

**Vorgehensweise bei
der Entwicklung von
Szenarien für die
Nachverschlussphase**

Vorgehensweise bei der Entwicklung von Szenarien für die Nachverschlussphase

Bericht zum Arbeitspaket 1

Weiterentwicklung des
internationalen Stands von
Wissenschaft und Technik zu
Methoden und Werkzeugen
für Betriebs- und Langzeit-
sicherheitsnachweise

Thomas Beuth
Kim-Marisa Mayer

September 2016

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter dem Kennzeichen 3615103240 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren:

Szenarium, menschliches Eindringen, Szenarientwicklung, Sicherheitsfunktion, Rechenfall

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung/ Zielsetzung.....	1
2	Szenarientwicklung und Ableitung von Rechenfällen	3
2.1	Deutschland.....	4
2.2	Frankreich.....	7
2.3	Kanada	9
2.4	Schweden.....	12
2.5	Finnland.....	14
2.6	Schweiz	16
3	Ansätze zur Verifizierung von abgeleiteten Szenarien.....	19
3.1	Identifizierung und Beurteilung potenzieller Ansätze	19
3.2	Sicherheitsfunktionen und Szenarien	24
3.2.1	Frankreich.....	24
3.2.2	Schweden.....	30
3.2.3	Finnland.....	39
4	Menschliches Eindringen in ein Endlager	43
4.1	Nationale und internationale Regeln und Richtlinien sowie Sicherheitsstandards	43
4.1.1	National	43
4.1.2	International.....	57
4.2	Übertragbarkeit der VSG Methode auf andere Standorte.....	68
4.2.1	Kurzdarstellung der VSG Methode	68
4.2.2	Internationale Vorgehensweise	70
4.2.3	Fazit.....	77
5	Zusammenfassung	79
	Literaturverzeichnis.....	81
	Abkürzungsverzeichnis.....	91

Abbildungsverzeichnis.....	95
Tabellenverzeichnis.....	97

1 Einleitung/ Zielsetzung

Der sichere Einschluss von radioaktiven Abfällen in einem Endlager ist im Rahmen eines Sicherheitsnachweises zu belegen. Dazu ist unter Einbeziehung der zeitlichen Veränderungen, die ein Standort und das Endlagersystem im zugrundeliegenden Nachweiszeitraum erfahren können, zu zeigen, dass vorgegebene Sicherheitsanforderungen eingehalten werden. Dabei stellen numerische Analysen mit der Berechnung von verschiedenen Indikatorwerten wichtige Elemente dar.

Voraussetzung für die Durchführung dieser numerischen Analysen sind Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Diese werden beeinflusst durch die jeweiligen geologischen und klimatischen Gegebenheiten am Standort und durch die von der Auslegung und Konzeption des Endlagers abhängigen Wirkungen dieser Entwicklungsmöglichkeiten sowie durch die eingelagerten Abfälle auf das Endlagersystem.

Darüber hinaus können sich Beeinflussungen des Standortes durch zukünftige menschliche Aktivitäten ergeben. Von den einzelnen mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle befassten Nationen werden unterschiedliche Vorgehensweisen und Ansätze zur Entwicklung von Szenarien zugrunde gelegt. Das übergeordnete Ziel bei der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase beinhaltet die Vorhaltung von Methoden, die eine systematische, möglichst umfassende und widerspruchsfreie Ableitung von Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems erlauben. Darüber hinaus ist die Umsetzung der abgeleiteten Szenarien in Rechenfällen ein viel diskutiertes Thema. Die Fragestellung hierbei bezieht sich auf mögliche methodische Ansätze, die eine Überführung der Szenarien in Rechenfällen unterstützen. Insgesamt besteht zur systematischen Vorgehensweise der Szenarientwicklung und zur Umsetzung der Szenarien in Rechenfällen Entwicklungsbedarf.

Darüber hinaus besteht ein wesentliches Anliegen der Szenarientwicklung in der Erarbeitung von alternativen oder diversitären Ansätzen, die die Ergebnisse von angewandten Methoden in Form von abgeleiteten Szenarien untermauern bzw. stützen. Hierzu besteht nach wie vor F&E-Bedarf.

Ein weiterer Aspekt zur Szenarientwicklung in der Nachverschlussphase bezieht sich auf die o. g. menschlichen Aktivitäten an einem Endlagerstandort. Hier ist insbesondere das menschliche Eindringen („Human Intrusion“ HI) in ein Endlager ein Thema, das sowohl im nationalen als auch internationalen Rahmen als wesentlicher Un-

tersuchungsschwerpunkt im Fokus steht. Derzeit wird dieses Thema von den einzelnen Nationen aus methodischer Sicht in deutlich unterschiedlicher Weise behandelt. Auch die regulatorischen Anforderungen hinsichtlich der Behandlung dieser Thematik weichen sehr stark voneinander ab. Zu dem Aspekt HI besteht insgesamt F&E-Bedarf hinsichtlich der Vorhaltung abgestimmter Methoden und der Übertragbarkeit von entwickelten Ansätzen auf andere Standorte, Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte. Weiterhin besteht Bedarf an allgemein anerkannten internationalen Richtlinien bzw. Leitfäden zur Behandlung von HI in Sicherheitsnachweisen.

In dem vorliegenden Bericht werden die folgenden Aspekte mit dem Fokus auf geologische Endlager für radioaktive Abfälle behandelt bzw. dargestellt:

- Darstellung der Vorgehensweise zur Szenarientwicklung und Ableitung von Rechenfällen zu ausgewählten Ländern (Kapitel 2).
- Identifizierung von potenziellen Ansätzen zur Verifizierung von abgeleiteten Szenarien (Kapitel 3).
- Darstellung des menschlichen Eindringens in ein Endlager unter den Aspekten (Kapitel 4)
 - vorliegender nationaler und internationaler Richtlinien und Sicherheitsstandards hinsichtlich der Berücksichtigung in Sicherheitsnachweisen und
 - der Übertragbarkeit einer entwickelten Vorgehensweise auf andere Standorte und Endlagerkonzepte.

2 Szenarientwicklung und Ableitung von Rechenfällen

Die Identifizierung der internationalen Praxis zur Szenarientwicklung und der Ableitung von Rechenfällen einiger ausgewählter Nationen werden dargelegt, sodass ein internationaler Vergleich der verschiedenen Vorgehensweisen und Ansätze ermöglicht wird.

Die Szenarientwicklung kann im Allgemeinen in zwei verschiedenen Ausgangspunkten gegründet sein, die nachstehend zum besseren Verständnis erläutert werden. Bei einem **Top-down** Ansatz basiert sie auf der Ableitung der Szenarien von Sicherheitsfunktionen, die zuvor standortspezifisch definiert wurden. Für den **Bottom-up** Ansatz werden die Szenarien aus den „Features, Events und Processes (FEP)“ entwickelt, die ein Standort erfahren kann. Eine Kombination beider Methoden kann ebenfalls erfolgen /IAEA 12/, /NEA 12/, /WEN 14/. Die genaue Vorgehensweisen können /NEA 12/ entnommen werden.

Aufgrund international unterschiedlicher Bezeichnungen für die verschiedenen Szenarien-Typen ist es erforderlich näher zu erläutern, auf welche Begriffe sich im folgenden Kapitel bezogen wird. Aus dem initialen Zustand des Endlagersystems und seiner nachfolgenden Entwicklung leitet sich das **Referenzszenarium** ab, welches auch Haupt-, Zentral-, Basisszenarium oder Szenarium der normalen Entwicklung genannt wird. Werden eine oder mehrere weniger wahrscheinlichen Bedingungen für das Referenzszenarium angesetzt, resultieren daraus sogenannte alterierte Szenarien oder zusätzliche Szenarien, hier einheitlich bezeichnet als **Alternativszenarien**. Stilisierte Betrachtungen werden oftmals dann vorgenommen, wenn eine Vorhersage von Entwicklungen nicht möglich oder nur mit sehr großen Ungewissheiten behaftet ist. Beispiele hierfür sind die Entwicklung der Biosphäre und menschliche Aktivitäten am Endlagerstandort. Eine weitere Gruppe bezieht sich auf **Störfall-Szenarien** (disruptive scenarios, disturbed scenarios), teilweise auch residuale Szenarien genannt, die im Allgemeinen den vollständigen Ausfall einer Sicherheitsfunktion berücksichtigen und behandeln. Es wird von sehr unwahrscheinlichen und extremen Ereignissen ausgegangen. Gelegentlich werden diese Szenarien in die Gruppe der Alternativszenarien integriert. „**What-if Szenarien**“ können Bestandteil der Störfall-Szenarien sein oder eigenständig behandelt werden. Diese Szenarien werden oftmals zur Illustration der Robustheit des Endlagersystems unter meist nicht physikalischen begründbaren Annahmen herangezogen. Das **menschliche Eindringen** in ein Endlagersystem (Human Intrusion) als

Teilmenge der menschlichen Aktivitäten wird gelegentlich in Störfall-Szenarien integriert oder separat betrachtet /NEA 12/.

Nachfolgend werden die Methoden zur Szenarientwicklung Deutschlands, Frankreichs, Kanadas, Schwedens, Finnlands, und der Schweiz beschrieben.

2.1 Deutschland

Im Rahmen des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)“ erfolgte die Durchführung einer Szenarientwicklung, die eine wesentliche Komponente in Sicherheitsanalysen darstellt. Hierin wurde die Szenarientwicklung auf der Basis einer erarbeiteten Methodik, die eine systematische Vorgehensweise zur Ableitung eines Referenzszenariums und von Alternativszenarien für verschiedene Einlagerungsvarianten erlaubt, vorgenommen /BEU 12b/.

Das Referenzszenarium beinhaltet dabei je Einlagerungsvariante eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Die Alternativszenarien stellen gegenüber dem Referenzszenarium abweichende Entwicklungsmöglichkeiten dar, die sowohl wahrscheinlich als auch weniger wahrscheinlich sein können.

Zur Ableitung der Szenarien ist eine Reihe von Grundlagen wie z. B. regulatorische Rahmenbedingungen, die Standortbeschreibung und die geowissenschaftliche Langzeitprognose, grundlegende Annahmen und die Abfallspezifikation einzubeziehen. Das Kernstück für die Anwendung der Methode bildet ein FEP-Katalog /WOL 12/, in dem die sog. Initial-FEP (wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung der Funktion von Initial-Barrieren des Endlagersystems wie Wirtsgestein, Verschlüsse und Behälter) sowie die FEP Radionuklidmobilisierung und Radionuklidtransport und deren Abhängigkeiten zu anderen FEP ausgewiesen sind. Der FEP-Katalog beinhaltet somit schon die Ausweisung von FEP, die den Rahmen für das **Referenzszenarium** bilden. Weiterhin wurden zur Entwicklung der Referenzszenarien Randbedingungen aufgestellt, zu denen die Festlegung eines Klimabildes und weitere spezifische Annahmen gehören.

Hinsichtlich der Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen ist darauf hinzuweisen, dass nur eine übergeordnete Sicherheitsfunktion zugrunde gelegt wird, die auf den „Sicheren Einschluss“ der radioaktiven Abfälle ausgerichtet ist. Weitere Sicherheitsfunktionen werden in der entwickelten Methode nicht betrachtet.

Die Gruppe der **Alternativszenarien** sind abweichende Entwicklungsmöglichkeiten, wobei sich jedes Alternativszenarium in genau einem Aspekt (zusätzliches FEP, geänderte spezifische Annahme oder Ausprägung eines FEP) vom Referenzszenarium unterscheidet.

Die Methode ermöglicht für den Großteil der Szenarien die Ableitung nach dem Bottom-up Ansatz. Für den geringeren Anteil an Szenarien, der aus der Betrachtung alternativer spezifischer Annahmen resultiert, wird der Top-down Ansatz verfolgt. Somit stellt die Methode insgesamt einen Mischansatz aus Bottom-up und Top-down dar.

Darüber hinaus erlaubt die Methode die regulatorisch geforderte Einordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen /BMU 10/, /BMUB 12/. Die abgeleiteten Szenarien werden entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausprägung in die Kategorien „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet. In Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitszuordnung sind gemäß /BMU 10/, /BMUB 12/ unterschiedlich restriktive radiologische Schutzkriterien anzusetzen. Neben den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen fordern die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ auch die Behandlung von „unwahrscheinlichen“ Entwicklungen, deren systematische Ableitung mit der vorliegenden Methode nicht vorgenommen werden kann.

Weitere Szenarien wie „**What-if Szenarien**“, die meist zur Darstellung der Robustheit eines Endlagersystems herangezogen werden als auch **stilisierte Szenarien**, die u. a. das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager (Human Intrusion) betreffen, wurden in der VSG separat von der durchgeführten systematischen Szenarientwicklung behandelt.

Die Abb. 2.1 zeigt eine Einteilung von Szenarien gemäß dem Arbeitskreis „Szenarientwicklung“, die der beschriebenen Behandlung bzw. Berücksichtigung von Szenarien in der VSG entspricht.

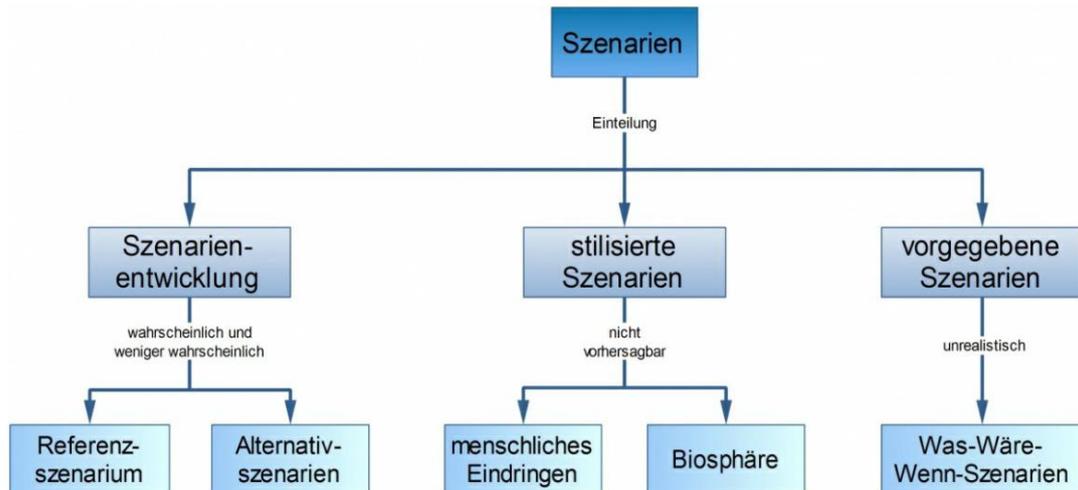


Abb. 2.1 Darstellung und Einteilung von Szenarien /GRS 16/

In Bezug auf das **menschliche Eindringen** wurden drei Haupttypen von Szenarien die sich auf die Erstellung einer Erkundungsbohrung, einer Kaverne und eines Bergwerkes beziehen, betrachtet. Die Grundlagen zur Behandlung der Szenarien aufgrund eines menschlichen Eindringens waren wiederum in /BMU 10/, /BMUB 12/ vorgegeben. So sind nur Entwicklungen auf der Basis eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens sowie übliche menschliche Aktivitäten zu berücksichtigen. Weitere Details zu regulatorischen Vorgaben zur Thematik „menschliches Eindringen“ werden in Kapitel 4.1.1.1 wiedergegeben.

