsbereich* bleibt im *Nachweiszeitraum* erhalten und seine Barrierefunktion (*geologische Barriere* und geotechnische *Barrieren*) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit).

- Grundanforderung C: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (Kritikalitätsausschluss).

Aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ ergibt sich außerdem die Grundanforderung, dass die Abfallbehälter für alle *wahrscheinlichen Entwicklungen* über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des *Endlagerbergwerks* bei einer eventuellen *Bergung* handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus den Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden sind, gibt es aber zurzeit nicht. Es wird für das Vorhaben VSG davon ausgegangen, dass in der Zukunft die Abfallbehälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle *Bergung* nachgewiesen werden kann.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die drei oben genannten Grundanforderungen die sich daraus ableitenden Zielsetzungen (Z) und strategischen Maßnahmen (M) aufgeführt und der jeweilige Bezug zu den entsprechenden Sicherheitsanforderungen des BMU genannt. Die Maßnahmen umfassen planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des *Endlagerbergwerks* im Salzstock als auch technische Vorkehrungen. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des *Sicherheitskonzeptes* zu erreichen. Zur besseren Unterscheidung und Bezugnahme werden den einzelnen Zielsetzungen und Maßnahmen jeweils eindeutige Kennungen zugeordnet.

3.3.1 Grundanforderung A – Einschlussgedanke

Aus der Grundanforderung, dass die eingelagerten Abfallgebände schnell und möglichst dicht vom Salzgestein eingeschlossen werden sollen (Einschlussgedanke), lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen *Entwicklungen* des *Endlagersystems* wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zutreten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Z2: Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen *Entwicklungen* des *Endlagersystems* soll es allenfalls zu einem Zutritt von geringen Lösungsmengen

zu den Abfällen kommen (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

- Z3: Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, soll der Transport dieser Schadstoffe aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert werden. Dies gilt sowohl für den Schadstofftransport in der Gasphase (*Gaspfad*) als auch in der flüssigen Phase (*Lösungspfad*). (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.7 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- Z4: Die Eigenschaften des Salzgesteins und der technischen Komponenten, die den *Einschluss* der Radionuklide gewährleisten sollen, sollen gut charakterisierbar sein (→ Abschnitte 5.1 und 8.7 der BMU-Sicherheitsanforderungen).
- Z5: Das *Endlager* soll so ausgelegt werden, dass in der *Nachverschlussphase* keine korrigierenden Eingriffe notwendig sind (→ Abschnitte 4.6, 5.2 und 8.7 der BMU-Sicherheitsanforderungen).
- Z6: Die technischen Komponenten sollen robust ausgelegt werden, so dass ihre *Sicherheitsfunktionen* unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungszustände sowie Korrosions- bzw. Degradationsprozesse und möglicher Alterungsprozesse gewährleistet sind (→ Abschnitte 5.1 und 5.2 der BMU-Sicherheitsanforderungen).
- Z7: Der sofortige und dauerhafte *Einschluss* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen, gewährleistet werden (→ Abschnitte 5.2, 7.2.3 und 8.7 der BMU-Sicherheitsanforderungen).
- Z8: Im Sinne einer auch im Hinblick auf die Nachweisführung robusten Endlagerplanung, durch welche sichergestellt ist, dass die Anzahl gleichzeitig offener *Einlagerungsbereiche* minimiert wird, sollen die *Einlagerungsbereiche* in einzelne Sektionen unterteilt werden, die möglichst schnell sequenziell beladen, verfüllt und gegen das Grubengebäude abgedichtet werden können. Die Separierung und Beladung der *Einlagerungsfelder* soll so erfolgen, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten durch physikalische und/oder chemi-

sche Prozesse, die das Einschlussvermögen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* negativ beeinflussen können, weitestgehend minimiert werden (→ Abschnitte 5.1 und 8.5 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

- M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des *Endlagerbergwerks* wird so klein wie möglich gehalten, und die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender (z. B. schneidender anstatt sprengender) Verfahren. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das anstehende Salzgestein und damit auf die *geologische Barriere* insgesamt minimiert. (→ Z1, Z2, Z3; entspricht auch der BMU-Sicherheitsanforderung 8.2)
- M2: Die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* werden in einem gut charakterisierbaren Salzereich mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlusseigenschaften, aufgefahren. Die *Einlagerungsbereiche* werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt. Das Hauptsalz im Kernbereich der Salzstruktur Gorleben zeichnet sich durch einen hohen Volumenanteil an der Salzstruktur, einen hohen Rekristallisationsgrad und die Abwesenheit von Störungen, makroskopischen Lösungsvorkommen oder anderen Inhomogenitäten aus. Die Materialeigenschaften der Unterformationen des Hauptsalzes, Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) sowie Kristallbrockensalz (z2HS3) sind dabei weitgehend identisch. (→ Z4)
- M3: Die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* werden in Salzgesteinsbereichen angelegt, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen. Die *Einlagerungsbereiche* werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt. (→ Z1, Z2)
- M4: Die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzsichten und damit zu Gesteinssichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen errichtet. Auf Basis der umfangreichen Erfahrungen im Salzbergbau kann abgeleitet wer-

den, dass ein Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen zehner Metern ausreicht, um die *Integrität* des Gebirgsbereichs zu bewahren. Für die Arbeiten im Vorhaben VSG wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte festgelegt, für die Auslegung der Grubenbaue einen Mindestabstand von 50 m anzusetzen, der an jeder Stelle des jeweils konzipierten *Endlagerbergwerks* zwischen Einlagerungsbereichen und der Begrenzung des Hauptsalzes einzuhalten ist. Es ist für diesen Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, der möglichen Existenz von Klüften begrenzter Reichweite am Außenrand des Hauptsalzes sowie der Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue zu zeigen, dass die *Integrität* der *geologischen Barriere* im *einchlusswirksamen Gebirgsbereich* gewährleistet ist. (→ Z1, Z2)

M5: In den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken 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 Abschnitte 4 und 8, siehe Kapitel 3.1) erfüllt sind. Aus diesem Grund muss ihre Wirksamkeit mindestens für den Zeitraum, der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigt wird, sichergestellt sein. Bei der Auslegung der *Verschlussbauwerke* werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt. (→ Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7)

M6: Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der *Einlagerungsbereiche* werden mit Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. In der Nähe der wärmeentwickelnden Abfälle wird die Salzgruskompaktion durch die lokal erhöhten Temperaturen beschleunigt. Die Hohlraumkonvergenz wird durch das Salzgrusvolumen in ihrem Gesamtausmaß begrenzt. Der im Vergleich mit unverfüllten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck sowie der insgesamt geringere Umfang des Salzkriechens führen zu einer beschleunigten Verheilung des Steinsalzes im Bereich der Auflockerungszone sowie zu einer Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspan-

nungen. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der initiale Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M7: In den Richtstrecken soll eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird der Salzgrus in den Richtstrecken, die zu den *Einlagerungsbereichen* gehören, geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M8: Die in das *Endlager* abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im *Endlager* zu begrenzen. Bei den wärmeentwickelnden Abfällen, bei denen allenfalls geringe Mengen Restfeuchte vorhanden sein können, wird in die Grubenbaue der *Einlagerungsfelder* Salzgrusversatz eingebracht, der den natürlichen, sehr geringen Feuchtigkeitsgehalt des Hauptsalzes z2HS besitzt. Dazu werden bei Bedarf betriebliche Vorkehrungen, insbesondere zur Handhabung des bei der Auffahrung gewonnenen Salzgruses, getroffen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M9: Die Schachtverschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren *Dichtelementen* aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen. (→ Z6, Z7)

M10: Im Rahmen der Entwicklung und Auslegung von Endlagerkonzepten werden Einlagerungsstrategien entwickelt, die sicherstellen, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird. Dazu werden die einzelnen *Einlagerungsbereiche* in Sektionen mit möglichst geringen Einzelvolumina (z. B. Einzelbohrloch, Einzelstrecke) untergliedert, die sequenziell mit Abfallgebinden beladen werden. Nach vollständiger Beladung wird die Einlagerungssektion umgehend verfüllt und mit geeigneten geotechnischen Maßnahmen gegen den restlichen Grubenraum verschlossen. Der Einlagerungsvorgang erfolgt, soweit aus betrieblicher Sicht möglich, im Rückbauverfahren, wobei schachtferne *Einlagerungsfelder* zuerst beladen, verfüllt und verschlossen werden. Hierdurch wird erreicht, dass die Kompaktion des

Salzgrusversatzes bereits zu einem frühen Stadium, während der *Betriebsphase*, ablaufen kann.