Die Referenz- und Alternativszenarien bilden die Grundlage für Modellrechnungen z. B. zur Integritätsanalyse und radiologischen Konsequenzenanalyse. Die Ergebnisse aus den Modellrechnungen gehen wiederum in die Beurteilung bzw. Bewertung der Auswirkungen der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase ein.

Für die Durchführung der Modellrechnungen ist es essenziell aus den Szenarien Rechenfälle zu definieren. Dieser Schritt beinhaltet aufgrund komplexer Vorgänge oder eingeschränkter Abbildungsmöglichkeit oftmals die modellmäßige Abstraktion der Szenarien mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte.

2.2 Frankreich

Der durch die französische Behörde für die Entsorgung radioaktiver Abfälle „Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA)“ erhobene Sicherheitsnachweis muss der National Assessment Commission vorgelegt werden, die diesen nach Prüfung autorisiert. Zudem gewährleisten die fortlaufenden Überprüfungen der Nuclear Safety Authority (Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN)), gemeinsam mit weiteren Organisationen, den Fortschritt der Arbeiten. Die Basic Safety Rule RFS III.2.f bietet eine Grundlage in der die Terminologie und Ziele eines Sicherheitsnachweises aufgeführt werden /AND 05c/, /ASN 08/. Der Geltungszeitraum der Prognosen für die Szenarientwicklung umfasst in der Zusammenfassung der Forschungsergebnisse „Dossier 2005 Argile“ 1 Million Jahre /AND 05b/.

Die Charakterisierung des Abfallinventars sowie der Geologie gehen der Formulierung der Sicherheitsfunktionen voraus, die zur Szenarientwicklung herangezogen werden. Mit dieser Vorgehensweise wird ein Top-down Ansatz /AND 05a/, /AND 05b/ beschrieben. Bezüglich der Klimaentwicklung werden zwei Ansätze verfolgt. Hierbei wird zum einen eine ungestörte Weiterführung der glazialen Zyklen erwartet, die Intervalle von 100.000 Jahren aufweisen. In einem weiteren Ansatz wird eine durch den Menschen verursachte Klimaerwärmung für mehrere zehntausender Jahre angenommen. Nach 500.000 Jahren wird die Rückkehr zu dem natürlichen Klimazyklus angenommen /AND 05b/.

Die Analyse der Standortentwicklung ermöglicht eine Einteilung in wahrscheinliche, unwahrscheinliche und konventionelle Entwicklungen („What-if Szenarien“), die zur Konzipierung einer „normalen Entwicklung“ sowie einer „alterierten Entwicklung“ führen. Verschiedene Szenarien werden dann aus diesen abgeleitet. Da die Prognose der wahrscheinlichen Entwicklung eine hohe Variationsbreite besitzt, werden verschiedene Pfade nach einer Analyse der Unsicherheiten definiert und das resultierende **Referenzszenarium** (Szenarium der normalen Entwicklung; SEN) so aufgebaut, dass es alle wesentlichen Aspekte dieser Entwicklung repräsentiert (Abb. 2.2). Die Referenzszenarien geben die erwartete Entwicklung des Endlagersystems wieder, in der alle Sicherheitsfunktionen als intakt vorausgesetzt werden.

Die ganzheitliche Betrachtung der Unsicherheiten aller relevanten Sicherheitsfunktionen in der qualitativen Sicherheitsanalyse (QSA) schließt sich an. Auf diese Weise soll verifiziert werden, dass alle FEP berücksichtigt und das Endlagerdesign korrekt ge-

wählt wurde. Aus der QSA ergeben sich dann die **Alternativszenarien** (alterierte Szenarien; SEA), die „What-if Szenarien“ enthalten. Diese Betrachtungen beschreiben unwahrscheinliche Ereignisse am Standort und umfassen das „Ausfallen von Dichtungen“, „Bohrlöcher“, „massive Degradierungen“ und den „Ausfall der Sicherheitsfunktion der Behälter“. Human Intrusion ist dabei in verschiedenen Variationen in „Bohrloch“-Szenarien enthalten /AND 05a/, /AND 05c/.

Für die Generierung von Prozessmodellierungen zur erwarteten Standortentwicklung werden zwei Referenzfälle mit verschiedenen hydrologischen Modellen entworfen. In einer anschließenden Sensitivitätsanalyse werden Parameter variiert und die Modellempfindlichkeit ausgetestet. Alternativrechenfälle basierend auf den Alternativszenarien belegen die Robustheit des Endlagers. Die Ergebnisse dieser Analyse werden mit den angesetzten Grenzwerten verglichen. Parameterwerte werden, falls vorliegend, aus experimentellen Referenzen entnommen. Die Berechnungen durch ANDRA erfolgen über die, gemeinsam mit der French Atomic Energy Commission (CEA) entwickelte, Simulationsplattform ALLIANCES. Hierbei soll der Nachweis zur Einhaltung des Grenzwertes von 0,25 mSV pro Jahr in den ersten 10.000 Jahren erbracht werden /AND 05a/. Andere untergeordnete Indikatoren wie die Konzentrationsverteilung von Radionukliden ergänzen die Sicherheitsanalysen /AND 05a/, /AND 05c/.

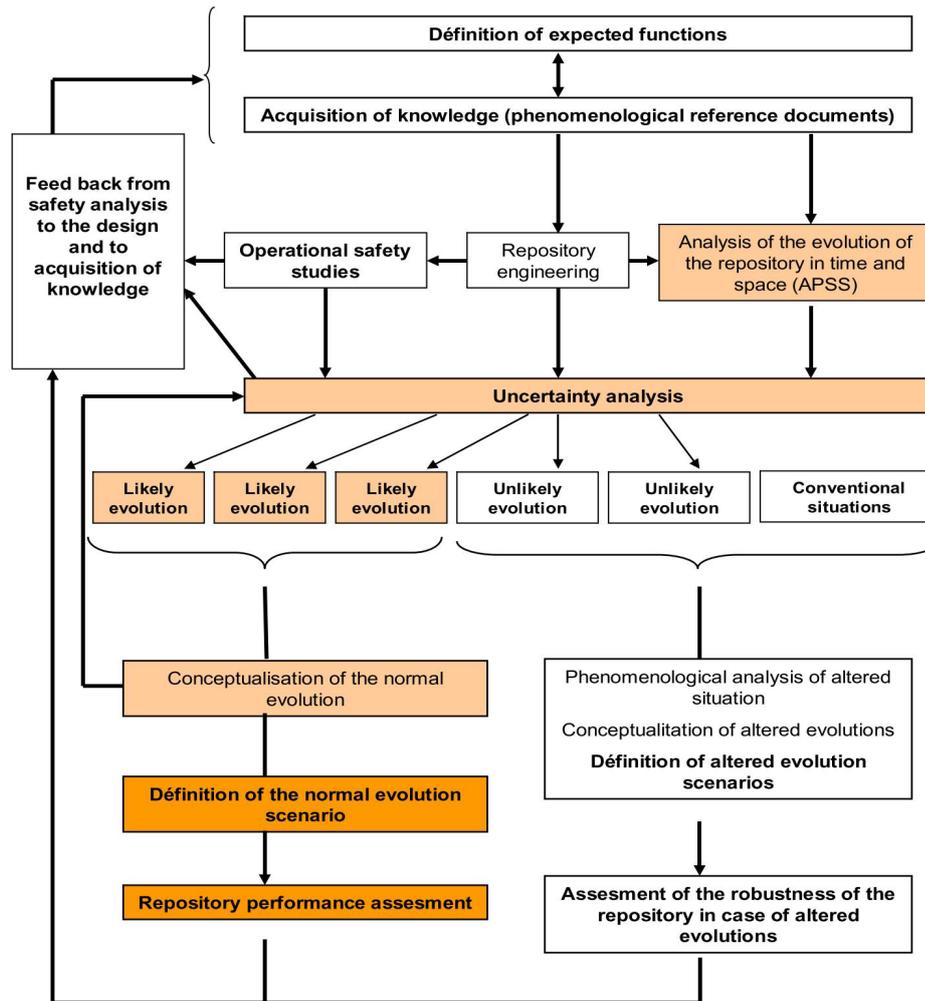


Abb. 2.2 Vorgehen der Szenarienentwicklung in Frankreich /AND 05c/

Orange hinterlegte Kästen wurden in dem zur Abbildung gehörenden Kapitel in /AND 05c/ diskutiert

2.3 Kanada

Die Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) weist darauf hin, dass der Auswahlprozess für die verschiedenen Szenarien transparent, systematisch und nachvollziehbar gestaltet werden soll /CNS 06/. Das Auswahlverfahren soll in einem Bericht umfassend illustriert und begründet werden und alle für die Sicherheitsanalyse relevanten Szenarien umfassen. Der betrachtete Zeitraum für den die Sicherheitsanalyse gültig sein soll ist bisher nicht spezifiziert, in aktuellen Analysen werden jedoch Zeiträume über 1 Million Jahre betrachtet /CNS 06/, /LIT 11/, /NUC 12/. Werden FEP-Varianten im Prozess der Szenarienentwicklung ausgeschlossen, soll eine Bestätigung durch die CNSC erforderlich werden /CNS 06/.

Eine formale Analyse der FEP wird als erforderlich vorausgesetzt. Zudem dienen Brainstorming und Prognosen auf Basis der heutigen gesellschaftlichen Entwicklung als gleichwertige Methoden /CNS 06/. Endlager- und schadstoffrelevante Faktoren werden mit sogenannten „internen FEP“ berücksichtigt, äußere Randbedingungen werden durch „externe FEP“ beschrieben. Diese Vorgehensweise entspricht dem Bottom-up Ansatz. Die verschiedenen betrachteten Ebenen sind in Abb. 2.3 dargestellt /NUC 12/.

Für die Szenarienentwicklung wird zwischen zwei Szenarien-Typen unterschieden. Das **Referenzszenarium** (Szenarium der normalen Entwicklung) bezieht sich auf die erwartete Entwicklung des Standortes, während sich die **Störfall-Szenarien** mit der Einflussnahme verschiedener Störereignisse auf den Standort befassen. Die Sicherheitsanalyse wird dabei in verschiedene zeitliche Sequenzen unterteilt, die die Entwicklungsphasen des Endlagersystems beschreiben. Zusätzlich wird angenommen, dass die derzeitige Klimaerwärmung keinen Einfluss auf den Standort haben wird. Dennoch wird sie im aktuellen Zyklus der Klimaevolution berücksichtigt, indem sie die andauernde Warmphase verlängert und es demzufolge erst nach 60.000 Jahren zu einem Temperaturabfall kommt. Darauf folgend wird, gemäß dem Kenntnisstand der Klimaforschung, ein Wechsel von Kalt- und Warmzeiten angenommen, der sich zyklisch in Sequenzen von 100.000 bis 120.000 Jahren fortsetzt /LIT 11/, /NUC 12/.

Neben dem Ausfall von Dichtungen der Schächte bzw. der Bohrlöcher werden in den Störfall-Szenarien zusätzlich „What-if Szenarien“ betrachtet. In diesen werden Entwicklungspfade behandelt, die außerhalb realistischer Annahmen liegen und die Widerstandsfähigkeit bzw. die Robustheit der Barrieren aufzeigen sollen. Eine vertikale Störung, die den Grundwasserzufluss in das Endlagersystem begünstigen könnte, beschreibt ein solches Szenarium. Als weiteres Szenarium dieser Gruppe gilt das unbeabsichtigte Eindringen von Menschen in das Endlagersystem über eine direkte Bohrung. Eine Kombination verschiedener Störfall-Szenarien wird aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Szenarien ausgeschlossen. In einem letzten Schritt erfolgt ein Vergleich mit Szenarien in anderen Ländern /LIT 11/, /NUC 12/.

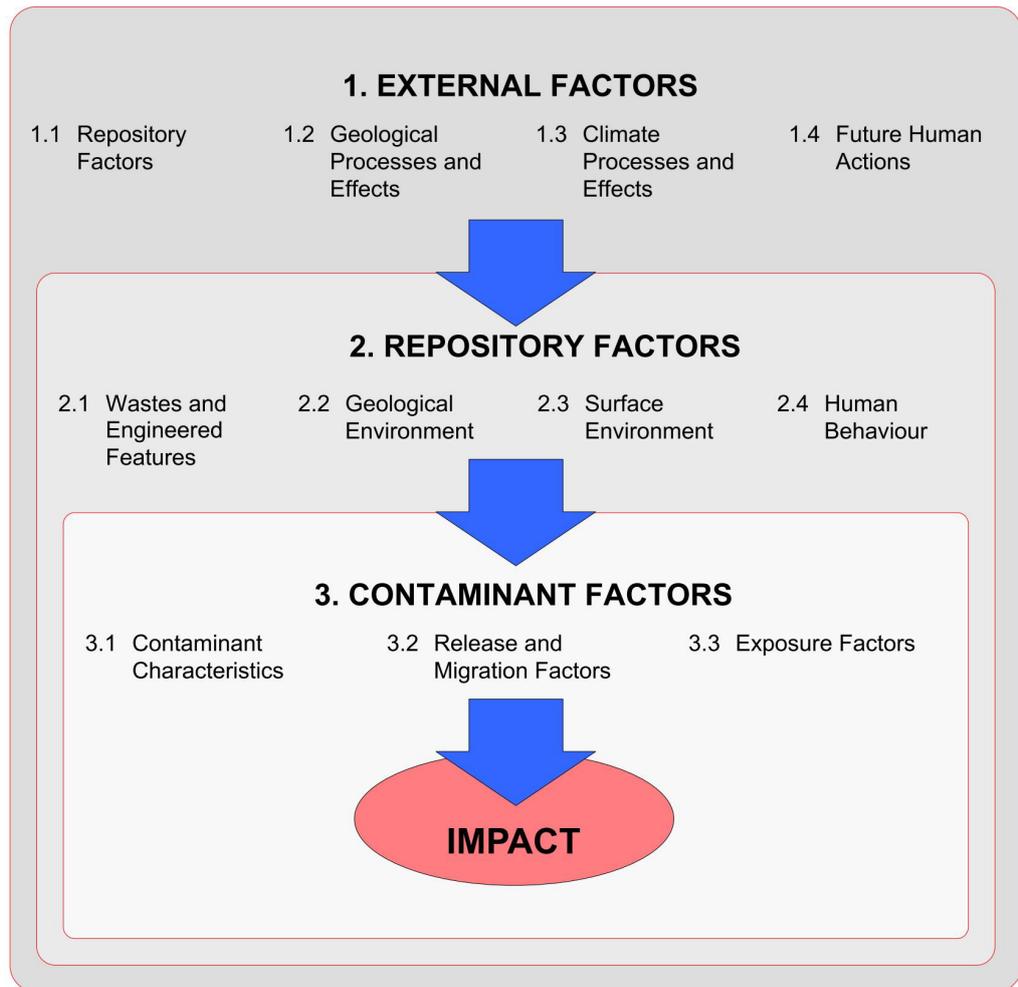


Abb. 2.3 Endlagerbeeinflussende Faktoren in der Methodik von Kanada /NUC 12/

Für die Aufstellung der Rechenfälle wird ein konservatives und systematisches Vorgehen angewendet, in dem Abstraktionen, vereinfachte Annahmen und Limitationen des Modells diskutiert werden müssen. Es wird nach Möglichkeit auf standortspezifische Daten zurückgegriffen. Eine Qualitätssicherung der verwendeten Programme muss fortlaufend gewährleistet werden und Benchmarks müssen die Anwendbarkeit der Programme für die entsprechenden Problemstellungen belegen. Die verschiedenen Szenarien werden anschließend mit Sensitivitätsrechnungen ergänzt /CNS 06/.

Im Rahmen eines Vorhabens wurde ein hypothetischer Standort in einem Kristallingestein des Kanadischen Schildes betrachtet, um zu überprüfen, ob die durch /CNS 06/ vorgegebenen Richtlinien umgesetzt werden können /NUC 12/.

2.4 Schweden

Die durch die Swedish Radiation Safety Authority (SSM) vorgegebenen Regularien werden durch die Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) angewendet. Dabei erschließt sich die Szenarienentwicklung aus einer Kombination des Top-down und Bottom-up Ansatzes. Die Definition der Szenarien über die Sicherheitsfunktionen entspricht dem Top-down Ansatz, während, gemäß dem Bottom-up Ansatz, die Standortentwicklung und die Szenarien systematisch analysiert werden. Hierzu werden sogenannte initiale FEP berücksichtigt, die Prozesse innerhalb des Endlagersystems behandeln /SSM 08b/, /SKB 11c/. Unter anderem zählt der Zerfall radioaktiver Substanzen, der einen Temperaturanstieg in der Abfallmatrix und der Behälterumgebung zur Folge hat, zu diesen Prozessen. Daneben behandeln externe FEP Entwicklungen außerhalb des Endlagersystems inklusive Human Intrusion /SKB 11c/, /SSM 08a/, /SKB 11c/.

In einem ersten Schritt wird gefordert, die Sicherheitsfunktionen zu Endlagerkomponenten zu definieren. Eine Referenzevolution legt daraufhin die allgemein zu erwartende Entwicklung des Systems dar, die darauf folgend mit ihren zwei Varianten die Grundlage für die Szenarienentwicklung bildet. Die erste Variante nimmt eine gleichbleibende Entwicklung des Klimas für die nächsten 120.000 Jahre an, der anschließend sieben Eiszeitzyklen über einen Zeitraum von 1 Million Jahren folgt. Die zweite Variante berücksichtigt in den ersten 120.000 Jahren eine durch den Menschen herbeigeführte Klimaerwärmung /SSM 08b/, /SKB 11a/.

Anschließend werden zwei **Referenzszenarien** (Hauptszenarien) aufgestellt, die die anzunehmende Entwicklung des Endlagersystems gemäß den beiden Referenzevolutionen abbilden (Abb. 2.4) /SKB 11a/. **Alternativszenarien** (zusätzliche Szenarien) behandeln weniger wahrscheinliche Entwicklungspfade bzw. alternative Ereignisse. Berücksichtigt wird der Verlust von Barrieren bzw. deren Barrierenwirkung. Der Verlust der Sicherheitsfunktion des Puffers durch Advektionsprozesse, Permafrost oder Transformation stellen mögliche alternative Szenarien dar. Jedes dieser Alternativen sowie die Annahme eines ungestörten Puffers werden mit dem Ausfall der Behälter, etwa durch Korrosion, isostatischem Druck oder dem Einwirken von Scherkräften, kombiniert. Unsicherheiten, welche nicht im Referenzszenarium berücksichtigt wurden, werden hier miteinbezogen /SKB 11c/. Sogenannte **Störfall-Szenarien** (residuale Szenarien) beschreiben daraufhin weitere noch nicht berücksichtigte, unwahrscheinliche Szenarien und werden nicht in die Sicherheitsbewertung eingebunden. Das menschl-

che Eindringen wird in einer separaten Gruppe geführt und mit verschiedenen Szenarien berücksichtigt, die neben Bohrungen auch den Fall eines offenen und nicht bewachten Endlagersystems und anderen Eindringmöglichkeiten behandeln. Das Betrachten eines unbeabsichtigten Eindringens in das Endlagersystem ist erforderlicher Bestandteil der Sicherheitsanalyse, muss jedoch nicht notwendigerweise in der Risikoabschätzung berücksichtigt werden. Das beabsichtigte Eindringen wird nicht behandelt /SKB 11a/, /SKB 11c/.

Main scenario/Reference evolution					
Name	Initial state EBS	Initial state Site	Process handling	Handling of external conditions	
Base case.	Reference ± tolerances.	Site descriptive model (with variants/ uncertainties).	According to Process reports.	Reference climate (repetitions of Weichselian glacial cycle) No future human actions (FHA).	
Global warming variant.	Reference ± tolerances.	Site descriptive model (with variants/ uncertainties).	According to Process reports.	Extended warm period No future human actions (FHA).	
Additional scenarios based on potential loss of safety functions ("less probable" or "residual" based on outcome of analysis)					
Name	Initial state EBS	Initial state Site	Process handling	Handling of external conditions	
Buffer advection.	Scrutinise uncertainties of relevant initial state factors, internal processes and external conditions possibly leading to violation of safety function indicator under consideration. Analysis of reference evolution used as starting point.				
Buffer freezing.					See above.
Buffer transformation.					See above.
	Consider each of above three buffer states + intact buffer when analysing the three canister scenarios below.				
Canister failure due to isostatic load.	Scrutinise uncertainties of relevant initial state factors, internal processes and external conditions possibly leading to violation of safety function indicator under consideration. Analysis of reference evolution used as starting point.				
Canister failure due to shear load.					See above.
Canister failure due to corrosion.					See above.
Hypothetical, residual scenarios to illustrate barrier functions					
Name	Initial state EBS	Initial state Site	Process handling	Handling of external conditions	
Several cases, covering together the KBS-3 barriers.	As base case of main scenario, except factors related to the hypothetical loss of barriers.				
Scenarios related to future human actions					
Name	Initial state EBS	Initial state Site	Process handling	Handling of external conditions	
Boring intrusion.	As base case of main scenario.	As base case of main scenario.	As base case of main scenario, except processes affected by boring.	Reference climate + boring.	
Additional intrusion cases, e.g. nearby rock facility.	As base case of main scenario.	As base case of main scenario.	As base case of main scenario, except processes affected by intrusion.	Reference climate + intrusion activity.	
Unsealed repository.	As base case of main scenario, but insufficient sealing.	As base case of main scenario.	As base case of main scenario, modified according to initial state.	Reference climate.	

Abb. 2.4 Tabellarische Übersicht der Szenarientwicklung Schwedens

Rot hinterlegte Texte verweisen auf Abweichungen von den grün hinterlegten Randbedingungen des Referenzszenariums

Referenzszenarien gelten als Ausgangspunkt zur Bewertung der Unsicherheiten und zum Ableiten der Rechenfälle. Szenarien sollen in unterschiedlichen Variationen berechnet werden, um die verschiedenen Transportwege für Radionuklide umfassend abzudecken. Für jeden Rechenfall werden verschiedene Zeitschritte betrachtet. Neben den ersten 1.000 Jahren der Nachverschlussphase, wird der Zeitraum bis zum Ende des derzeitigen Interglazials nach 100.000 Jahren betrachtet und quantitativ bewertet. Der letzte Zeitschritt dauert bis zu 1 Million Jahre nach der Verschlussphase an und wird ausschließlich qualitativ bewertet /SKB 11a/.

Eine Anwendung der methodischen Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien erfolgte neben dem SR-Site /SKB 11a/, /SKB 11b/, /SKB 11c/ bereits in der Sicherheitsanalyse des SR-Can Projekts für die Standorte Forsmak und Laxemar in /SKB 06/.

2.5 Finnland

Die Abfälle, die durch die Nutzung der Kernenergie entstanden sind, sollen in einer Mindestdiefe von 400 m im Untergrund isoliert lagern, um so Flora und Fauna vor ihrer schädigenden Wirkung zu schützen. Hierfür wurde in der von POSIVA Oy durchgeführten Sicherheitsanalyse TURVA-2012 eine Zeitspanne von 1 Million Jahre betrachtet. Der verfolgte Top-down Ansatz basiert auf der Erschließung der Sicherheitsfunktionen, dem sich eine Bewertung der Auswirkungen der FEP anschließt /STU 15/. Die regulatorischen Anforderungen der Radiation and Nuclear Safety Authority (Säteilyturvakeskus Strålsäkerhetscentralen (STUK)) /STUK 14/ und der Regierungsanordnung /MEE 08/ geben dabei den Ablauf sowie die für die Sicherheitsanalyse relevante Terminologie vor /POS 12a/. Hierbei sind beispielsweise der früheste zu erwartende Zeitpunkt für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen oder der früheste Eintrittszeitpunkt für die Freisetzung radioaktiver Elemente an die Oberfläche sowie Grenzwerte festgelegt. Es wird gefordert, die Sicherheitsanalyse transparent und nachvollziehbar zu gestalten /STUK 14/.

Zu Beginn werden Sicherheitsfunktionen definiert und Wertebereiche für Systemkomponenten festgelegt sowie FEP erschlossen, die eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen beeinflussen könnten. Danach erfolgt eine Szenarientwicklung für das Endlagersystem und separat für die Biosphäre. Die Methoden sind jeweils ähnlich mit der Ausnahme, dass sich die Sicherheitsfunktionen nur auf das Endlagersystem beziehen. Für das **Endlagersystem** wird, wie in Abb. 2.5 dargestellt, ein **Referenzszenarium**

(Basis-Szenarium) für die erwartete Entwicklung des Systems erschlossen. Dieses bezieht sich auf das Endlager, geologische oder klimatische Entwicklungen sowie auf die menschliche Einflussnahme. **Alternativszenarien** mit veränderten Parameterwerten ergänzen die Analyse. In einem weiteren Schritt werden weniger wahrscheinliche Entwicklungspfade abgeleitet. Die unwahrscheinlichen **Störfall-Szenarien** umfassen auch Human Intrusion sowie „What-if Szenarien“. Für die Berücksichtigung der menschlichen Einflüsse wird eine mit dem heutigen Stand vergleichbare Landschaftsnutzung sowie ein entsprechender technischer Entwicklungsstand angenommen. Unsicherheiten und nachteilige Einflüsse werden herausgearbeitet und Rechenfälle definiert /MEE 08/, /POS 12a/.

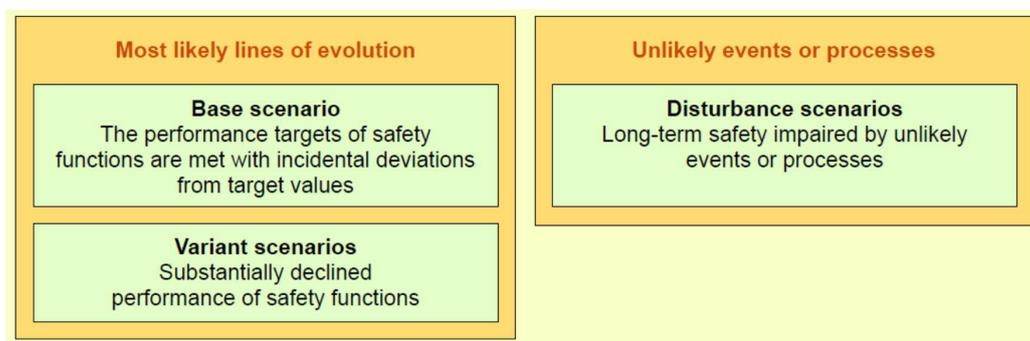


Abb. 2.5 Klassifikation der Szenarien gemäß der finnischen Richtlinien /POS 12a/

Das Base scenario entspricht dem Referenzszenarium, die Variant scenarios den Alternativszenarien und die Disturbance scenarios den Störfall-Szenarien

Daraufhin werden einige Szenarien ausgewählt, die die Grundlage für die Berechnung bilden. Darunter befindet sich ein Referenzfall aus den Referenzszenarien. Rechenfälle zur Beschreibung der Sensitivität, die sich im Rahmen der Alternativszenarien bzw. des Referenzszenariums befinden müssen, schließen sich an. Ergänzende Rechenfälle helfen neben den „What-if Szenarien“, das System und seine Grenzen besser einschätzen zu lernen /MEE 08/, /POS 12a/, /POS 12b/, /POS 12c/. Hierbei bildet ein konzeptionelles Modell die Basis für das mathematische Rechenmodell in dem Vereinfachungen in einer Weise vorgenommen werden, die das Endlagersystem weder über- noch unterschätzen. Modelldaten sollen durch Experimente mit natürlichen Analoga, Feldversuchen oder Laborexperimenten erschlossen werden /STUK 14/.