M11: Das Einlagerungsregime wird so angelegt, dass Abfälle mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander getrennt werden. Dies betrifft insbesondere Abfälle mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Hierdurch wird erreicht, dass sicherheitsrelevante chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen Abfällen verschiedener Eigenschaften weitestgehend vermieden werden und die Prognose des Freisetzungsverhaltens (Quellterm) erleichtert wird. Aus sicherheitstechnischen und methodischen Gründen erfolgt die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen (einschließlich der Brennelementstrukturteile) und der im Vorhaben VSG optional zu betrachtenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in separaten *Einlagerungsbereichen*, die durch geotechnische Bauwerke jeweils von einander als auch vom Infrastrukturbereich mit den Tagesschächten getrennt werden. Hierdurch wird eine hinsichtlich des sicheren *Einschlusses* nachteilige Beeinflussung der wärmeentwickelnden Abfälle durch die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) unterbunden. (→ Z8)

3.3.2 Grundanforderung B – Integritätsgedanke/Wartungsfreiheit

Aus der Grundanforderung, dass der ausgewiesene *einschlusswirksame Gebirgsbereich* im *Nachweiszeitraum* erhalten bleibt und seine Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

Z9: Die Qualität des *Einschlusses* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* soll im *Nachweiszeitraum* nicht durch oberflächennah ablaufende Prozesse beeinträchtigt werden (→ Abschnitte 5.1 und 8.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Z10: Die Qualität des *Einschlusses* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* soll im *Nachweiszeitraum* nicht durch thermisch induzierte Pro-

zesse beeinträchtigt werden (→ Abschnitt 5.1 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Z11: Kristallwasserhaltige Salzminerale, wie z. B. Carnallit, sollen durch die Temperaturerhöhung im Salzgestein infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle nicht zersetzt werden (→ Abschnitte 5.1 und 6.1 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Z12: Gasentwicklung und Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des *Endlagerbergwerks* sollen so gering sein, dass im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* kein Frac entsteht, der die *Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches* verletzt (→ Abschnitte 5.1 und 6.1 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Z13: Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* sowie seine Eintrittswahrscheinlichkeit sollen durch entsprechende Auslegung des *Endlagers* sowie administrative Maßnahmen nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die *Langzeitsicherheit* haben (→ Abschnitte 5.2 und 9.7 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z8 bis Z13 beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen verfolgt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M12: Die Grubenbaue der *Einlagerungsbereiche* werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu Salzbereichen wie z. B. Carnallit, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten, errichtet, um eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen. Dadurch wird in Verbindung mit der Maßnahme M 14 sichergestellt, dass derartige Salzbereiche stabile und gut prognostizierbare Eigenschaften behalten und die den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* angrenzenden Salzbereiche keine Eigenschaften annehmen, die zur Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* führen können. (→ Z11)

M13: Die Grubenbaue des Infrastrukturbereichs und der *Einlagerungsbereiche* werden in einer Teufenlage von mehr als 800 m und mit großer Mächtigkeit der hangen-

den Salzschieben 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. Insbesondere durch die Teufenlage soll ausgeschlossen werden, dass eine negative Beeinflussung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* durch Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, stattfinden kann. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* zu erschweren. (→ Z9, Z13)

M14: 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 relevante Hebung des Endlagerhorizontes erfolgen, die in Verbindung mit Subrosionsvorgängen oder einer glazial verstärkten Erosion zu einer relevanten Verringerung der Barrierenmächtigkeit und möglicherweise in Folge zu einer Beeinträchtigung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* von außen führen könnte. (→ Z9)

M15: Die Temperaturen im Hauptsalz z2HS, in dem die *wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle* eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Die Festlegung dieser Temperaturgrenze dient allein der Auslegung des *Endlagers*. Sie soll zum einen sicherstellen, dass die maximal auftretenden Temperaturen innerhalb der Abfallbehälter niedrig genug liegen, um negative Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung des Glaskörpers bei den CSD-V) zu vermeiden. Zum anderen ist bei den vorgesehenen Sicherheitsabständen der *Einlagerungsfelder* von mindestens 50 m zu den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzschieben, zu denen auch Carnallit gehört, aufgrund der Begrenzung der Temperaturentwicklung in den *Einlagerungsfeldern* davon auszugehen, dass Carnallit thermisch nicht zersetzt und kein Kristallwasser freigesetzt werden kann. Bei unter Gebirgsdruck in einer Tiefe von 870 m eingespannten Carnallit-Vorkommen liegt der Schmelzpunkt von Carnallit bei 167,5 °C /POP 93/. Weiterhin ist mit der Begrenzung der Maximaltemperatur im Steinsalz auf 200 °C die thermische Stabilität des Polyhalits sicher gewährleistet. (→ Z10, Z11)

M16: Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches der eingelagerten Abfälle, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des *Endlagerbergwerks* soweit reduziert, dass im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* kein Frac bis zu dessen Außenrand entsteht und somit zu einem Integritätsverlust der *geologischen Barriere* führt. (→ Z12)

Zur Erreichung der Zielsetzung Z13 sind weltweit bisher nur vereinzelte Untersuchungen durchgeführt worden. Dies betrifft sowohl die Möglichkeiten, die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* zu reduzieren oder Auswirkungen eines solchen Eindringens zu minimieren, als auch denkbare administrative Vorkehrungen, die wie der in /BMU 10b/ geforderte Wissenserhalt bewirken können, dass zumindest für eine gewisse Zeit keine den dauerhaften *Einschluss* der Abfälle gefährdenden menschlichen Aktivitäten im Bereich des *Endlagers* durchgeführt werden.¹ Daher werden für das *Sicherheitskonzept* der VSG keine konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Zielsetzung Z12 beschrieben. Im Rahmen der VSG werden die Fragestellungen im Zusammenhang mit dem menschlichen Eindringen in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* jedoch erstmalig in Deutschland systematisch untersucht und bewertet. Hierbei dürfen die vorrangigen Optimierungsziele Strahlenschutz in der *Betriebsphase*, *Langzeitsicherheit*, Betriebssicherheit des *Endlagers*, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen *Einschlusses* der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technische und finanzielle Realisierbarkeit nicht konterkariert werden.

3.3.3 Grundanforderung C – Kritikalitätsausschluss

Z14: Eine Kritikalität muss durch entsprechende Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter und durch die Einlagerungsplanung in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (→ Abschnitt 7.2.4 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

¹ Zum Beispiel werden beim Sicherheitsnachweis für die Waste Isolation Pilot Plant in den USA Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens betrachtet.

M17: Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern, sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im *Endlager* in einer kritischen Anordnung ansammelt. Dazu sind entsprechende Analysen auf der Basis von plausiblen möglichen Entwicklungen des *Endlager-systems* mit realistischen Werten für die einzulagernden Nuklidinventare unter Berücksichtigung ihrer Ungewissheiten durchzuführen.

Zur Erreichung der Zielsetzung Z14 tragen indirekt auch die Maßnahmen M3 (Einlagerung in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sind), M4 (Ausreichende Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten, zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen) und M16 (Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes) bei. Die unter M17 genannten Analysen sind im Vorfeld der VSG für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden, so dass im Rahmen der VSG nur die zugehörigen Nachweise für den Kritikalitätsausschluss durchgeführt werden (siehe Kap. 4.5).

4 Nachweiskonzept

Das *Nachweiskonzept* beschreibt detailliert die Vorgehensweise, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die *Sicherheit* des *Endlagersystems* bewertet wird. Im *Nachweiskonzept* werden auf Basis des *Sicherheitskonzeptes* die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10b/ erfüllt werden. Dabei ist es für das Vorhaben VSG nicht das Ziel, alle in /BMU 10b/ geforderten *Sicherheitsnachweise* zu erbringen, sondern zu überprüfen, inwieweit sie im Rahmen des vorliegenden Kenntnisstandes erbracht werden können. Bei einer Antragstellung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens würde das *Nachweiskonzept* umfassend beschreiben, wie die *Sicherheit* des *Endlagersystems* auf Basis des *Sicherheitskonzeptes* für die *Betriebsphase* und die *Nachverschlussphase* nachgewiesen werden soll. Dies setzt eine Anlagenplanung im notwendigen Detaillierungsgrad voraus, die im Rahmen einer vorläufigen *Sicherheitsanalyse* nicht zu entwickeln ist. Dies betrifft beispielsweise den geforderten umfassenden *Sicherheitsnachweis* für alle Zustände des Endlagerbetriebes (Abschnitt 7.1) sowie das nach Abschnitt 7.4 der BMU-Sicherheitsanforderungen geforderte Kontroll- und Beweissicherungsprogramm.