Für die Berücksichtigung der **Biosphäre** werden FEP und Schlüsselfaktoren für Szenarien für einen Prognosezeitraum von 10.000 Jahren identifiziert, die die Oberflächengeneese, den Entwicklungspfad der Radionuklide sowie eine potenzielle Radionuk-

lidexposition von Mensch, Tier oder Pflanze behandeln. Auf dieser Basis werden ein oder mehrere Entwicklungspfade abgeleitet. Wieder enthält die Analyse ein Referenzszenarium das Variationen aufweisen kann. Danach werden erneut Störfall-Szenarien mithilfe unwahrscheinlicher FEP entwickelt. Analog zur Rechenfall-Analyse für das Endlagersystem werden Berechnungsfälle aufgestellt. Auf Basis der vollständigen Analysen erfolgt schließlich eine Optimierung des Anlagendesigns sowie der technischen Umsetzungen /POS 12b/.

Aufgrund ähnlicher Ausgangsbedingungen ergeben sich gemeinsame Forschungsprozesse zwischen POSIVA und SKB. Auch Parameterwerte können aus diesem Grund teilweise übernommen werden. Vergleiche ermöglichen zudem eine umfangreiche Evaluation der eigenen Ansätze /POS 12c/, /POS 12b/.

2.6 Schweiz

Die Richtlinien für die 1 Million Jahre umfassende Sicherheitsanalyse werden der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) durch das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) vorgegeben. Die Definition der Szenarien über FEP entspricht dabei dem Bottom-up Ansatz. Hierfür wird ein standortspezifischer FEP Datensatz zusammengestellt /JOH 02/, /HSK 07/, /ENSI 09a/, /GAU 10/.

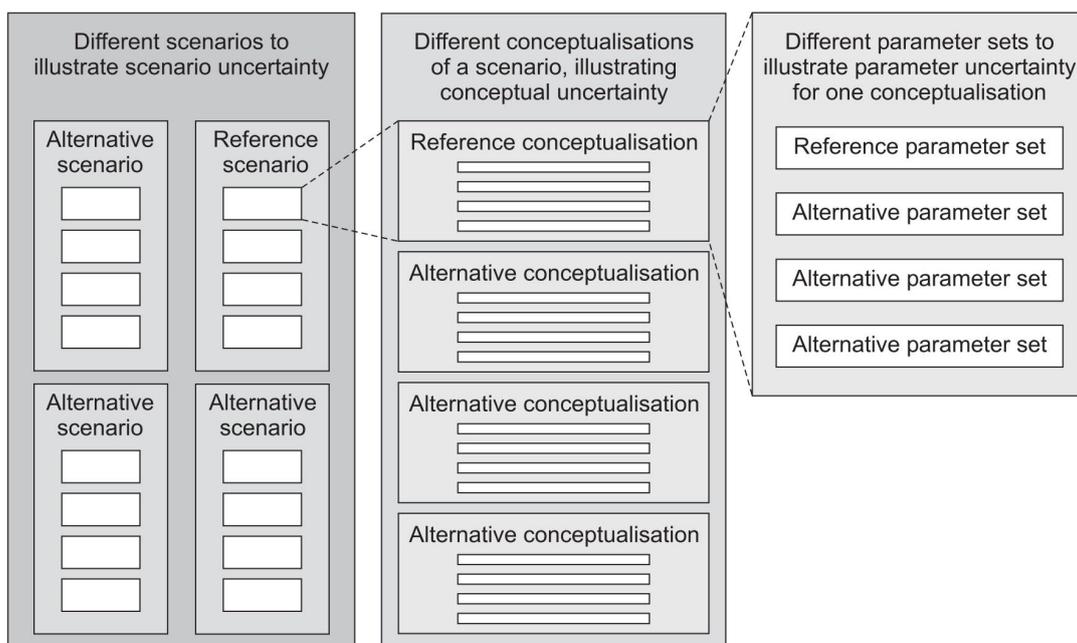


Abb. 2.6 Aufbau der Szenarientwicklung in der Schweiz /JOH 02/

Für das Sicherheitskonzept wird zwischen den tatsächlichen Sicherheitsfunktionen, wie Isolation, langfristiger Einschluss und Begrenzung der Freisetzung, und den Pfeilern der Sicherheit („Pillars of Safety“) bzw. Sicherheitsbarrieren unterschieden. Letztere setzen sich aus der Disposition in der Tiefe, dem Wirtsgestein, den chemischen Rahmenbedingungen, dem Bentonit Puffer sowie den Abfallmatrizen und Behältern zusammen. Sie gewährleisten die Umsetzbarkeit der Sicherheitsfunktionen /JOH 02/, /HSK 07/.

Das **Referenzszenarium** bildet die wahrscheinliche erwartete Entwicklung des Endlagersystems ab, aus der die Referenz-Konzeptualisierung abgeleitet wird. Hier werden die Pfeiler der Sicherheit als intakt angenommen. Zusätzlich werden alternative Entwicklungen des Referenzszenariums betrachtet. **Alternativszenarien**, „**What-if Szenarien**“, Design- und Systemoptionen und Szenarien zur Beschreibung der Genese der Biosphäre werden entwickelt und bilden die Grundlage für die alternativen Konzeptualisierungen /CUR 94/, /JOH 02/, /GRI 02/.

Ein Referenz-Rechenfall, der auf der Referenz-Konzeptualisierung und dem Referenz-Datensatz basiert und die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems darstellt, bildet die Grundlage für Modellberechnungen. Unsicherheiten werden gemäß Abb. 2.6 durch alternative Konzeptualisierungen des Referenzszenariums behandelt. Durch Parametervariationen werden mögliche Unsicherheiten berücksichtigt. Die Modellierung der Rechenfälle erfolgt für den Referenzfall und die meisten der alternativen Rechenfälle mithilfe einer Reihe von Rechencodes. Analog werden die alternativen Rechenfälle aufgebaut /CUR 94/, /JOH 02/. Durch ENSI werden einige zu betrachtende alternative Modellkonzepte vorgegeben /GAU 10/. Eine detaillierte Auflistung der Referenz- und Alternativszenarien, der Modellableitung und der angewendeten Rechencodes kann /GRI 02/ entnommen werden. Eine genaue Beschreibung der vorausgesetzten Transportprozesse und Randbedingungen kann zusätzlich in /JOH 02/ nachgelesen werden.

Der mögliche Eintrag von Radionukliden in die Biosphäre wird mithilfe verschiedener geomorphologischen und klimatischen Entwicklungen umfassend bewertet /CUR 94/, /JOH 02/. In den ersten 60.000 Jahren nach der Schließung wird von der Fortsetzung des derzeitigen interglazialen Klimas ausgegangen, während bis 100.000 Jahre nach Verschluss Kaltphasen mit leichten Vereisungen angenommen werden. Erst in dem nachfolgenden Zeitraum zwischen 100.000 und 1 Million Jahre sind größere Vereisungen berücksichtigt. Eine maximale Strahlungsdosis von 0,1 mSv pro Jahr darf nicht

überschritten werden /CUR 94/, /HSK 07/, /GAU 10/. Bezogen auf den heutigen technischen Kenntnisstand wird das unbeabsichtigte menschliche Eindringen berücksichtigt /CUR 94/, /ENSI 09a/.

3 Ansätze zur Verifizierung von abgeleiteten Szenarien

Im Rahmen des Vorhabens VSG ist erstmals in Deutschland eine umfassende Methode zur Ableitung von Szenarien hinsichtlich der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen entwickelt worden /BEU 12b/. Zur Stützung bzw. Untermauerung der entwickelten Methodik wird es für erforderlich erachtet, einen diversitären Ansatz zur Verfügung zu haben /AKS 16/. Im Rahmen einer Recherche sollen potenzielle Ansätze, die eine Verifizierung der Ergebnisse der angewandten VSG Methode ermöglichen, zunächst identifiziert und beurteilt werden. Hier werden die aus dem vorangegangenen Schritt (Kapitel 2) ausgewählten Länder hinsichtlich der Methoden zur Szenarientwicklung in die Recherche einbezogen.

Als orientierender Ansatzpunkt für einen diversitären Ansatz dient die erarbeitete Grundlage aus dem Vorhaben „Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien (VerSi)“ /BEU 10/, die auf die Festlegung von Sicherheitsfunktionen hinsichtlich relevanter Endlagerkomponenten abzielt. Insbesondere die Formulierung von Sicherheitsfunktionen und deren Zuordnung zu Endlagerkomponenten scheint ein vielversprechender Ansatz für die Entwicklung von Szenarien zu sein, der gleichzeitig die methodische Anknüpfung hinsichtlich der Ableitung entsprechender Rechenfälle erlaubt.

3.1 Identifizierung und Beurteilung potenzieller Ansätze

Die in Kapitel 2 vorgestellten Vorgehensweisen zur Szenarientwicklung von verschiedenen Ländern beinhalten bis auf die Darstellung zur Schweiz und zu Deutschland einen Bezug zu Sicherheitsfunktionen. Hinsichtlich der in der VSG entwickelten Methode zur Szenarientwicklung ist zu bemerken, dass der Aspekt Sicherheitsfunktion für die Ableitung von Szenarien keine Rolle spielt. Jedoch wurden im bereits o. g. Vorhaben VerSi die Vorzüge einer Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen zur Ableitung von Entwicklungen des Endlagersystems eingehend beschrieben. Es wurde darauf eingegangen, dass der Ansatz über Sicherheitsfunktionen eine vielversprechende Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien sein kann. Insbesondere die eingrenzende Betrachtung und Hinterfragung einzelner Sicherheitsfunktionen ohne das gesamte Endlagersystem einzubeziehen macht diesen Ansatz attraktiv.

Die im VerSi Vorhaben entwickelte Methode (Abb. 3.1) beinhaltet einen in vier Phasen eingeteilten Prozess, der im Folgenden kurz skizziert wird /BEU 10/:

Phase 1:

In der Phase 1 erfolgt die Zusammenstellung von Informationen und Grundlagen, auf die in den folgenden Phasen abgehoben wird. So werden in dieser Phase die sog. Systemkomponenten (SK), die in ihrer Gesamtheit die Umwelt, den Standort und alle weiteren wesentlichen zu einem Endlager gehörenden Elemente umfassen, aufgestellt bzw. identifiziert. Weiterhin beinhaltet die Phase die Erstellung einer FEP-Datenbasis, mit den wesentlichen Einfluss nehmenden bzw. bestimmenden Größen auf die zugrunde liegenden Endlagersysteme. Anschließend werden die FEP den SK zugeordnet. Abschließend zur Phase 1 erfolgt die Ermittlung und Beschreibung von Sicherheitsfunktionen (SF) entlang der aufgestellten SK.

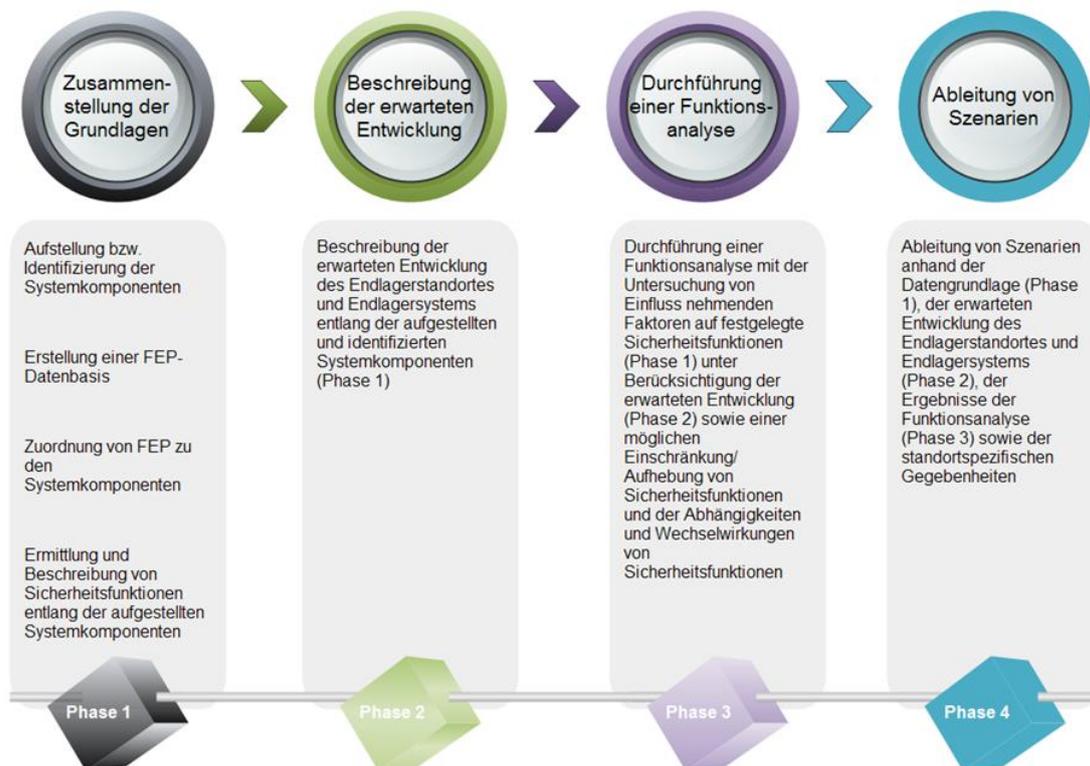


Abb. 3.1 Methodische Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien unter Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen gemäß /BEU 10/

Phase 2:

Die Phase 2 beinhaltet die Beschreibung der erwarteten Entwicklung der Endlagerstandorte und Endlagersysteme entlang der aus Phase 1 aufgestellten und identifizierten Systemkomponenten.

Phase 3:

Der Schwerpunkt der Phase 3 bildet die Durchführung einer Funktionsanalyse mit der Untersuchung von Einfluss nehmenden FEP auf festgelegte Sicherheitsfunktionen, einer möglichen Einschränkung/ Aufhebung von Sicherheitsfunktionen und der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von Sicherheitsfunktionen untereinander.