4.1 Relevante Vorgaben der BMU-Sicherheitsanforderungen

Im *Nachweiskonzept* müssen für die zur Durchführung des Vorhabens VSG relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ Konkretisierungen vorgekommen werden. Für die VSG sind vor allem bestimmte Aspekte in den Abschnitten 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen), und 7 (Sicherheitsnachweise) relevant. Nachfolgend sind, soweit nicht bereits wie z. B. die Abschnitte 6.1 und 7.2.4 im Kap. 3.1 aufgeführt, diese Bestimmungen auszugsweise zitiert (in Kursivschrift) und die entsprechenden Abschnitte angegeben, um später deren einfachere Zuordnung zum *Nachweiskonzept* der VSG zu ermöglichen:

5.2 *[...] Da zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können, sind Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen, zu analysieren. Im Rahmen dieser Optimierung ist auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken.*

- 6 *Die Strahlenschutzverordnung enthält keine Kriterien, mit denen der Schutz zukünftiger Generationen und der Umwelt vor ionisierender Strahlung zu bewerten ist. [...] International besteht Einvernehmen, dass berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Dosen in dieser Phase nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau interpretiert werden dürfen. Für diese Indikatoren gelten folgende Bewertungskriterien.*
- 6.2 *Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert² im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten. [...]*
- 6.3 *Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen in der Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass die durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, verursachte zusätzliche effektive Dosis für die dadurch betroffenen Menschen 0,1 Millisievert pro Jahr³ nicht überschreitet. [...]*
- 6.4 *Für unwahrscheinliche Entwicklungen wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. [...] 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.*
- 6.5 *Für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt.*

² In Anlehnung an ICRP 104 (triviale Dosis)

³ In Anlehnung an ICRP 81 (Risiko kleiner $10^{-5}/a$)

7.2 *Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist vor jeder wesentlichen Festlegung gemäß Kapitel 5.1 eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen. [...] Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen:*

- *Das jeweils zugrunde liegende Endlagerkonzept.*
- *Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung.*
- *Die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren.*
- *Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle.*
- *Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in die Wahrscheinlichkeitsklassen gemäß Kapitel 6.*
- *Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten.*

Diese Bewertung der Langzeitsicherheit muss sich darüber hinaus auf mindestens folgende Erkenntnisse abstützen:

7.2.1 *Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass*

- *die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum*

Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass

- *ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.*

Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:

- *Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.*
- *Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.*
- *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.*

7.2.2 Radiologische Langzeitaussage: Für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen ist nachzuweisen, dass die in den Kapiteln 6.2 und 6.3 aufgeführten Kriterien eingehalten sind. Soweit hinreichend zuverlässige Aussagen für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre über die Wirksamkeit von Sicherheitsfunktionen des Deck- und Nebengebirges des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemacht werden können, kann die radiologische Langzeitaussage diese einbeziehen.

Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ist zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe für die Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur sehr geringe Gesamtmengen an radioaktiven Schadstoffen freigesetzt werden

können. Diese Personen-Millisievert sind anhand eines für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit anerkannten generischen Expositionsmodells zu ermitteln, für das anzunehmen ist, dass

- die betrachtete Referenzgruppe 10 Personen umfasst, die während ihrer Lebenszeit den gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und
- dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält. Dabei ist die Verdünnung des Brunnenwassers auf einen Mineralgehalt zu berücksichtigen, der die Nutzung des Brunnenwassers als Trinkwasser zuließe.

Da praktisch auszuschließen ist, dass alle freigesetzten Radionuklide in genau einem Brunnen angesammelt werden und keine weiteren Verteilungen oder Rückhaltungen im Deck- oder Nebengebirge stattfinden, stellt dieses Berechnungsmodell sicher, dass die unter 6.1 bis 6.3 genannten Werte eingehalten werden.

7.2.3 *Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems: Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. [...]*

Beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses sind die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.

7.3 *Für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers im Hinblick auf*

- Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*
- radiologische Konsequenzen*
- Mobilisierung natürlicher Radionuklide*
- Eigenschaften von Behälter und Versatz*
- Eigenschaften der Verschlussbauwerke*

sind deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z. B. Medianwerte als Eingangsparameter) durchzuführen. Zielsetzungen dieser Rechnungen sind:

- Demonstration des erwarteten Systemverhaltens*
- Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems*
- Optimierung des Endlagersystems*

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.

Weiter sind ggf. Referenzmodelle (z. B. Referenzbiosphäre) für den Zeitraum zu verwenden, für den die Unsicherheit der Eingangsdaten und Rechenmodelle hoch ist. Für diesen Zeitraum sind ergänzend auch qualitative Argumente heranzuziehen.

7.9 *Es ist zu untersuchen, inwieweit natürlich im Endlagersystem vorkommende radioaktive oder sonstige grundwasser- oder bodenrelevante Stoffe mobilisiert werden können und inwieweit Grundwasserströme in sicherheitsrelevantem*

Umfang verändert werden könnten. Dies könnte zum Beispiel aufgrund der hohen Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle oder aufgrund veränderter geochemischer Bedingungen der Fall sein.

Im Langzeitsicherheitsnachweis sind Freisetzungen von Radionukliden aus natürlich vorkommenden Materialien (Versatz und Gebirge) gesondert von Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen zu bewerten.

4.2 Allgemeines

Ausgangspunkt für die Entwicklung des *Nachweiskonzeptes* ist der *sichere Einschluss* der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle in der *Nachverschlussphase* in einem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich*, der einen definierten 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 Abschnitt 4.2 der BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/, dass die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem *Endlager* langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen dürfen. Gleichzeitig muss für den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden, dass dessen *Integrität* für alle wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten nachgewiesen werden kann.

Aus dem *Nachweiskonzept* leiten sich alle Arbeiten im Rahmen der Systemanalyse im Vorhaben VSG ab, die in der Synthese schließlich zu einer Gesamtaussage zusammengefasst werden.

Es umfasst die folgenden Aspekte:

- Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* (→ Abschnitte 5.1, 7.2.1 und 8.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen)

- Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* im *Nachweiszeitraum*
 - Mächtigkeit der Salzbarriere im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich*
 - *Integrität* der *geologischen Barriere* (→ Abschnitte 7.2.1 und 7.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
 - *Integrität* der geotechnischen *Verschlussbauwerke* (→ Abschnitte 6.4, 7.2.3 und 7.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- Kritikalitätsausschluss (→ Abschnitt 7.2.4 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- *Einschluss* der Radionuklide im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* (→ Abschnitte 6.1, 6.2, 6.3, 7.2.2 und 7.2.3 und 7.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen)
- Radiologische Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* (→ Abschnitte 6.2, 6.3, 7.2.2 , 7.2.3 und 7.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen)

Im Folgenden wird auf jeden dieser Aspekte ausführlich eingegangen. Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ sind diese Aspekte für sämtliche Entwicklungsmöglichkeiten des *Endlagersystems* zu bewerten, deren Eintreten als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuft wird. Bei Entwicklungsmöglichkeiten, bei denen es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann, sind sowohl der *Lösungspfad* als auch der *Gaspfad* zu berücksichtigen.

Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ (Abschnitte 5.2, 6.5 und 9.7) sind auch Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen (Human-Intrusion-Szenarien) zu analysieren, um mögliche Ansatzpunkte für eine Optimierung der Endlagerkonzepte festzustellen. Zur Bewertung der zukünftigen menschlichen Eingriffe werden stilisierte Szenarien eingesetzt.

Im Hinblick auf den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor sonstigen schädlichen Wirkungen der radioaktiven Abfälle wird Abschnitt 3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ für die durchzuführenden Arbeiten im Vorhaben VSG dahingehend interpretiert, dass die Voraussetzungen zum Nachweis eines solchen Schutzes gegeben sind, wenn der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung nachgewiesen werden kann.

4.3 Vorgehensweise zur 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.

Um den *Einschluss* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* bewerten zu können, müssen dessen Lage und Größe festgelegt sein. Je nach Entwicklungsmöglichkeit des *Endlagersystems* erfolgt der Austrag der Radionuklide aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* lokal, z. B. über den Schacht, oder flächig über die *geologische Barriere*. Für die Bewertung des Einschlussvermögens wird der jährliche Radionuklidfluss lokal oder über die Außenfläche des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* berechnet und in Bezug zu geeigneten Indikatorwerten gesetzt (siehe Kap. 4.6.1). Unter der Voraussetzung, dass die *Integrität* der *geologischen Barriere* des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* nachgewiesen werden kann und folglich keine Wegsamkeiten durch das Salzgestein bestehen oder sich ausbilden, können Radionuklide den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* lediglich entlang der bei der Auffahrung geschaffenen Hohlräume verlassen, sofern ein Transportmedium zur Verfügung steht und sie nicht durch die geotechnischen Verschlussbauwerke oder den Versatz zurückgehalten werden. Für diese Situation kommen auf Basis der Endlagerkonzepte verschiedene Ortspunkte für die Bewertung des Einschlussvermögens der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* in Betracht, z. B.:

- die Außenfläche der Streckenverschlüsse auf der Seite des Infrastrukturbereichs und
- die Oberseite des unteren *Dichtelementes* der Schachtverschlussbauwerke.

Mit dem Vorhaben VSG wurde erstmalig eine Bewertung des Einschlussvermögens der radioaktiven Abfälle in einem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* auf der Grundlage der am Standort Gorleben angetroffenen geologischen Situation in Verbindung mit dem Endlagerkonzept und vor dem Hintergrund systematisch abgeleiteter Szenarien zur Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen (siehe Kap. 5.2) durchgeführt. Daher lagen vorab keine Erkenntnisse vor, für welche Salzbereiche die Integrität nach-

gewiesen werden kann. Aus diesem Grund wurde der *einschlusswirksame Gebirgsbereich* nicht vorab, d. h. nicht vor Durchführung der numerischen Analysen zur *Integrität* der Salzbereiche und zum Radionuklidtransport, festgelegt, sondern anhand der Ergebnisse der numerischen Analysen. Da der Nachweis des *sicheren Einschlusses* untrennbar mit der Ausweisung von Lage und Ausdehnung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereiches* verbunden ist, ist davon auszugehen, dass auch in zukünftigen *Sicherheitsanalysen* in ähnlicher Weise bei der Ausweisung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* vorgegangen wird.