Phase 4:

In der Phase 4 erfolgt die Ableitung von Szenarien anhand der Datengrundlage aus der Phase 1, der Ergebnisse der Funktionsanalyse aus der Phase 3 und unter Zugrundelegung der erwarteten Entwicklung der Endlagersysteme aus der Phase 2 sowie standortspezifischen Gegebenheiten.

Der beschriebene Prozess hat mit der entwickelten Vorgehensweise in **Frankreich** eine Reihe von Gemeinsamkeiten. So beinhaltet auch der Ansatz in /AND 05c/ eine Aufstellung von Systemkomponenten und eine Zuordnung von definierten Sicherheitsfunktionen zu einer oder mehrerer Systemkomponenten. Darüber hinaus wird in einer Funktionsanalyse die Wirkungsweise der definierten Sicherheitsfunktionen hinterfragt und daraus Szenarien abgeleitet. Der Ansatz Frankreichs ist für die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung eines diversitären Ansatzes in Deutschland vielversprechend und sollte daher berücksichtigt bzw. einbezogen werden.

Die in **Kanada** zur Anwendung kommende Vorgehensweise ist primär auf die Berücksichtigung von sog. externen FEP ausgerichtet. Es wird untersucht, ob diese FEP einen bedeutenden Einfluss auf die Entwicklung des Endlagersystems und/ oder seiner Sicherheitsfunktionen (z. B. Isolation und Einschluss) haben. Bei gegebenem Einfluss wird das entsprechende FEP als potenzielles Szenarium generierendes FEP betrachtet /LIT 11/ (Kapitel 3, S. 71).

Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass zur Vertrauensbildung hinsichtlich der identifizierten Störfall-Szenarien unter Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen und externen FEP, zusätzlich ein komplementärer Ansatz zur Anwendung kommt. Dieser Ansatz hinterfragt die externen FEP in der Weise, ob sie alternative Zustände im Vergleich zur Normalentwicklung einnehmen können, die zu weiteren Szenarien führen /LIT 11/ (Kapitel 8.1, S. 164).

Die Sicherheitsfunktionen werden im kanadischen Ansatz berücksichtigt, spielen jedoch für die Ableitung von Szenarien eine eher untergeordnete Rolle. Der Fokus ist bei dem kanadischen Ansatz auf die sog. externen FEP ausgerichtet. Interessant hierbei ist jedoch, dass neben der eigentlichen Methode zur Entwicklung von Szenarien zusätzlich ein komplementärer Ansatz gewählt und angewandt wird. Das kommt der Forderung des Arbeitskreises „Szenarientwicklung“ /AKS 16/, zur Einschätzung der Aussagequalität einer Methode zusätzlich einen diversitären Ansatz einzusetzen, nahe.

Der Ursprung des Ansatzes zur Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen in der Endlagerung von radioaktiven Abfällen geht vermutlich auf entsprechende Entwicklungen in Schweden zurück. In **Schweden** wird der Ansatz zur Ableitung von Szenarien über Sicherheitsfunktionen schon seit langem angewandt. So ist bereits im SR-Can Vorhaben /SKB 06/ eine entsprechende Vorgehensweise beschrieben. Es werden für Systemkomponenten wie Puffer, Behälter und Wirtsgestein eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen festgelegt. Anschließend wird hinterfragt, welche Mechanismen bzw. Faktoren (FEP) zu einer Beeinflussung oder Aufhebung der festgelegten Sicherheitsfunktionen führen können. Auf dieser Weise werden neben der Referenzentwicklung sog. residuale (sonstige, übrige oder auch restliche) Entwicklungen abgeleitet. Der Ansatz bzw. die Vorgehensweise bei der Festlegung und Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen werden im SR-Site Bericht /SKB 11a/ (Kapitel 2 und Kapitel 8) ausführlich beschrieben.

Der schwedische Ansatz ist bereits mehrmals erprobt worden und stellt eine in sich geschlossene und ausgereifte Methode dar. Die Festlegung von Sicherheitsfunktionen und ggf. Untersicherheitsfunktionen sowie die Zuordnung der Sicherheitsfunktionen zu Endlagerkomponenten entsprechen dem eingangs beschriebenen VerSi Ansatz (Phase 1). Darüber hinaus ist die Hinterfragung der einflussnehmenden Größen auf Sicherheitsfunktionen ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil der Funktionsanalyse im VerSi Ansatz (Phase 3). Für die weitere Entwicklung eines diversitären Ansatzes in Deutsch-

land sollte die schwedische Vorgehensweise analog zu dem Ansatz Frankreichs berücksichtigt werden.

Analog zur Vorgehensweise in Frankreich und Schweden werden in **Finnland** die aufgestellten Sicherheitsfunktionen den Komponenten des geotechnischen Barrierensystems zugeordnet. Zu den Sicherheitsfunktionen der geotechnischen Komponenten und dem Wirtsgestein werden sogenannte Leistungsziele und Zieleigenschaften, die das Wirkungsvermögen beschreiben, formuliert. Das erfordert die Identifikation von unterschiedlichen Beanspruchungen (Einflussgrößen) und Wechselwirkungen, die auf das Endlagersystem über den zugrunde liegenden Betrachtungszeitraum einwirken können. Hierzu werden potenzielle zukünftige Bedingungen als alternative Entwicklungspfade beschrieben und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten auf der Basis heutiger Erkenntnisse und den Ergebnissen früherer Analysen beurteilt. Auf dieser Basis wird die Aussage abgeleitet, dass bei Einhaltung der festgelegten Leistungsziele und Zieleigenschaften und die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems den wahrscheinlichen Entwicklungspfaden folgt, die Sicherfunktionen erfüllt werden. Auch dieser Ansatz, der ähnlich der schwedischen und französischen Vorgehensweise aufgebaut ist, sollte für die weitere Entwicklung eines diversitären Ansatzes in Deutschland berücksichtigt werden.

Der Begriff Sicherheitsfunktion ist ein fester Bestandteil im Sicherheitsbericht /JOH 02/ der **Schweiz**. Die festgelegten Sicherheitsfunktionen haben dabei einen übergeordneten Charakter die keiner bestimmten Endlagerkomponente zugeordnet sind. Für die Ableitung von Szenarien spielen die Sicherfunktionen eine eher implizite Rolle. So werden die Bedeutung von verschiedenen Merkmalen und Phänomene sowie die Konsequenzen von möglichen Abweichungen der erwarteten Entwicklung analysiert. Basierend auf einer qualitativen Einschätzung erfolgt die Identifizierung von wesentlichen Merkmalen und Phänomenen, die einen Beitrag zu den Sicherheitsfunktionen liefern. Ausgehend davon werden die Rechenfälle spezifiziert, in dem zunächst angenommen wird, dass die Sicherheitsfunktionen, bezeichnet als Sicherheitspfeiler, erwartungsgemäß die zuge dachte Funktion erfüllen. Anschließend werden mögliche Störungen der Sicherheitsfunktionen betrachtet.

3.2 Sicherheitsfunktionen und Szenarien

Auf die Bedeutung bzw. Begriffsdefinitionen zu „Sicherheitsfunktionen“ und „Szenarien“ wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen sondern vielmehr auf die ausführliche Darstellung hierzu in /BEU 10/ verwiesen.

Aus den beschriebenen Ansätzen in Kapitel 3.1 bieten sich insbesondere diejenigen aus Frankreich, Schweden und Finnland zur Berücksichtigung der Entwicklung bzw. Weiterentwicklung eines diversitären Ansatzes zur Ableitung von Szenarien in Deutschland an. In diesem Kapitel werden aus den jeweiligen Sicherheitsberichten der genannten Länder die ausgewiesenen Sicherheitsfunktionen, die zugeordneten Endlagerkomponenten sowie die abgeleiteten Szenarien im Folgenden dargestellt:

3.2.1 Frankreich

Nach der Definition der Sicherheitsfunktionen werden diesen Komponenten zugewiesen, die ihre Umsetzung gewährleisten sollen. Nachfolgend werden diese detailliert beschrieben, wobei

Tab. 3.1 die wesentlichen Aspekte zusammenfasst.

Den **Abfall zu isolieren** und so vor menschlichem Eindringen und Oberflächenphänomenen zu schützen stellt die wesentlichste Sicherheitsfunktion dar. Dies gelingt über die Lagerung in tiefen geologischen Formationen. Der ausgewählte Standort muss auf tektonische, vulkanische und klimatische Einflüsse untersucht sein. Ferner sollten keine Ressourcen (Grundwasser, fossile Brennstoffe, Erze) den Standort attraktiv für den Abbau und damit verbunden für das Eindringen in das Endlagersystem durch Bohrungen machen /AND 05c/.

Neben dem **Erhalt der Aufzeichnungen** ist die **Begrenzung der Wasserzirkulation** von essenzieller Bedeutung. Hier muss zwischen verschiedenen Subfunktionen unterschieden werden. In einem Schritt muss ein Wasserzufluss aus den darüber liegenden Formationen über die erschaffenen Zugangsstrukturen unterbunden werden. Damit einhergehend muss die Auflockerungszone reduziert werden und eine hydraulische Regulierung der Zugangswege stattfinden. Die Bündelung der Zugangsschächte, die Abdichtung mit gering permeablen Materialien und die mechanische Stabilisierung der entstandenen Auflockerungszone sind unterstützende Maßnahmen hierfür. Hohlräume sollen auf 5 % reduziert werden und hydraulische Absperrvorrichtungen in gestörten Bereichen sowie die entsprechende Dimensionierung der Dichtungen zur Reduzierung einer Perturbation tragen zur Umsetzung der Sicherheitsfunktion bei. Mit der Anwendung spezieller bergbaulicher Techniken, die unter anderem Bodenunterstützungstechniken, Kontrolle der Grabungsarbeiten, die Orientierung der Schächte und Kammern gemäß dem geringsten Widerstand und spezifische Grabungstechniken umfassen, wird eine Schadensprävention betrieben und eine Minderung der Wasserzirkulation bewirkt /AND 05c/.

Weiterhin muss die Wasserbewegung im Wirtsgestein (Callovo-Oxford Formation) begrenzt werden. Dies wird mit der Wahl des Wirtsgesteins erreicht, das sich durch eine geringe Permeabilität, Homogenität und einen geringen hydraulischen Gradienten auszeichnet. Zuletzt ist die Fließgeschwindigkeit des Wasserflusses zu reduzieren. Hierfür ist zusätzlich zu den oben genannten Komponenten das Endlagerdesign mit seinen Blindstollen (Strecken als Sackgasse) von Bedeutung /AND 05c/.

Die **Freisetzung von Radionukliden zu unterbinden und diese zu immobilisieren** gelingt über die Einlagerung nach physikalisch-chemischen Eigenschaften der Abfälle und über die Behälterwahl. Es werden abfallspezifische Sicherheitsfunktionen erforder-

lich. Sogenannte B-Abfälle, die metallische Stoffe beinhalten, müssen in Besonderem Maße vor Korrosion geschützt sein. Die Zusammensetzung und Verteilung in der Abfallmatrix trägt wesentlich zur Immobilisierung bei. Abfallgebilde werden zusätzlich von Beton umschlossen. Kolloide werden mithilfe einer Verfüllung mit niedriger Porosität gefiltert. Reduzierende Bedingungen und ein alkalischer bis neutraler pH-Wert halten die meisten Elemente in einer immobilen Spezies zurück. Dichtungen und Stahlbehälter schützen den Abfall vor Lösungsprozesse. Wärmeempfindliche bituminöse Abfälle müssen in ausreichendem Abstand zu wärmeproduzierenden oder korrosionsanfälligen Abfällen gelagert werden. Die großräumige Verfüllung mit Beton und eine Gasableitung vermindern den natürlichen Ausdehnungsprozess und puffern chemische Prozesse. Auch hier sind die zuvor aufgeführte Kolloidfiltration und die Minderung der Löslichkeit in unmittelbarer Nähe zu den Abfallstoffen von Bedeutung. Wärmeentwickelnde C-Abfälle werden von Glas umschlossen. Dieses ist wiederum, aufgrund seiner Empfindlichkeit gegenüber hochtemperiertem Wasser, durch einen nicht legierten Stahlbehälter ummantelt, um so den Schutz vor Lösung zu gewährleisten. Statt einer Betonverfüllung hilft eine Bentonit-Verfüllung und ein Bentonit-Verschluss am Kammereingang reduzierende Bedingungen aufrecht zu erhalten, das freie Volumen zu reduzieren, Wasser abzuhalten und Schadstoffe zu binden. Für abgebrannten Brennstoff müssen ähnliche Sicherheitsfunktionen erfüllt werden wie für C-Abfälle. Zusätzlich soll eine technische Barriere vor den thermischen Auswirkungen des Radionuklidzerfalls schützen. Bentonit und Sand wird hierfür empfohlen /NEA 03/, /AND 05c/.

Eine weitere wesentliche Sicherheitsfunktion beschäftigt sich mit der **Verzögerung und Abschwächung des Radionuklidtransports**. Ihre Umsetzung erfolgt über ein Wirtsgestein mit sorbierenden Eigenschaften das überwiegend diffusiven Transport zulässt und eine ausreichende Mächtigkeit besitzt, um einen Zustrom in andere Formationen zu verzögern. Die Endlagerauslegung auf einer Ebene und mit einer geringen Höhe sowie Verfüllungen und Dichtungen auch in umgebenden Schächten schützen Aquifere in Endlagernähe. Genauso ist bei der Errichtung des Endlagers darauf zu achten, die Umgebung möglichst ungestört zu lassen. Technische Barrieren wirken ergänzend /AND 05c/.

Da das Wirtsgestein die wichtigste Komponente des Endlagersystems bildet, müssen ihre Sicherheitsfunktionen erhalten werden. Durch das Ableiten von Hitze sowie die ausschließliche Lagerung wärmeentwickelnder Abfälle nach einer ausreichenden Abklingphase und in entsprechendem Abstand zueinander erfolgt ein Schutz vor Mineraltransformationen (thermale Schutzmaßnahmen). Zuvor erwähnte Maßnahmen zur

Vermeidung von Wasserzufluss aus überlagernden Formation gewährleisten einen mechanischen Schutz. Andere Maßnahmen betreffen hydrologische oder chemische Prozesse und wurden bereits diskutiert /AND 05c/.