Bei entsprechend positiven Ergebnissen der numerischen Analysen zur *Integrität* der Salzbereiche und zum Radionuklideinschluss können Lage und Abmessung eines *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* ausgewiesen werden. Für die *wahrscheinlichen Entwicklungen* muss gemäß /BMU 10b/ die *Integrität* des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* über den *Nachweiszeitraum* nachgewiesen werden. Lassen die Befunde Spielräume für die Festlegung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* zu, d. h., gibt es mehrere sinnvolle Alternativen hinsichtlich Lage und Ausdehnung, dann erfolgt die Festlegung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* mittels eines Abwägungsverfahrens, welches das Einschlussverhalten, das potenzielle Freisetzungsverhalten sowie die *Robustheit* der *Integrität* und des *Einschlusses* sowie die Robustheit des Nachweises würdigt. Die Kriterien zur Abwägung umfassen folgende Aspekte:

1. die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der betreffenden Gebirgsbereiche sowie der geotechnischen *Barrieren* und die allgemeine Datenlage,
2. die Qualität des *Einschlusses* (mittels RGI; Kap. 4.6.1) unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Freisetzungsrechnungen einschließlich der ihnen zu Grunde liegenden Annahmen bzgl. der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des *Endlagersystems* und
3. die Aussagesicherheit des Integritätsnachweises unter Berücksichtigung der Ungewissheiten des Integritätsnachweises (z. B. Homogenität der geomechanischen Materialeigenschaften, Einbeziehung der Modellungsgewissheiten).

Die Festlegung des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* erfolgt anhand einer Gesamtwürdigung der numerischen Analyseergebnisse im Bericht /FIS 13/.

4.4 Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum

4.4.1 Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Eine zentrale Forderung im *Sicherheitskonzept* ist, dass der ausgewiesene *einschlusswirksame Gebirgsbereich* über den gesamten *Nachweiszeitraum* erhalten bleibt und seine gemäß /BMU 10b/ 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 die Mächtigkeit der Salzbarriere im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* beeinträchtigen können, wurden während der Entwicklung des *FEP-Katalogs* identifiziert. Nach heutigem Kenntnisstand ist für diese Fragestellung zu berücksichtigen:

- Subrosion,
- Erosion,
- glazigene Rinnenbildung sowie
- Salzstockaufstieg (Diapirismus).

Um den Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* für den *Nachweiszeitraum* zu zeigen, muss auf Basis einer geologischen Langzeitprognose für den Standort geprüft werden, ob die Salzgesteinsbereiche, die durch geologische Prozesse abgetragen werden können, stets außerhalb der Grenzen des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* liegen, wobei die Ungewissheiten bezüglich der Prozesse und ihrer Ausprägungen berücksichtigt werden müssen. Von großer Bedeutung bei der Anwendung dieses Kriteriums sind beispielsweise die Subrosion über den gesamten Zeitraum und der dabei erfolgende Aufstieg des Hauptsalzes der Staßfurt-Serie (z2HS). Salzpartien zwischen dem Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und den wasserführenden Schichten des Deckgebirges wirken als zusätzliche *geologische Barriere*, deren Aufgabe vorrangig im Schutz und Erhalt des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* besteht.

4.4.2 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. Wichtige Voraussetzung dafür ist, dass diese Salzbereiche keine Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und wasserführenden Schichten außerhalb des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* oder der Biosphäre aufweisen. Bei der Betrachtung sind alle geologischen Prozesse, wie die Ausbildung von tektonisch, hydraulisch oder kryogen induzierten Rissen im Salzgestein, zu berücksichtigen, die die hydraulische Dichtwirkung des Salzgesteins im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* beeinträchtigen können.

Die *Integrität* der *geologischen Barriere* wird mit den folgenden Kriterien überprüft:

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

Die Nachweisführung erfolgt über gebirgsmechanische Modellrechnungen für den gesamten Salzstock. Die *Integrität* eines Gebirgsbereiches bleibt erhalten, wenn beide Kriterien in diesem Bereich außerhalb eines engen Bereichs um die bergmännisch geschaffenen Hohlräume (Auflockerungszone) nicht verletzt werden. Anhand der Ergebnisse werden die Gebirgsbereiche im Salzstock identifiziert, in denen die *Integrität* nicht gegeben ist. Solange die *Integrität* der *geologischen Barriere* im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* 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 wasserführenden Schichten außerhalb des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* oder der Biosphäre bilden.

Für die *geologische Barriere* soll weiterhin im *Nachweiszeitraum* die Bedingung erfüllt sein, dass in Salzbereichen wie z. B. Carnallit, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltige Salzminerale enthalten, bei den lokal auftretenden Gebirgsbedingun-

gen (Einspanndruck und Temperatur) eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale auszuschließen ist. Dies wird durch die Maßnahmen M11 in Verbindung mit Maßnahme M14 erreicht. Zum Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahmen werden im Vorhaben VSG thermomechanische Modellrechnungen durchgeführt, um die lokalen Temperaturen und minimalen Hauptspannungen in den kristallwasserhaltigen Salzpartien zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der den Modellrechnungen innewohnenden Ungewissheiten wird geprüft, ob jeweils bei den lokalen Randbedingungen eine Zersetzung der kristallwasserhaltigen Minerale erfolgen kann. In einem späteren *Sicherheitsnachweis*, d. h. nach erfolgter Auffahrung des Grubengebäudes, müssten entsprechende Nachweisrechnungen mit den tatsächlichen Geometrien und aktuellen thermischen Daten für die Abfallgebinde durchgeführt werden.

4.4.3 Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke

Das Verschlusskonzept für das *Endlager* sieht geotechnische *Verschlussbauwerke* und die Verfüllung der Hohlräume, mindestens in den *Einlagerungsbereichen*, mit kompaktierendem Salzgrus vor.

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 *Integrität* der *Verschlussbauwerke* muss deshalb mindestens über den Zeitraum gegeben sein, in dem der Salzgrusversatz in den Einlagerungsbereichen noch keine ausreichende Dichtfunktion übernimmt. Die Anforderung an ein geotechnisches *Verschlussbauwerk* ist dann erfüllt, wenn der vorgegebene hydraulische Widerstand des Verschlusses, inklusive der Kontakt- und Auflockerungszone, sowie die *Integrität* des Baukörpers über die vorgesehene Funktionsdauer gegeben sind.

Für eine Festlegung der erforderlichen Funktionsdauer bestanden im Vorfeld des Vorhabens VSG keine ausreichend quantifizierbaren Erkenntnisse. Hinsichtlich der Geschwindigkeit der Kompaktion des Salzgrusversatzes und der Durchlässigkeit von kompaktiertem Salzgrus in Relation zum jeweiligen Kompaktionsgrad, insbesondere bei weit fortgeschrittener Kompaktion des Salzgruses, d. h. bei sehr kleinen Porositäten, bestehen erhebliche Ungewissheiten. Die Kompaktion des Salzgruses bis zum Erreichen der geforderten Eigenschaften kann, je nach herrschender Temperatur und

Anwesenheit von Feuchte, einige zehner Jahre bis zu einigen tausend Jahren betragen. Wegen der bestehenden Ungewissheiten erfolgt die Auslegung der Verschlussbauwerke im Vorhaben VSG mit einem Zielwert für die Funktionsdauer von 50.000 Jahren.

Die Auslegung der *Verschlussbauwerke* erfolgt auch mit Modellrechnungen, bei denen gekoppelte thermo-mechanische, hydraulische und geochemische Prozesse berücksichtigt werden. Dabei werden die folgenden Aspekte untersucht:

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

Mit 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 Verschlussbauwerke gewährleistet sein.

Die Modellrechnungen zur Auslegung der geotechnischen *Verschlussbauwerke* sind mit Ungewissheiten verbunden. 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 der Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität für kleine Porositätswerte noch mit Ungewissheiten behaftet. 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 0,5 bis 1 % Feuchte) unter Endlagerbedingungen in ei-

nem Zeitraum kleiner als 1000 Jahre, der deutlich kürzer als die Funktionsdauer der Verschlussbauwerke ist, sehr kleine Porositätswerte erreichbar sind, bei denen der Versatz als hydraulisch undurchlässig angesehen werden kann.

Gemäß Abschnitt 7.2.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ muss gezeigt werden, dass die Herstellung und Errichtung der geotechnischen *Verschlussbauwerke* grundsätzlich erprobt sind, falls keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen. Im Vorhaben VSG wurde davon ausgegangen, dass entsprechende Nachweise in der Zukunft geführt werden können. 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*.

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 mindestens für alle zu betrachtenden Lastfälle, die sich aus den *wahrscheinlichen Entwicklungen* ableiten, zu erbringen. Aufgrund des Wärmeeintrags in das Salzgestein durch die Einlagerung *wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* kommt es in den ersten paar tausend Jahren zu stark transienten Temperaturentwicklungen in den Salzpartien um die eingelagerten Abfälle, die relevante geomechanische Lastfälle für die geotechnischen Verschlussbauwerke darstellen. Langfristig können vor allem chemische Veränderungen des Baukörpers die *Integrität* eines Verschlussbauwerkes bestimmen.

4.5 Kritikalitätsausschluss

In einem *Endlager* für hoch radioaktive Abfälle 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 Wasser (oder einem anderen Neutronen-Moderator) vorhanden ist. Kritische Anordnungen müssen für alle als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuften Szenarien ausgeschlossen werden /BMU 10b/.

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 Zeit-

punkt der möglichen Kritikalität und die Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parameterwerten. Die Betrachtungen können auch auf Basis abdeckender Rechenfälle und ungünstiger Modellannahmen, wie z. B. Nichtberücksichtigung des durch den Abbrand des Brennstoffs im Reaktor verringerten Gehaltes an spaltbarem Uran, durchgeführt werden.

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

$$k_{eff} < 0,95 \quad (4.1)$$

ausgeschlossen werden.

4.6 Einschluss der Radionuklide im ewG

Wie in Kapitel 3 ausgeführt, ist der *sichere Einschluss* der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle 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.

Die Bewertung des Einschlussvermögens des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* für die Radionuklide und sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle ist daher eines der zentralen Elemente des *Nachweiskonzeptes* im Vorhaben VSG. 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. Auf diese Weise für die *Nachverschlussphase* berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Strahlenexpositionen stellen keine Prognose einer tatsächlichen radiologischen Belastung von in der Zukunft lebenden Personen dar, sondern sind gemäß /BMU 10b/ nur als *Indikatoren* für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau zu interpretieren.

Zur Bewertung des Einschussvermögens bieten die Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ ein vereinfachtes Verfahren für die radiologische Langzeitaussage an, bei dem die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* betrachtet wird.

Zur Bewertung des Einschussvermögens in einem bestimmten Gebirgsbereich werden verschiedene Aufpunkte entlang der Transportwege der Radionuklide festgelegt. Hierbei sind alle Wegsamkeiten, die zu einem Transport von Radionukliden aus dem Gebirgsbereich beitragen können, zu berücksichtigen. Zur Bewertung des Einschussvermögens werden an den Aufpunkten die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden analysiert und getrennt für den *Lösungspfad* und den *Gaspfad* jeweils ein radiologischer *Indikator* errechnet.

4.6.1 Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweisverfahren für in Lösung befindliche Radionuklide

Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage für in Lösung befindliche Radionuklide ist gemäß /BMU 10b/ zulässig, wenn rechnerisch gezeigt werden kann, dass die jährlich aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* freigesetzten radioaktiven Stoffe bei einer Referenzgruppe von 10 Personen der Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für *weniger wahrscheinliche Entwicklungen* führen. Der Berechnung dieser fiktiven Kollektivdosis muss ein anerkanntes generisches Expositionsmodell zugrunde liegen. Gemäß /BMU 10b/ ist dabei zu unterstellen, dass die betrachtete Referenzgruppe „während ihrer Lebenszeit den gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält“. Laut /BMU 10b/ ist dabei „die Verdünnung des Brunnenwassers auf einen Mineralgehalt zu berücksichtigen, der die Nutzung des Brunnenwassers als Trinkwasser zuließe“. Diese Vorgaben sind jedoch nicht eindeutig und führen in der praktischen Anwendung zu Problemen, da quantitative Angaben zum anzusetzenden Wasservolumen für die Aufnahme der Radionuklide fehlen. Des Weiteren ist den Sicherheitsanforderungen nicht zu entnehmen, wie die Kollektivdosis zu ermitteln ist. Hierzu liegen auch keine weiterführenden Empfehlungen, z. B. der SSK, vor.

Im Vorhaben VSG wird ein Verfahren zur Bewertung des Einschussvermögens 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 für in Lösung befindliche Radionuklide 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 den jährlichen Radionuklidströmen S_i [Bq/a] über den Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, d. h. bei Undurchlässigkeit der *geologischen Barriere* des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge [m³/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt. Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i [Sv/a / Bq/m³] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den *Indikator* RGI,

$$RGI = \frac{10 \cdot \frac{\sum_i S_i \cdot DKF_i}{W}}{K_{RGI}} . \quad (4.2)$$

Bei einem Wert für den RGI ≤ 1 ist die Freisetzung geringfügig.

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

- Die Wassermenge, in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5000 m^3 pro Jahr⁴ für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen. Die Wassermenge W pro Person beträgt damit 500 m^3 pro Jahr.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i werden gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ ermittelt, siehe Kapitel 4.6.3.
- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für *wahrscheinliche Szenarien* 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr, für *weniger wahrscheinliche Szenarien* 1 Personen-Millisievert pro Jahr.

Daten- und Modellungswissheiten müssen bei der Bewertung der *Langzeitsicherheit* entsprechend berücksichtigt werden.

4.6.2 Bewertung der Langzeitsicherheit nach dem vereinfachten Nachweisverfahren für gasförmig freigesetzte Radionuklide

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10b/ wird die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nur für in der wässrigen Phase gelöste Radionuklide skizziert. Dieses Verfahren ist zur Bewertung der *Langzeitsicherheit* auf Radionuklide anwendbar, die auf dem *Lösungspfad* freigesetzt werden oder die gasförmig aus den Abfällen freigesetzt und entlang ihres Transportweges innerhalb des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* in der Porenfeuchte gelöst werden.

Nicht-lösliche gasförmige Radionuklide verbleiben in der Gasphase und werden, soweit sie nicht durch Sorptions- und andere Rückhalteprozesse zurückgehalten werden, mit dem Gasstrom transportiert und können mit diesem gegebenenfalls den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verlassen. In /BMU 10b/ finden sich jedoch keine Hinweise

⁴ Für eine Personengruppe, die den gesamten für ihre Ernährung notwendigen Bedarf selbst decken kann, wurden eine notwendige Gruppengröße von 30 Personen und ein Wasserbedarf von $20.000 \text{ m}^3/\text{a}$ abgeschätzt /GSF 02/. Die zur Berechnung des RGI-Wertes in VSG zugrunde gelegte Wassermenge ergibt sich aus der konservativen Annahme, dass der durchschnittliche Wasserbedarf bei einer Gruppe von 10 Personen, die sich selbst versorgt, pro Person $500 \text{ m}^3/\text{a}$ beträgt.

zu einer vereinfachten radiologischen Langzeitaussage für Radionuklide, die in der Gasphase den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verlassen.

Im Vorhaben VSG wird auch für diese Fälle ein zu den gelösten Radionukliden analoges Verfahren zur Bewertung des *Einschlusses* im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verwendet. Für diese Radionuklide wird, wie im Fall der löslichen Radionuklide, ein *Indikator* RGI aus dem jährlichen Radionuklidstrom über den Rand des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* berechnet. Dabei wird, in Anlehnung an /BMU 10b/, ein anerkanntes generisches Expositionsmodell für gasförmige Radionuklide verwendet. Das generische Expositionsmodell wird in /LAR 13/ beschrieben.

4.6.3 Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* werden in vier Stufen bewertet, siehe Abbildung 4.1, wobei auch die Art des Radionuklidtransports (advektiv oder diffusiv) in die Bewertung einfließt. In den ersten drei, in der Abbildung grün dargestellten Stufen wird der *sichere Einschluss* der radioaktiven Abfälle im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* nachgewiesen. Bei Nichteinhaltung der Schutzziele – Stufe 4 – wird das *Endlagersystem* in der der Bewertung zugrundeliegenden Form als ungeeignet bewertet. Die Bewertung erfolgt sowohl für eine Freisetzung von Radionukliden über den *Lösungspfad* als auch über den *Gaspfad*.