Tab. 3.1 Sicherheitsfunktionen und Endlagerkomponenten im Konzept von Frankreich /AND 05c/

Komponente	Maßnahmen	Sicherheitsfunktion
-	Lagerung der Dokumente an verschiedenen Standorten	Erhalt der Aufzeichnungen
Wirtsgestein	Tiefe geologische Lagerung	Isolation des Abfalls vor Oberflächenphänomenen und menschlichem Eindringen
Dichtungen; Verfüllungen; Hohlräume; hydraulische Absperrvorrichtungen; Wirtsgestein	Schachtbündelung; bergbauliche Techniken; Minimierung der Auflockerungszone und der Hohlräume; Anwendung der Komponenten	Begrenzung der Wasserzirkulation: <ul style="list-style-type: none"> • Wasserzufluss aus darüber liegenden Formation über Zugangsstrukturen unterbinden: <ul style="list-style-type: none"> ○ Auflockerungszone limitieren ○ Hydraulische Regulierung der Zugangswege • Wasserbewegungen im Wirtsgestein zu limitieren • Fließgeschwindigkeit des Wasserflusses
Behälter; Abfallummantelungen; Abfallmatrix; Verschlüsse; Verfüllungen; Wirtsgestein	Einlagerungsanordnung; Korrosionsbeständige Behälter; Anwendung der Komponenten	Freisetzung von Radionukliden unterbinden und diese immobilisieren
Transportstrecken; Dichtungen; Wirtsgestein; Verschlüsse; Verfüllungen; Dichtungen	Anwendung der Komponenten	Verzögerung und Abschwächung des Radionuklidtransportes <ul style="list-style-type: none"> • Verzögerung des Radionuklidtransportes durch Diffusion/ Rückhaltung im Wirtsgestein • Verdünnung der Schadstoffe im Wirtsgestein • Aufrechterhaltung der Dispersionskapazität in der Endlagerumgebung
Siehe Begrenzung der Wasserzirkulation	Hitzeableitung; Abklingphase; Abstände zwischen Abfällen	Generische Einrichtungen, die das Wirtsgestein schützen <ul style="list-style-type: none"> • Thermische Schutzmaßnahmen • Mechanische Schutzmaßnahmen • Zusätzliches

Ableitung der Szenarien mithilfe der Sicherheitsfunktionen

Auf Grundlage des Erfahrungsspektrum von ANDRA sowie internationaler Analysen und den Empfehlungen der Basic Safety Rule III.2.f erfolgt eine Identifikation der möglichen Alternativszenarien (SEN) auf die sich eine qualitative Analyse (QSA) anschließt. Diese soll die Vollständigkeit der Szenarien gewährleisten /AND 05c/. In einem ersten Schritt werden Szenarien aus dem Ausfall der drei wesentlichen Sicherheitsfunktionen gebildet, ohne Anspruch auf Vollständigkeit oder Plausibilität zu erheben. Die anschließende QSA wird diese überprüfen. Zweck dieser Szenarien ist es, das Ausmaß eines Ausfalls der Sicherheitsfunktion zu bewerten. Ein zusätzliches Szenarium, in dem das vollständige Versagen aller Sicherheitsfunktionen betrachtet wird, dient der vergleichenden Bewertung der drei vorangegangenen /AND 05c/, /NEA 16/.

1. Der Ausfall der Sicherheitsfunktion „Freisetzung von Radionukliden unterbinden und diese immobilisieren“ wird durch das Szenarium zum Ausfall der Dichtungen (seal failure scenario) beschrieben, das den partiellen oder vollständigen Ausfall der relevanten Dichtungen und Verschlüsse umfasst.
2. Der Ausfall der Sicherheitsfunktion „Begrenzung der Wasserzirkulation“ wird durch das Szenarium zum Behälterausfall (package failure scenario) abgedeckt. Aufgrund eines komplexen Zusammenspiels verschiedener Komponenten, wie Behälter, Abfallmatrix, Radionuklidspezifikation und chemisch-hydraulische Randbedingungen, kann eine Störung dieser Sicherheitsfunktion durch verschiedene Faktoren hervorgerufen werden. Da diese in Ihrer Gesamtheit nicht in einem Szenarium berücksichtigt werden können, wurde ein Szenarium gewählt, das ein Behälterversagen behandelt.
3. Die Sicherheitsfunktion „Verzögerung und Abschwächung des Radionuklidtransportes“ wird hauptsächlich durch das Wirtsgestein mit seinen diffusiven Transportbedingungen erfüllt. Ihr Versagen kann durch ein Bohrloch Szenarium (borehole scenario) behandelt werden.
4. Das Szenarium zur stark degradierten Entwicklung (highly degraded evolution) behandelt den vollständigen Ausfall aller Sicherheitsfunktionen.

Beispiel zum Ausfall der Dichtungen

Für das hier beispielhaft dargestellte Szenarium zum Ausfall der Dichtungen wurde sowohl ein partieller als auch vollständiger Ausfall der Dichtungen oder Kammerver-

schlüsse unter Einbeziehung der Auflockerungszone betrachtet. Dieses dient der Bewertung der Robustheit des Endlagersystems. In Folge der QSA werden Entwicklungen aufgezeigt, die es zu betrachten gilt. Darunter fällt eine teilweise unzureichende Verbindung zwischen Wirtsgestein und Bentonit bzw. eine starke Ausdehnung der Auflockerungszone, wodurch advektiver Transport von Radionukliden ermöglicht werden könnte. Weiter könnten hydro-chemische Änderungen innerhalb der Kammern oder eine Herabsetzung der Permeabilität der Dichtungen einen partiellen Ausfall der Sicherheitsfunktion hervorrufen. Anschließend erfolgt eine umfangreiche Analyse der Unsicherheiten. Beispielsweise werden hier die Unsicherheiten verbunden mit dem Ausdehnungsvermögen des Bentonits oder mit der Zusammensetzung des Grundwassers behandelt. Eine ausführliche Beschreibung kann Kapitel 6.2 sowie 7.2 in /AND 05c/ entnommen werden. Anschließend werden drei Berechnungsfälle aus den vorangestellten Analysen entwickelt sowie ein Berechnungsfall zur Vervollständigung ergänzt. Die Einflüsse dieser auf die verschiedenen Sicherheitsfunktionen, Abfallbehälter und die Auflockerungszone werden daraufhin evaluiert /AND 05c/.

Es wurden die folgenden Rechenfälle betrachtet:

1. Ausfall der Dichtungen der Schächte
2. Ausfall der Dichtungen mit hydraulischen Absperrvorrichtungen
3. Ausfall aller Dichtungen
4. Zurücklassen des Endlagers ohne ober- und unterirdisch Zugangsstrukturen abzudichten

3.2.2 Schweden

Das schwedische und finnische Endlagerkonzept KBS-3 basiert, aufgrund der Lagerung der radioaktiven Abfälle in Granitgestein, in besonderem Maße auf dem Erhalt der Sicherheitsfunktion der Kupferbehälter (Abb. 3.2). Diese werden, mit einem Gusseiseneinsatz ausgestattet und umgeben von Bentonit, senkrecht in der Tiefe gelagert. Eine zusätzliche Sicherheitsfunktion soll die Verzögerung eines möglichen Austritts aus den Behältern (Abb. 3.3) umfassen /AND 00/, /NEA 03/, /SKB 11a/.

Nach der Definition der Endlagerkomponenten werden diesen Sicherheitsfunktionen zugewiesen. Weiterhin wird zwischen Indikatoren der Sicherheitsfunktionen und Indi-

katorkriterien unterschieden. Der Indikator stellt dabei eine messbare Größe dar, mit der die Funktionsweise der Komponente bewertet werden kann, während das Kriterium einen zu erfüllenden Wert vorgibt /AND 00/, /SKB 06/, /SKB 11a/, /NEA 16/.

Die Sicherheitsfunktionen, die durch den **Behälter** erfüllt werden sollen, umfassen gemäß Abb. 3.2 den Schutz vor Korrosion, isostatischem Druck und Scherkräften. Voraussetzung hierfür sind das durchgängige Vorhandensein des Kupfermaterials sowie ein Behälterdesign das entsprechenden Kräften standhalten kann. Der Behälter erfüllt weiterhin die Funktion Wärme abzuleiten und Strahlung abzdämpfen /NEA 03/, /SKB 11a/.

Um die Behälterfunktion langfristig intakt zu halten soll der advective Transport im **Puffersystem** unterbunden werden, um so korrosive Wirkstoffe vom Behälter fernzuhalten und die Freisetzung radioaktiver Stoffe hinauszuzögern. Der Puffer übernimmt ferner die Funktion der Reduzierung mikrobieller Prozesse sowie die Dämpfung von Scherbewegungen und thermisch bedingter Transformationsprozesse. Mithilfe des Quelldrucks wird ein Absinken des Behälters unterbunden /SKB 06/, /SKB 11a/. Der Druck auf den Behälter und das Umgebungsgestein wird unter 15 MPa für den gesättigten Puffer mit seiner spezifischen Dichte liegen. Ab einer Temperatur unter -4 °C kann ein Gefrieren des Puffers auftreten und damit verbunden höhere Drücke erreicht werden. Die Dichte, das Ausdehnungsvermögen, die thermische Resistenz und die Plastizität des Puffers sind essenzielle Eigenschaften, um diese Sicherheitsfunktionen aufrechtzuerhalten /SKB 11a/.

Zum Schutz des Behälters muss das **Versatzmaterial** in den Strecken den Expansionskräften des Puffers Widerstand entgegensetzen, sodass die Dichte des Puffers trotz Ausdehnungsbewegung ausreichend bewahrt wird. Die **Geosphäre** soll chemische, hydrologische, mechanische und thermische vorteilhafte Voraussetzungen erfüllen.

Im Falle eines Behälterversagens sollen Sicherheitsfunktionen zur Rückhaltung eine Ausbreitung der Radionuklide verhindern bzw. verzögern. Die dafür vorgesehenen Endlagerkomponenten und Sicherheitsfunktionen können Abb. 3.3 entnommen werden /AND 00/, /SKB 11a/.

Die Umsetzungsrate des **Brennstoffes** und die Korrosionsrate der Metalle in den Brennstoffelementen stellen die Indikatoren der Sicherheitsfunktion zur Einbindung der

Radionuklide (contain radionuclides) dar, die von der Sicherheitsfunktion zur Aufrechterhaltung von reduzierenden Bedingungen begleitet wird. Die Sicherheitsfunktion zur Begrenzung der Löslichkeit ist unter reduzierten Bedingungen am geringsten, weshalb auch hier die Aufrechterhaltung der reduzierten Bedingungen des Wirtsgesteins von Bedeutung ist. Die Löslichkeit gibt den erforderlichen Indikator an. Mithilfe einer niedrigen Reaktivität des Brennstoffes wird über die Eigenschaften und die Anordnung des Brennstoffs sowie das Material und die Gestaltung des Behältereinsatzes die Kritikalität vermieden. Diese Sicherheitsfunktion wird daher ebenfalls durch den **Behälter** gewährleistet. Auch im Fall eines Behälterversagens wird eine Verzögerung durch diesen hervorgerufen, die gemeinsam mit dem Zeitpunkt des vollständigen Ausfallens der Sicherheitsfunktion des Behälters die Indikatoren zur Bewertung der Bereitstellung des Transportwiderstandes bilden /SKB 11a/.

Safety functions related to containment

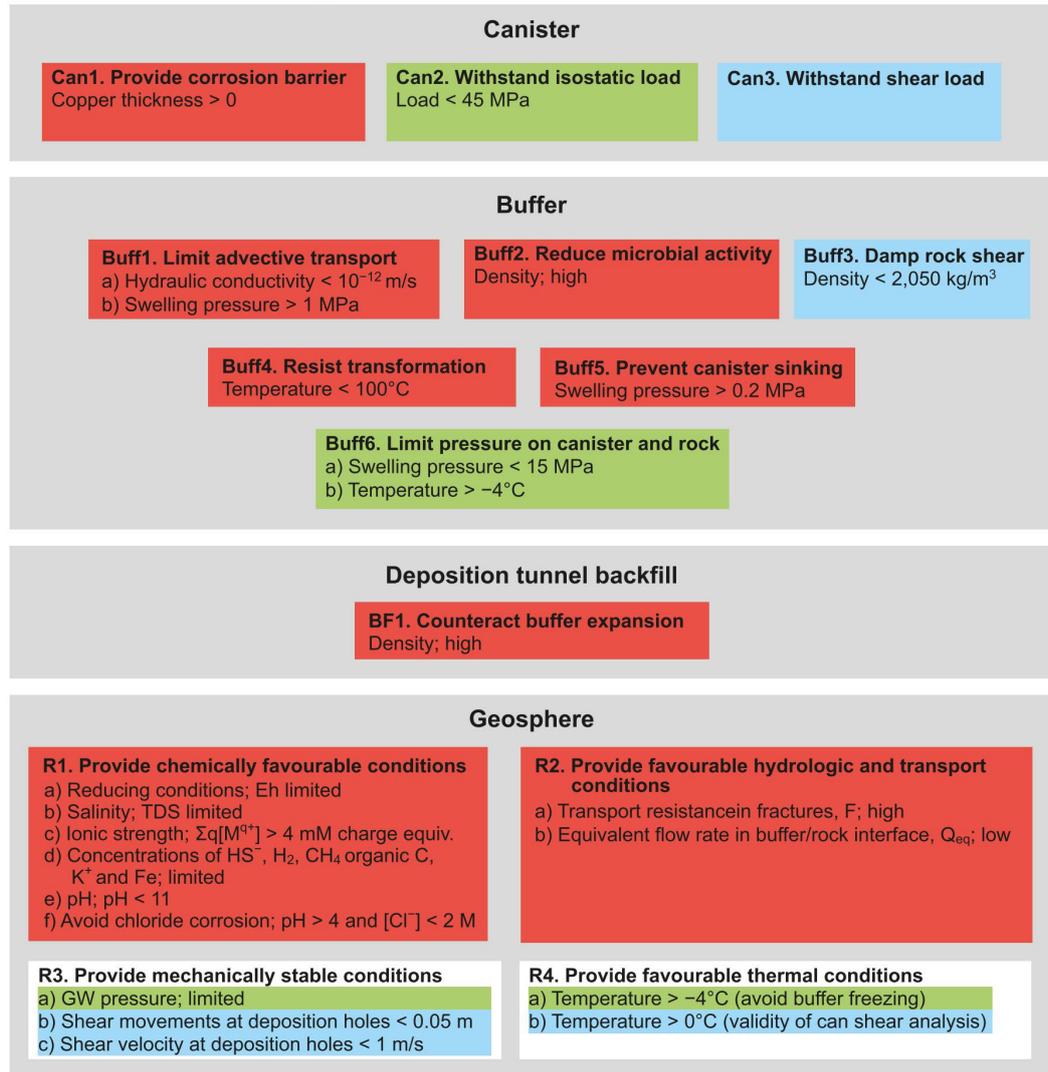


Abb. 3.2 Sicherheitsfunktionen bezogen auf die Sicherheitsbehälter /SKB 11a/

Sicherheitsfunktionen (fett), Indikatoren der Sicherheitsfunktionen und Indikator Kriterien sind dargestellt. Rot hinterlegte Funktionen tragen zur Sicherheitsfunktion Can1 bei, grüne zu Can2 und blaue zu Can3

Das **Puffersystem** trägt mit seinen Sicherheitsfunktionen zur Rückhaltung der Radionuklide bei. Beispielsweise über die Filterung von Kolloiden, die den Transport von Radionukliden aus dem Endlagersystem begünstigen würden, die durch eine hohe Dichte des Puffers erreicht wird. Die entsprechende Angabe des Indikator Kriteriums kann Abb. 3.3 entnommen werden. Der spezifische effektive Diffusionskoeffizient und der Sorptionskoeffizient bilden die Indikatoren der Sicherheitsfunktion zur Radionuklidsorption. Zusätzlich wird die Sicherheitsfunktion zur Gasableitung durch ein Puffersystem gewährleistet, welches sich durch einen geringen Quelldruck auszeichnet /SKB 11a/.