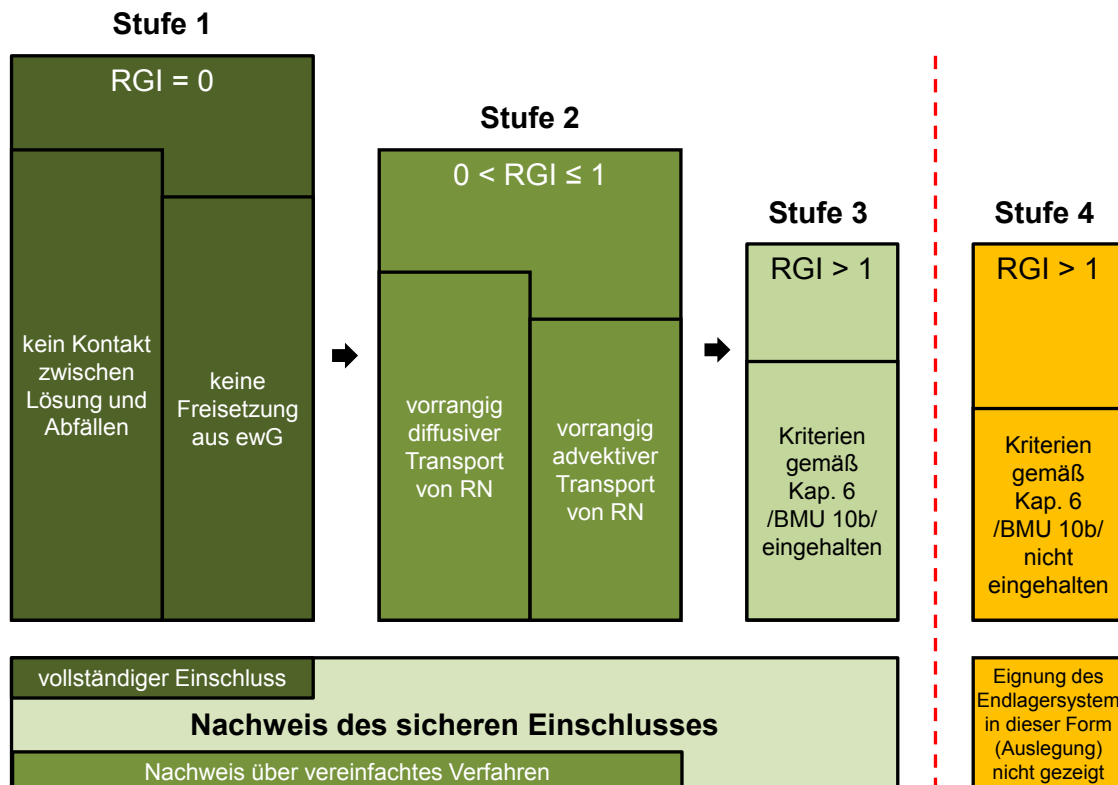


Abb. 4.1 Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage

Stufe 1: 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 *Lösungspfad* noch über den *Gaspfad*. In diesen Fällen ist der RGI-Wert gleich 0.

Stufe 2: Der *sichere Einschluss* der Radionuklide ist mit dem vereinfachten Verfahren nach /BMU 10b/ 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 vorrangig über Diffusionsprozesse wird dabei positiver bewertet als eine überwiegend advektive Freisetzung. Bei einer vorrangig advektiven Freisetzung der Radionuklide aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* ist gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ zu zeigen, dass ggf. im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* vorhandenes Porenwasser nicht am

hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des *einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* teilnimmt.

Stufe 3: 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 Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ eingehalten werden. Die durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verursachte zusätzliche effektive Individualdosis darf maximal bei *wahrscheinlichen Entwicklungen* des *Endlagersystems* 10 Mikrosievert pro Jahr und bei *weniger wahrscheinlichen Entwicklungen* des *Endlagersystems* 0,1 Millisievert pro Jahr betragen. Bei diesen Berechnungen ist auch der Transport der Radionuklide auf dem *Lösungspfad* und auf dem *Gaspfad* durch das Deckgebirge bis in die Biosphäre zu betrachten. Dazu ist auch die Hydrogeologie des Deckgebirges zu modellieren. Da über den Zustand des Deckgebirges nach einer Glazialzeit mit Eisüberfahrung keine Prognose möglich ist, wird für die Modellrechnungen ein stilisiertes hydrogeologisches Deckgebirgsmodell in Ansatz gebracht. Aus den rechnerisch ermittelten Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser werden nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ radiologische Indikatorwerte zur Bewertung des erzielten Schutzniveaus berechnet.

Abbildung 4.2 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.

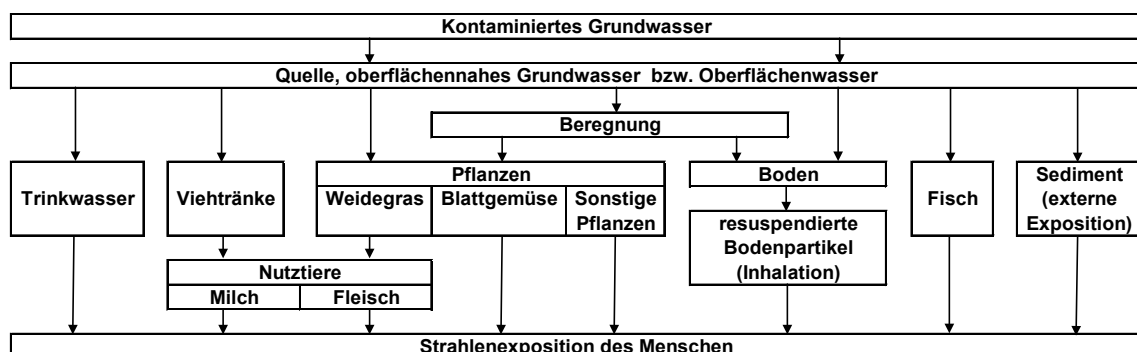


Abb. 4.2 Expositionspfade bei Nutzung radioaktiv kontaminierten Grundwassers

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 die Voraussetzungen zum Nachweis des sicheren *Einschlusses* auch für die sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle und damit zum Nachweis des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt vor den sonstigen schädlichen Wirkungen der radioaktiven Abfälle gegeben sind (siehe Kap. 4.2).

Stufe 4: Bei einer Überschreitung der Bewertungskriterien gemäß den Kapiteln 6.2 und 6.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10b/ für den *Indikator* effektive jährliche Individualdosis ist der langzeitsichere *Einschluss* der Radionuklide auf Basis des untersuchten *Endlagersystems* nicht nachgewiesen. In diesem Fall kann ggf. durch eine geänderte Auslegung des *Endlagerbergwerks* sowie durch weitere bzw. andere technische Maßnahmen der sichere *Einschluss* erreicht bzw. durch den Abbau von Konservativitäten in der Nachweisführung der Nachweis des sicheren Einschlusses geführt werden. Dazu wären neue *Sicherheitsanalysen* durchzuführen. Erst wenn die Optimierungspotenziale des *Endlagersystems* ausgeschöpft sind und trotzdem der Nachweis des langzeitsicheren *Einschlusses* nicht erfolgreich geführt werden kann, kann an dem Standort kein sicheres *Endlager* errichtet werden.

4.7 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 gemäß /BMU 10b/ die Senkung der Eintrittswahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens oder die Verringerung der radiologischen Auswirkungen, wobei der Maßstab dafür die radiologischen Konsequenzen für die allgemeine Bevölkerung und nicht für die direkt eingreifenden Personen ist. 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 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, d. h. in Unkenntnis der Existenz des *Endlagers* bzw. des ihm innewohnenden Gefahrenpotenzials, erfolgen. Zur Bewertung werden stilisierte Szenarien verwendet, die außerhalb der in Kapitel 5.2 dargestellten *Szenarientwicklung* festgelegt werden. Dazu werden in einem systematischen Prozess auf Basis des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik Verhaltensweisen der menschlichen Gesellschaft identifiziert, die zu einem Eindringen in den tiefen Untergrund und damit in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* führen können.

Für die betrachteten stilisierten Szenarien werden anschließend mögliche Optimierungsmaßnahmen für das Endlagerkonzept identifiziert. Solche Maßnahmen zielen darauf ab, entweder die dann handelnden Personen darauf hinzuweisen, dass eine besondere Situation im tiefen Untergrund vorliegt, damit sie ihre weiteren Schritte entsprechend vorsichtig umsetzen, oder die Auswirkungen für solche Fälle zu verringern, in denen das Eindringen in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* von den handelnden Personen nicht bemerkt wird. Die Identifikation dieser Optimierungsmaßnahmen ist Gegenstand eines eigenen Arbeitspaketes innerhalb der VSG (AP 11).

Für das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* können keine Wahrscheinlichkeiten im mathematischen Sinne ermittelt werden. Es kann allenfalls die Möglichkeit für ein solches Eindringen verbalargumentativ bewertet werden. Der Ansatzpunkt von entsprechenden Optimierungsmaßnahmen ist dann, das unbeabsichtigte Eindringen zu erschweren. Systemimmanent behindert die Tiefenlage des *Endlagerbergwerks* von vornherein ein unbeabsichtigtes Eindringen.

Die Bewertung der Auswirkungen der identifizierten Optimierungsmaßnahmen erfolgt entweder verbalargumentativ oder durch quantitative Modellrechnungen. Allerdings ist insbesondere für Maßnahmen, die die handelnden Personen darauf hinweisen sollen, dass eine besondere Situation im tiefen Untergrund vorliegt, eine quantitative Bewertung ihrer Wirksamkeit nicht sinnvoll. Der Erfolg solcher Maßnahmen hängt überwiegend davon ab, wie die Personen dann handeln, was nicht verlässlich prognostizierbar ist. Quantitative Modellrechnungen liefern nur für solche Maßnahmen, die die radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung bei einem unbeabsichtigten und unbemerkten Eindringen in den *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* verringern, verlässliche Bewertungsgrößen.