Safety functions related to retardation

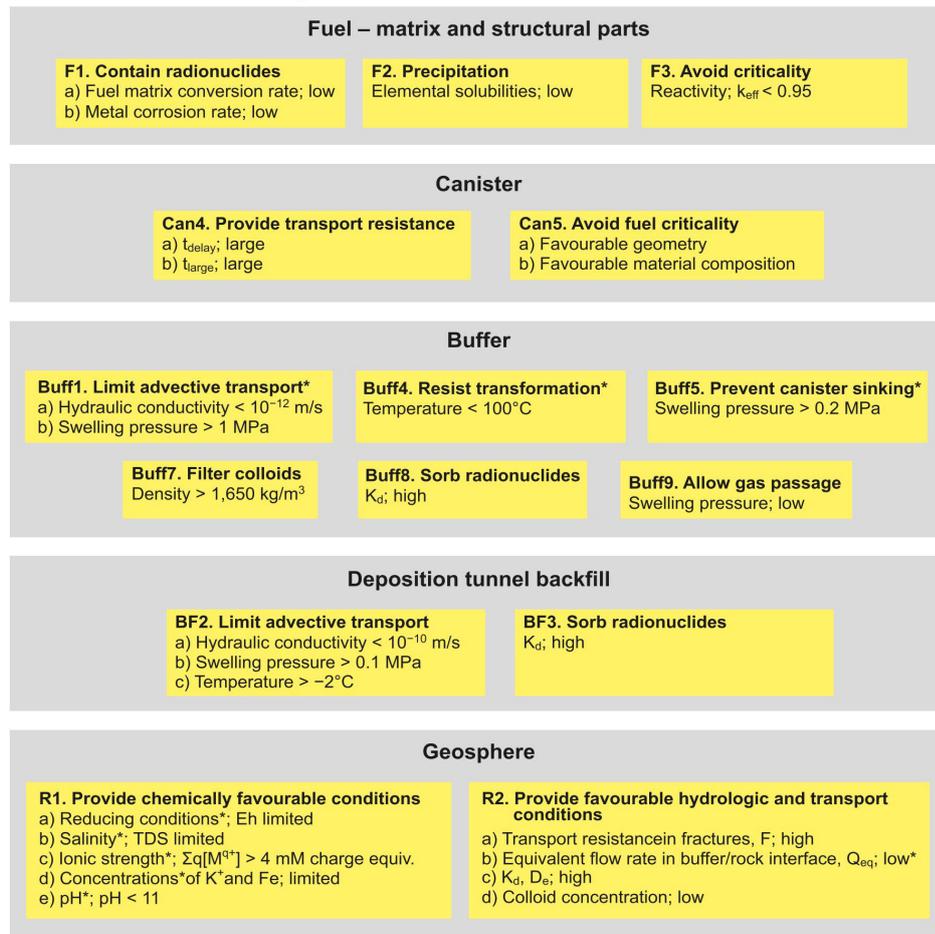


Abb. 3.3 Sicherheitsfunktionen bezogen auf die Rückhaltung /SKB 11a/

Sicherheitsfunktionen (fett), Indikatoren der Sicherheitsfunktionen und Indikator Kriterien sind dargestellt. Die Begriffe „high“, „low“ und „limited“ ermöglichen eine Approximation der angestrebten Werte, wenn quantitativen Kriterien fehlen. Angaben mit (*) gelten auch für die Sicherheitsfunktionen der Behälter /SKB 11a/

Dem **Versatz** werden die Sicherheitsfunktionen zur Reduzierung advektiven Transportes und der Sorption von Radionukliden zugeordnet. Diese werden erreicht, indem die Kriterien zur reduzierten hydraulischen Konduktivität (Leitfähigkeit) und des Quelldruckes umgesetzt werden sowie ein Gefrieren der Verfüllungen mit dem Temperaturkriterium ausgeschlossen werden kann. Weiterhin tragen die Sorptionskoeffizienten zur Einhaltung der Funktion bei /SKB 11a/.

Die **Geosphäre** ermöglicht durch eine Rückhaltung mithilfe der Matrixdiffusion und Sorption sowie niedriger natürlicher Kolloidkonzentrationen zur Sicherheit beizutragen.

Indikatoren hierfür sind die effektive Diffusion, Sorptionskonzentrationen und Kolloidkonzentrationen /SKB 11a/.

Ableitung der Szenarien mithilfe der Sicherheitsfunktionen

Unter der Voraussetzung intakter Endlagerkomponenten und der wahrscheinlichen Entwicklung des Standortes wird das Referenzszenarium abgeleitet. Der partielle oder vollständige Ausfall einer oder mehrerer Sicherheitsfunktionen wird nachfolgend zur Generierung von alternativen Szenarien herangezogen. Anschließend werden die Unsicherheiten der Ereignisse unter Zuhilfenahme der FEP-Tabellen evaluiert, um die grundlegenden Mechanismen, die zu einer Beeinflussung der Sicherheitsfunktionen führen können, zu identifizieren. Eine Beurteilung der Wahrscheinlichkeiten hilft bei der Einteilung der Szenarien in wenig wahrscheinliche Alternativszenarien oder nicht auszuschließende residuale Störfallszenarien /SKB 06/, /SKB 11c/.

Abb. 3.4 zeigt den Aufbau der Szenarienanalyse basierend auf den Sicherheitsfunktionen. Hierbei wird das Referenzszenarium als Ausgangspunkt definiert. Unsicherheiten, die dort noch nicht behandelt wurden, werden nun berücksichtigt. Die verschiedenen Ausfallzustände des Puffersystems, wie Advektion im Puffer, transformierter oder gefrorener Puffer, werden als eigenständige Szenarien angenommen. Wurde eines der Szenarien bezogen auf das Puffersystem als Störfall-Szenarium eingestuft, wird es nachfolgend nicht weiter berücksichtigt. Nach der Bewertung und Analyse des Puffersystems findet eine Kombination dieser Szenarien mit Szenarien des Behälterversagens statt. Die Analysen umfassen auch die mögliche Radionuklidfreisetzung und die Einflussnahme des Zustandes des Puffers auf die Behälter. Sicherheitsfunktionen der Geosphäre werden jeweils innerhalb der Betrachtung der Unsicherheiten eingebunden /SKB 06/, /SKB 11c/.

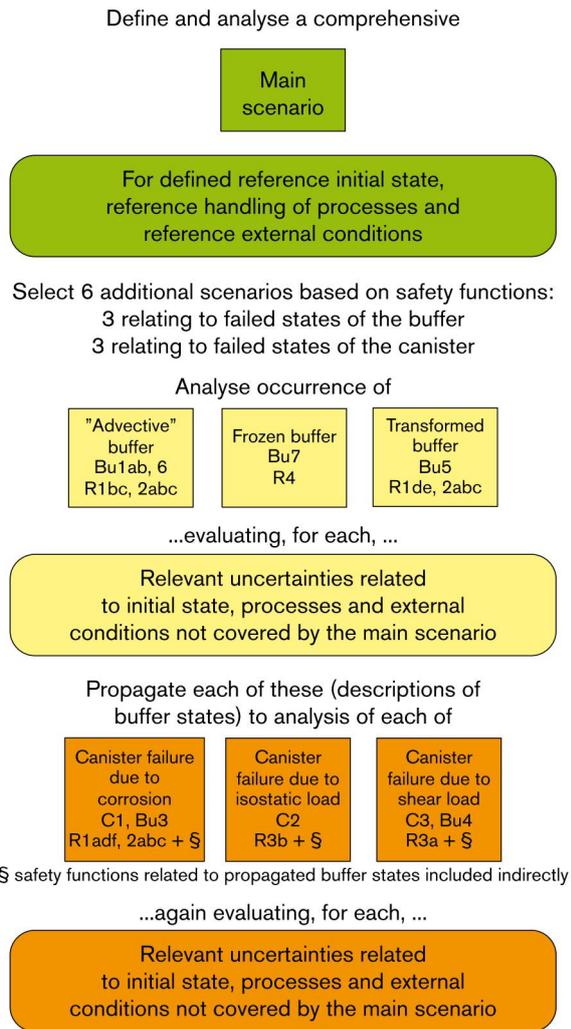


Abb. 3.4 Szenarientwicklung mithilfe der Sicherheitsfunktionen /SKB 06/, /SKB 11c/

Die Alternativszenarien gehen aus dem Referenzszenarium (grün hinterlegt) hervor und behandeln den Ausfall der Sicherheitsfunktionen des Puffersystems (gelb hinterlegt) und des Behälters (orange hinterlegt)

Steht ein Indikator der Sicherheitsfunktion und das dazugehörige Kriterium für die Sicherheitsfunktion zur Verfügung wird im Zuge der Generierung der Alternativszenarien davon ausgegangen, dass dieses Kriterium nicht erfüllt werden kann. Eine qualitative und quantitative Beschreibung der Wege, die zu diesem Über-/Unterschreiten des Kriteriums führen, wird mithilfe der FEP-Tabellen aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Risikobewertung aller wesentlichen Ergebnisse /AND 00/, /SKB 06/, /SKB 11c/.

Beispiel „Advektion im Puffer“

Exemplarisch soll die Szenarientwicklung kurz für den Betrachtungsfall „Advektion im Puffer“ gemäß /SKB 06/, /SKB 11c/ beschrieben werden.

Bereits im Referenzszenarium wird von einem partiellen Versagen der Sicherheitsfunktion des Puffers im betrachteten Zeitraum von 1 Million Jahre ausgegangen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde zudem nachgewiesen, dass ein initiales Auftreten dieses Ausfalls zu vergleichbaren Auswirkungen führt. Drei wesentliche Entwicklungen können für Advektionsprozesse im Puffer abgeleitet werden:

1. Im gesamten Endlagersystem und während der vollständigen Bewertungsperiode ist Advektion anzunehmen
2. Die Advektion beschränkt sich auf das im Referenzszenarium festgelegte Ausmaß
3. Im gesamten Endlagersystem während der vollständigen Bewertungsperiode ist Diffusion anzunehmen

Berücksichtigte Indikatoren. Das Puffersystem übernimmt unter anderem die Sicherheitsfunktion der Prävention advektiven Transportes. Aufrechterhalten wird diese Funktion über eine niedrige hydraulische Konduktivität und ein Mindestquelldruck, so dass die selbstabdichtende Eigenschaft erhalten bleibt und Advektion unterbunden wird. Beide könnten durch Materialverlust und damit einhergehend durch die Abnahme der Dichte des Puffers, genauso wie durch Mineraltransformation gefährdet werden. Die Folge dieser Entwicklungen könnten eine erhöhte Konduktivität oder Frakturen im Puffer sein.

1. **Erhöhte Konduktivität:** Verlust von Puffermaterial ermöglicht die freie Bewegung von Wasser
2. **Frakturen:** Einschussfähigkeit des Puffers entfällt und Frakturen können durchströmt werden

Advektion im Puffersystem würde das Korrosionsrisiko intakter Behälter erhöhen, während für einen defekten Behälter eine Einflussnahme auf die Radionuklidmobilität ausgeübt werden würde. Sogenannte Sub-Indikatoren können aufgestellt werden. Die hydraulische Konduktivität wird durch die Dichte des Puffers aber auch durch die Art der

Kationen oder eine geringe Salinität im Puffer beeinflusst. Weiter kann auch die Temperatur als Sub-Indikator gesehen werden. Das Absinken des Puffers und erhöhte Temperaturen in seiner unmittelbaren Umgebung wurden an anderer Stelle betrachtet /SKB 06/, /SKB 11c/.

Betrachtung im Referenzszenarium. Im Referenzszenarium wurde Advektion gemäß den empfohlenen Vorgaben berücksichtigt /SKB 06/, /SKB 11c/.

Qualitative Herleitung der Wege die zu Advektion im Puffer führen. Die Dichte des Puffers könnte sich aufgrund verschiedener aufgeführter Prozesse reduzieren. Die Erosion während der Aufsättigungsphase, Ausdehnungsprozesse die nicht ausreichend durch Versatzmaterial unterbunden werden, Erosion durch verdünnte glaziale Grundwässer stellen Beispiele dar. Zusammenfassend wird ausschließlich eindringendes glaziales Grundwasser als Störungsursache angenommen. Nach einer Abfolge glazialer Zyklen kann Advektion nicht mehr ausgeschlossen werden. Initiale Faktoren wie die Dichte des Puffers und Versatzes sowie ihre Materialzusammensetzung, externe Bedingungen wie eine erhöhte Strömung und Prozesse wie Kolloidfreisetzung werden identifiziert /SKB 06/, /SKB 11c/.