5 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 Ungewissheiten⁵ 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 und durch Forschungsarbeiten das Verständnis der im Endlagersystem ablaufenden Prozesse zu vertiefen. In dieser Phase bestehen vielfältige Möglichkeiten, erkannte Ungewissheiten zu umgehen bzw. zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren, wobei unter Umständen auch neue Ungewissheiten auftreten können. Letztlich werden aber niemals alle Ungewissheiten zu reduzieren oder gänzlich vermeidbar sein. Die nicht zu vermeidenden Unge-

⁵ 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.

wissheiten müssen benannt und ihre Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage bewertet werden. Der Umgang mit Ungewissheiten erstreckt sich 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 die Aussagen zur *Sicherheit* des *Endlagersystems* über den *Nachweiszeitraum* bewertet werden. Die Ungewissheiten werden in der Regel in Szenariengewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des *Endlagersystems*), Daten- und Parameterungewissheiten und Modellungsgewissheiten eingeteilt.

5.1 Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG

Das Vorhaben VSG gründet sich auf die vorliegenden umfangreichen geowissenschaftlichen Befunde. Den bestehenden Ungewissheiten ist Rechnung zu tragen, wobei eine bedeutende Quelle von Ungewissheiten im Vorhaben VSG aus der nicht abgeschlossenen Erkundung des Standortes resultiert. Während die obertägige Erkundung abgeschlossen ist, beschränkte sich die untertägige Erkundung bislang auf einen kleinen Teilbereich des Salzkörpers, so dass nur eingeschränkte Kenntnisse hinsichtlich der lateralen Struktur des Salzstockes, zu Daten und ihren Bandbreiten sowie zu Entwicklungen des Endlagerstandortes bestehen. Darüber hinaus bestehen Ungewissheiten in Bezug auf das Verhalten und die Entwicklung von wesentlichen Komponenten des *Sicherheitskonzeptes* wie der geotechnischen *Barrieren*. Als Beispiel ist das Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz zu nennen. Die bestehenden Ungewissheiten sind von Einfluss u. a. für die Planung und Auslegung des Endlagerbergwerks, die Modellierung der Prozesse im *Endlagersystem*, die Datenbereitstellung und die Prognose der Endlagersystementwicklung.

Um die VSG durchführen zu können, muss mit den bestehenden Ungewissheiten in geeigneter Weise umgegangen werden. Dies geschieht beispielsweise durch plausible, fachlich begründete Annahmen, da die Ungewissheiten insbesondere aus zeitlichen Gründen nicht durch zusätzliche Erkundungsarbeiten bzw. durch ein gezieltes FuE Programm reduziert oder beseitigt werden können. 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, wegen der noch nicht abgeschlossenen Standorterkundung in der VSG zugrunde gelegte Annahmen sind:

- Die laterale Ausbildung des Salzstockes Gorleben entspricht dem geologischen Schnitt /BGR 03/ und die Übertragbarkeit dieses Schnittes auf den Teufenbereich des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Die Übertragbarkeit der für die Salzgesteine im EB1 und im Infrastrukturbereich ermittelten Gesteinseigenschaften auf die Salzgesteine im gesamten *einschluss-wirksamen Gebirgsbereich* und den ggf. außerhalb liegenden Teilen der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge weist eine ausreichende Mächtigkeit für die Aufnahme der *Einlagerungsbereiche* für alle Endlagerkonzepte auf. Dabei ist der festgelegte Sicherheitsabstand zu den Gesteinsschichten, die potenziell lösungsführend sind oder Wegsamkeiten für Lösungen bilden können, zu berücksichtigen.

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

5.2 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 Überführung 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. 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 (gegebenenfalls 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* als Szenarien systematisch abgeleitet. Darüber hinaus werden mögliche Abweichungen von den Auslegungsanforderungen bei den technischen Komponenten berücksichtigt.

Ein *Szenarium* wird durch das Zusammenwirken von Merkmalen, Prozessen und Ereignissen (nach den englischen Begriffen *features, events and processes* zusammenfassend als *FEP* bezeichnet) in jeweils festgelegten Ausprägungen eindeutig charakterisiert.

Die *Szenarientwicklung* wird in drei Schritten durchgeführt:

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

Die Szenarien sind Ausgangspunkt für die Modellrechnungen, auf deren Ergebnissen die Bewertung der Auswirkungen der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der *Nachverschlussphase* basiert. Dazu werden in den entsprechenden Berichten zu den Modellrechnungen Rechenfälle definiert und begründet, die jeweils eine modellmäßige Abstraktion eines *Szenariums* mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen.

5.3 Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen

Eine Herausforderung im Rahmen einer systematischen *Szenarientwicklung* stellt der Umgang mit Ungewissheiten dar, die Entwicklungen oder bestimmte Teilaspekte davon betreffen, die kaum oder gar nicht zu prognostizieren sind. Durch die Festlegung begründbarer Annahmen, die als Stilisierungen bezeichnet werden, wird auf nachvollziehbare Weise dokumentiert, wie mit diesen Ungewissheiten umgegangen wird. Betreffen die stilisierten Annahmen eine Entwicklungsmöglichkeit in ihrer Gesamtheit, wird das resultierende *Szenarium* als stilisiertes *Szenarium* bezeichnet. Beispiele dafür werden im Folgenden diskutiert.

Die heutige hydrogeologische Situation im Deckgebirge am Standort Gorleben ist durch Erkundungsmaßnahmen gut charakterisiert. Eine Prognose der zukünftigen Situation ist aber nur für einen Zeitraum möglich, in dem mit der heutigen klimatischen Situation vergleichbare Randbedingungen herrschen. Für den Zeitraum nach einer Kaltzeit mit Eisüberföhrung ist die hydrogeologische Situation aber nicht zu prognostizieren, da durch die dabei ablaufenden Prozesse die Topologie am Standort und das Deck- und Nebengebirge in hohem Maße verändert werden können. Zur Modellierung in der Langzeitphase werden deshalb plausible (stilisierte) Annahmen getroffen.

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. 4.7). 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 somit 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.

5.4 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 Modellrechnergebnissen behandelt. Dabei werden Verfahren eingesetzt, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. So können probabilistische Verfahren zur Berücksichtigung von Parameterungewissheiten bei der Bewertung des *Einschlusses* der Radionuklide im *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* und ggf. bei der radiologischen Konsequenzenanalyse sowie Teilsicherheitsbeiwerte bei der Berücksichtigung von Ungewissheiten der Lastfälle für die geotechnischen Bauwerke eingesetzt werden.

Im Rahmen des Vorhabens VSG werden die Ungewissheiten bezüglich der *FEP*-Ausprägung im *FEP*-Katalog beschrieben. Dort nicht erfasste Datenungewissheiten werden in den Berichten zu den Modellrechnungen identifiziert und dokumentiert. 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.

5.5 Umgang mit Modellungswissheiten

5.5.1 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten

Wie weiter oben beschrieben, wird als Quelle von Ungewissheiten der Stand der Erkundung des Standortes identifiziert. Es ergeben sich u. a. Ungewissheiten hinsichtlich der auf diesem Stand beruhenden Standortkenntnisse sowie der daraus zu entwickelnden modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten.

Während die übertägige Erkundung abgeschlossen ist, liegen aufgrund der auf einen kleinen Teil des Salzstocks begrenzten untertägigen Erkundung nur eingeschränkte Kenntnisse zum Salzstock vor. Hieraus folgt, dass im Vorhaben VSG mit Ungewissheiten, z. B. über den Stoffbestand und seine räumliche Verteilung im Salzstock, umzugehen ist. Eine Reduzierung dieser Ungewissheiten kann nur durch eine weitere, vornehmlich untertägige Erkundung erreicht 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:

5.5.1.1 Ungewissheiten im Standortmodell

Zur Beschreibung des Standortes wird nach Stand von Wissenschaft und Technik ein geologisches Modell des gesamten Salzstocks Gorleben aufgebaut, in das die heutigen Kenntnisse aus den geowissenschaftlichen Erkundungen am Standort einfließen. Für die bislang nicht untertägig erkundeten Bereiche wird eine auf Grundlage der Ergebnisse der übertägigen Erkundung und der Kenntnisse zu den untertägig erkundeten Bereichen mittels Expertenschätzung eine modellhafte Vorstellung über den Aufbau und die Materialverteilung des Standortes entwickelt.

5.5.1.2 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, betrieblichen Erfordernissen z. B. hinsichtlich der Wetterführung und den für die Auslegung herangezogenen maximalen Gebirgstemperaturen.

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

5.5.2 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 eingeschränkt 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 der Modellierbarkeit beispielsweise die Komplexität des Prozesses sein oder die Beschreibung durch Ansätze, deren Parameter für die numerische Analyse nicht erhoben werden können.

Im Vorhaben VSG wird diesen Ungewissheiten durch vereinfachte Ansätze begegnet, die den zu behandelnden Prozess im Hinblick auf die Sicherheitsaussage konservativ abbilden und die in Berichten zu den Modellrechnungen dokumentiert sind. Diese Vorgehensweise erfordert eine belastbare Begründung der Konservativität, was ggf. nicht immer eindeutig möglich sein wird. Die Bewertung der Konservativität stützt sich innerhalb des Vorhabens VSG auf Expertenurteile ab.

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 FuE das Prozessverständnis verbessert werden kann, wird im Rahmen des Vorhabens VSG diese Anforderung erhoben und dokumentiert. Dort wo keine Befunde vorliegen, werden im Rahmen des Vorhabens VSG vereinfachte Ansätze herangezogen. Die Ansätze müssen durch Expertenurteil begründet sein und später verifiziert werden. 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. Im Synthesebericht zum Vorhaben VSG sind diesbezügliche Informationen zusammenfassend dargestellt.

6 Zusammenfassung

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 die *Sicherheit* des *Endlagers* gewährleisten. Dabei wurden vor allem sicherheitsrelevante Aspekte 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.

Im *Nachweiskonzept* wird detailliert die Vorgehensweise dargestellt, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die *Sicherheit* des *Endlagersystems* auf Basis des *Sicherheitskonzeptes* bewertet und damit Aussagen zum Einschlussvermögen des betrachteten *Endlagersystems* 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.

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 in der methodischen Vorgehensweise bzw. im Rahmen der Modellrechnungen berücksichtigt. Darüber hinaus werden die Ungewissheiten über die Zeitpunkte und Ausprägungen zukünftiger Ereignisse am Standort Gorleben berücksichtigt, beispielsweise im Zusammenhang mit zukünftigen Kaltzeiten.

Literaturverzeichnis

- /ABV 09/ Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung - ABergV), in der Fassung 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 - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S.814), in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /BBG 09/ Bundesberggesetz (BBergG) 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/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Hannover, 2003.
- /BMU 10a/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Gorleben wird weiter erkundet: Transparenz und Verlässlichkeit des Entscheidungsprozesses stehen im Vordergrund. Gorleben Dialog, Pressemitteilung 037/10 v. 15.03.2010: Bonn, 14.03.2010.
- /BMU 10b/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1: Bonn, 2012.

- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben GRS-290, ISBN: 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2013, (in Vorbereitung).
- /GSF 02/ Pröhl, G., Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu §47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz: Neuherberg, 2002.
- /IAEA 11/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements. IAEA Safety Standard Series No. SSR-5, ISBN 978-92-0-103010-8: Wien, 2011.
- /ISI 08/ Kreienmeyer, M., Lerch, C., Polster, M., Tholen, M.: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren, Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Arbeitspaket AP 5. FKZ 02 E 10065, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, April 2008.
- /ISI 10/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Gemeinsamer Bericht der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Braunschweig, Peine, Hannover, April 2010.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

- /MÖN 11/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltes, B., Peiffer, F., Fischer-Appelt, K.: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-271, ISBN 978-3-939355-47-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2011.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6: Paris, 2004.
- /POP 93/ Popp, T., Kern, H.: Thermal dehydration reactions characterised by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 120, No. 1-2, S. 43-57, 1993.
- /STV 08/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), in der Fassung 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).
- /VIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, P., Röhlig, K.-J., Smith, R.: European Pilot Study on The Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste Case Study: Uncertainties and their Management. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2007.
- /WIE 04/ Wiczorek, K., Schwarzianeck, P.: Untersuchung zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2). Abschlussbericht, GRS-198, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, April 2004.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Schematische Darstellung der Einbindung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in die VSG-Arbeiten.....	5
Abb. 3.1	Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase.....	17
Abb. 4.1	Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage.....	49
Abb. 4.2	Expositionspfade bei Nutzung radioaktiv kontaminierten Grundwassers	50

Anhang – Glossar

Abfall, wärmeentwickelnder, radioaktiver	Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sind durch hohe Aktivitätskonzentrationen und damit einhergehende hohe Zerfallswärmeleistungen gekennzeichnet. Sie stellen besondere Anforderungen an ein → <i>Endlager</i> (Endlagerung in tiefen geologischen Formationen, Verwendung von abgeschirmten anlageninternen Transportbehältern, Anwendung spezieller Einlagerungstechniken, thermische Auslegung des → <i>Endlagerbergwerks</i>). 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 → <i>Referenzszenarium</i> nicht erfasste → wahrscheinliche, mögliche Entwicklungen des → <i>Endlagersystems</i> . Solche Entwicklungen können aus dem Auftreten eines weniger wahrscheinlichen → <i>FEP</i> , der weniger wahrscheinlichen Ausprägung eines wahrscheinlichen FEP oder aus der Alternative zu einer spezifischen Annahme für das → <i>Referenzszenarium</i> resultieren.
Barriere	Barrieren sind natürliche oder technische Komponenten des → <i>Endlagersystems</i> . Barrieren sind beispielsweise die Abfallmatrizen, die Abfallbehälter, die Kammer- und Schachtverschlussbauwerke, der → <i>einschlusswirksame Gebirgsbereich</i> (ewG) und die diesen ewG umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten. Eine Barriere kann verschiedene → <i>Sicherheitsfunktionen</i> wahrnehmen. Die → <i>Sicherheitsfunktion</i> 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 übertragigen 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>Einlagerungsbereiches</i> . Es enthält Einlagerungsstrecken und/oder -bohrlöcher und -kammern, einschließlich der Querschläge, durch die das Einlagerungsfeld an die Transportstrecken des → <i>Einlagerungsbereiches</i> 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 das Endlagersystem an diesem 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 das Endlagersystem an diesem 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 für das Endlagersystem 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 oder den → <i>einschlusswirksamen Gebirgsbereich</i> schützen.
Indikator	Bewertungsgröße zur Beurteilung einer Eigenschaft.
Integrität	Der Begriff Integrität beschreibt das Vorliegen der einschlusswirksamen Eigenschaften einer → <i>Barriere</i> .
Langzeitsicherheit	Langzeitsicherheit ist der Zustand des → <i>Endlagers</i> , für den nach der → <i>Stilllegung</i> die diesbezüglichen Sicherheitsanforderungen erfüllt werden /BMU 10b/.
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, möglicher Entwicklungen des → <i>Endlagersystems</i> . Es ergibt sich unter vorher festgelegten Annahmen aus der Kombination der wahrscheinlichen → <i>FEP</i> mit direkter Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren und den → <i>FEP</i> , die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Zu Grunde gelegt wird die wahrscheinliche Ausprägung dieser → <i>FEP</i> , die sich in der Regel aus den wahrscheinlichen Ausprägungen der kausal mit ihnen verbundenen wahrscheinlichen → <i>FEP</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.
Sicherer 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 Modellungswissheiten, 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 → <i>Endlagers</i> (Sicherheitseinschätzung, safety assessment).

Sicherheitsfunktion	<p>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 → <i>Endlagers</i> gewährleistet /BMU 10b/.</p>
Sicherheitskonzept	<p>Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und technischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen dass die → <i>Sicherheit</i> erreicht wird.</p>
Sicherheitsnachweis	<p>Der Sicherheitsnachweis (safety case) baut auf einer umfassenden → <i>Sicherheitsanalyse</i> auf. Er umfasst die Prüfung und Bewertung von Daten, Maßnahmen, Analysen und Argumenten, die die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen und damit die → <i>Sicherheit</i> des → <i>Endlagers</i> 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 → <i>Betriebsphase</i> und für die → <i>Nachverschlussphase</i> des → <i>Endlagers</i> unterschieden /BMU 10b/.</p>
Stilllegung	<p>Die Stilllegung umfasst alle nach Einstellung der Einlagerung getroffenen Maßnahmen einschließlich Verschluss des → <i>Endlagers</i> zur Herstellung eines wartungsfreien Zustandes, der die → <i>Langzeitsicherheit</i> des → <i>Endlagers</i> gewährleistet. Zur Stilllegung können schon während der → <i>Betriebsphase</i> durchzuführende Maßnahmen (z. B. Verschlussbauwerke für befüllte Einlagerungskammern) gehören /BMU 10b/.</p>

Szenarium	Ein Szenarium beschreibt eine von den derzeitigen Standortgegebenheiten ausgehende und aufgrund geowissenschaftlicher oder sonstiger Überlegungen mehr oder weniger → <i>wahrscheinliche Entwicklung</i> des → <i>Endlagersystems</i> mit seinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften nach der → <i>Stilllegung</i> des → <i>Endlagers</i> . Diese Entwicklung wird durch die Ausgangssituation sowie durch zukünftige Ereignisse und Prozesse bestimmt. Es können auch mehrere Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst werden. /BMU 10b/
Szenariientwicklung	Die Szenariientwicklung 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 <i>FEP-Katalogs</i> .
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 978-3-939355-53-3