Quantitative Bewertung. In der quantitativen Bewertung werden Ursachen identifiziert, die nicht im Referenzszenarium berücksichtigt wurden und zu Advektion im Puffer führen könnten. Der Einfluss von Mineraltransformation, Variationen der Ionenstärke und Dichteänderungen bzw. zu geringe eingebrachte Mengen des Puffers oder Versatzes wurden aus diesem Grund nicht wiederholt betrachtet. Ebenso die als äußerst unwahrscheinlich beurteilte Erosion durch Rohrleitungen oder die Kolloidfreisetzung während der glazialen Zyklen. Das versehentliche Vergessen eines Puffers wird im Rahmen von Ausdehnungsberechnungen abgedeckt. Variationen mit untergeordneter Einflussnahme wie einer Inhomogenität des Puffermaterials, welches zudem unwahrscheinlich ist, werden nicht berücksichtigt. Weitere Details können /SKB 06/ in Kapitel 12.3 entnommen werden /SKB 06/, /SKB 11c/.

Einordnung der Wahrscheinlichkeit. Ursachen einer Advektion im Puffer können eine erhöhte Konduktivität oder Frakturen im Puffermaterial sein. Die zu Beginn definierten Betrachtungsfälle behandeln die Auswirkungen von hoher Konduktivität unter Berücksichtigung verschiedener Auftrittsreihenfolgen. Als wenig wahrscheinliche Szenarien werden sie in je drei Variationen ergänzend analysiert. Die Auswirkung erhöhter Konduktivität auf den Behälter wird im Referenzszenarium erörtert, der Umfang mögli-

cher Korrosion wird in Korrosionsszenarien abgedeckt /SKB 11c/. Allein die Herleitung von Prozessen für das Auftreten von Frakturen konnten nicht gebildet werden, weshalb dieser als sonstiges Szenarium zu behandeln ist /SKB 06/, /SKB 11c/.

Isolation/ Rückhaltung. Verliert der Puffer seine Diffusionseigenschaften, kann Korrosion stattfinden. Die Beurteilung dieser Prozesse wird im Korrosionsszenarium behandelt /SKB 06/, /SKB 11c/.

Spezieller Fall eines absinkenden Behälters. Eine Mindestdicke und damit verbunden ein spezifischer Quelldruck des Puffers sind erforderlich, um ein Behälterabsinken zu verhindern. Ein Fall, in dem diese Bedingungen nicht erfüllt sind, wurde im Referenzszenarium nicht berücksichtigt. Qualitativ kann diese Situation durch Materialverlust des Puffers, Mineraltransformation oder ein Verlust des Quelldrucks hervorgerufen werden. Ein erhöhter Wasserdruck als Ursache wird ausgeschlossen. Weitere Ansätze, die zu Materialverlust des Puffers führen können, wurden im Referenzszenarium und Advektionsszenarium betrachtet. Einem Absinken des Behälters müsste ein deutlicher Verlust an Puffermaterial vorausgegangen sein. In diesem Fall wären die Diffusionseigenschaften des Puffers bereits frühzeitig herabgesetzt, sodass das tatsächliche Absinken des Behälters von untergeordneter Bedeutung wäre /SKB 06/, /SKB 11c/.

3.2.3 Finnland

Aufgrund vergleichbarer geologischer Voraussetzungen in Finnland und Schweden, arbeiten POSIVA und SKB gemeinsam an dem KBS-3 Konzept zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Hieraus resultiert ein ähnlicher Ansatz bei der Betrachtung der Sicherheitsfunktionen und Endlagerkomponenten /NEA 03/, /NEA 04/, /POS 12c/, /POS 12b/.

Ein Multibarrieren-System, aufgebaut aus technischen Barrieren und dem Wirtsgestein, wird angewendet, um den Einschluss der radioaktiven Abfälle zu erreichen und die belebte Umwelt auch bei einem Komponentenversagen fortwährend zu schützen. Wie in Abb. 3.5 dargestellt, wird den Behältern die Sicherheitsfunktion des Einschlusses zugewiesen, die mithilfe des Eiseneinsatzes und der Kupferummantelung erreicht wird. Der Puffer soll vorteilhafte Nahfeldbedingungen aufrechterhalten, die Behälter schützen bzw. eine Radionuklidfreisetzung bei einem Behälterausfall verzögern. Der Versatz soll zudem auch die Stabilität des Endlagersystems gewährleisten. Dem Wirtsgestein wird die Funktion der Isolation und damit auch des Schutzes vor menschlichem Eindringen zugewiesen. Ferner soll ein Radionuklidtransport durch dieses verzögert und

die Bedingungen für technische Barrieren aufrechterhalten werden. Der Verschluss erfüllt ebenfalls die Sicherheitsfunktionen der Isolation, der Aufrechterhaltung der günstigen Bedingungen und die Rückhaltung von Radionukliden /POS 12a/.

Barrier	Safety functions
Canister	<ul style="list-style-type: none"> Ensure a prolonged period of containment of the spent nuclear fuel. This safety function rests first and foremost on the mechanical strength of the canister's cast iron insert and the corrosion resistance of the copper surrounding it.
Buffer	<ul style="list-style-type: none"> Contribute to mechanical, geochemical and hydrogeological conditions that are predictable and favourable to the canister. Protect canisters from external processes that could compromise the safety function of complete containment of the spent nuclear fuel and associated radionuclides Limit and retard radionuclide releases in the event of canister failure.
Deposition tunnel backfill	<ul style="list-style-type: none"> Contribute to favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the buffer and canisters. Limit and retard radionuclide releases in the possible event of canister failure. Contribute to the mechanical stability of the rock adjacent to the deposition tunnels.
Host rock	<ul style="list-style-type: none"> Isolate the spent nuclear fuel repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals and limit the possibility of human intrusion, and isolate the repository from changing conditions at the ground surface. Provide favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the engineered barriers. Limit the transport and retard the migration of harmful substances that could be released from the repository.
Closure	<ul style="list-style-type: none"> Prevent the underground openings from compromising the long-term isolation of the repository from the surface environment and normal habitats for humans, plants and animals. Contribute to favourable and predictable geochemical and hydrogeological conditions for the other engineered barriers by preventing the formation of significant water conductive flow paths through the openings. Limit and retard inflow to and release of harmful substances from the repository.

Abb. 3.5 Zugeordnete Sicherheitsfunktionen zu den Barrieren (EBS Komponenten und Wirtsgestein) im KBS-3V Endlager (entnommen aus /POS 12a/)

Ableitung der Szenarien mithilfe der Sicherheitsfunktionen

Mithilfe von FEPs wird die Entwicklung des Endlagerstandortes abgeleitet. Über eine Leistungsbewertung werden mögliche Abweichungen von der wahrscheinlichen Standortentwicklung aufgezeigt, die die Sicherheitsfunktionen beeinträchtigen und zur Radionuklidfreisetzung führen könnten. Es wird zwischen **Szenarien für das Endlager-system** und für die Biosphäre unterschieden. Ein Alternativszenarium behandelt die reduzierte Rückhaltekapazität des Puffers aufgrund von Prozessen an der Grenzfläche zwischen Puffer und Wirtsgestein, die zu Erosion führen (VS1). Hierbei werden erhöhte Korrosionsraten für einen Behälter angenommen. Auch eine Herabsetzung der Sicherheitsfunktion einiger Behälter in Folge von Korrosion, hervorgerufen durch glazial bedingte advective Grundwasserströmungen, die folglich zu Puffererosion führen, wird berücksichtigt (VS2). Als unwahrscheinlich werden die Szenarien angesehen, die von

einer beschleunigten Korrosion des Behältereinsetzes (AIC), Scherbewegungen mit einhergehendem Behälterausfall (RS) oder Scherbewegungen verbunden mit Erosion des Puffers und folgendem Behälterversagen (RS-DIL) ausgehen /POS 12a/.

Scenario						
Base scenario (BS)	x					
Enlarging defect/degradation of buffer (VS1)	1	x				
Corrosion failure following buffer erosion (VS2)	Retained for analysis	3	x			
Accelerated insert corrosion rate (AIC)	1	3	Retained for analysis	x		
Earthquake and rock shear (RS)	Retained for analysis	2, 3	2	2	x	
Rock shear followed by buffer erosion (RS-DIL)	Retained for analysis	3	Retained for analysis	Retained for analysis	1	x
	BS	VS1	VS2	AIC	RS	RS-DIL

Notes:

- 1: Excluded since the two scenarios mutually exclusive or inconsistent (e.g. relates to an uncertain process that is assumed significant in one scenario but not in the other).
- 2: Excluded since combinations involving RS-DIL rather than RS are more penalising, and both include the same rock shear canister failure mode.
- 3: Excluded since combinations involving AIC rather than VS1 are more penalising, and both include the same key process of defect enlargement.

Abb. 3.6 Binäre Kombinationsvarianten von Szenarien /POS 12a/

Rote Kästen zeigen Kombinationen, welche ausgeschlossen wurden. Die Zahlen erläutern die Gründe hierfür.

Beispiel „Advektion im Puffer durch glaziale Grundwasserbewegungen begünstigt Behälterkorrosion (VS2)“

Für das exemplarisch dargestellte Alternativszenarium VS2 wird eine Erosion des Puffers in Folge des Rückzuges des Eisschildes angenommen. Die Behälter werden initial als intakt angenommen und das EBS sowie die Geosphäre sind keiner zusätzlichen Störung ausgesetzt. Im Zuge der Erosion wird ein advektiver Stofftransport begünstigt, wodurch korrosive Stoffe die Behälter angreifen können, bis ein Behälterversagen herbeigeführt wird. Es wird zwischen vier verschiedenen Rechenfällen unterschieden, in denen jeweils ein Behälter an einem spezifischen Standort versagt (VS2-H1, VS2-H2, VS2-H3, VS2-H4). Kombinationen mit anderen Szenarien werden analysiert. Berücksichtigt werden gemäß Abb. 3.6 Kombinationen mit dem Referenzszenarium, dem AIC und dem Referenzszenarium-DIL Szenarium. Das RS Szenarium wird nicht betrachtet,

da dieses schwächere Szenarium durch das RS-DIL Szenarium mit abgedeckt wird. Genauso ist eine Betrachtung mit dem VS1 aufgrund ähnlicher Ausgangsbedingungen nicht erforderlich.

Alternativszenarien für die Betrachtung der Biosphäre umfassen eine Betrachtung eines variablen Austrittsorts von Radionukliden (VS(A)) sowie die Landnutzung in Form von Trinkwasserbrunnen (VS(B)). Ferner werden alternative Bereiche ausgewählt, die initial kontaminiert werden (VS(E)). Im Szenarium zur Belastungscharakteristik (VS(F)) werden Unsicherheiten in den menschlichen Ernährungsgewohnheiten behandelt und im kombinierten Szenarium (VS(G)) werden die Auswirkungen einer alternativen Klimaentwicklung, alternativer Hebungs- und Senkungsraten sowie alternativer Land- und Gewässernutzung bewertet. Störfallszenarien behandeln unwahrscheinliche Zustände und noch nicht berücksichtigte Unsicherheiten, wie das unbeabsichtigte menschliche Eindringen (DS(F)) oder mehr als 300 m tiefe Brunnen (DS(G)). Das Szenarium zur Belastungscharakteristik (DS(D)) bewertet den Einfluss radioaktiver Strahlung. Während im Referenzfall davon ausgegangen wird, dass sich die verschiedenen Arten in ihren präferierten Lebensräumen aufhalten, wird hier primär davon ausgegangen, dass sie sich in möglicherweise kontaminierten Bereichen aufhalten, auch wenn sie damit nicht in ihrem Existenzoptimum leben.

4 Menschliches Eindringen in ein Endlager

Dieser Arbeitspunkt zur Thematik „Szenarienentwicklung“ bezieht sich auf den Aspekt der menschlichen Aktivitäten an einem Endlagerstandort. Hier wird insbesondere der Aspekt menschliches Eindringen „Human Intrusion“ (HI) in ein geologisches Endlager im Fokus der weiteren Recherche bzw. Untersuchungen stehen. Die Bearbeitung ist dabei auf zwei Gesichtspunkte ausgerichtet.

Der erste Aspekt bezieht sich auf die Identifizierung von aufgestellten bzw. ausformulierten nationalen und internationalen Regeln und Richtlinien sowie Sicherheitsstandards in Bezug auf HI.

Zum anderen ist die in der VSG entwickelte Vorgehensweise zu HI /BEU 12a/ dahingehend zu prüfen, ob deren Anwendung auch auf andere Standorte und Wirtsgesteine sowie Endlagerkonzepte übertragen werden kann. Hierzu wird der Ansatz nach der VSG dahingehend hinterfragt, ob einzelne Schritte oder die gesamte Vorgehensweise unabhängig, in Bezug auf bestimmte Standortbedingungen, wirtsgesteinsspezifische Eigenschaften und endlagerkonzeptionellen Planungen, sind.

4.1 Nationale und internationale Regeln und Richtlinien sowie Sicherheitsstandards

4.1.1 National

Im Folgenden werden zu ausgewählten Ländern (Deutschland, Schweden, Finnland, Schweiz und UK) die identifizierten landesspezifischen Regeln und Richtlinien in Bezug auf das menschliche Eindringen in ein Endlager ausgeführt.

4.1.1.1 Deutschland

Die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) ausgegebenen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ beinhalten eine Reihe von Anforderungen die im Zusammenhang mit zukünftigen menschlichen Aktivitäten stehen. Zusätzlich wurde von der Entsorgungskommission (ESK) auf der Grundlage der genannten Sicherheitsanforderungen eine Leitlinie zum menschlichen Eindringen in ein Endlager für radioak-

tive Abfälle /ESK 12/ erarbeitet, auf deren Inhalt hier jedoch nicht näher eingegangen wird. Die weiteren Ausführungen beziehen sich daher ausschließlich auf die Sicherheitsanforderungen des BMUB.

Eine wesentliche Sicherheitsanforderung zur Thematik „menschliches Eindringen in ein Endlager“ stellt der Absatz 5.2 in /BMU 10/ dar:

„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. 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.“

Die zitierte Sicherheitsanforderung benennt einige Aspekte, die es im Umgang mit zukünftigen menschlichen Aktivitäten zu beachten gilt. So wird darauf abgestellt, dass die Berücksichtigung von zukünftigen menschlichen Aktivitäten in Hinblick auf die Optimierung des Endlagers zu erfolgen hat. Jedoch soll die Optimierung nachrangig zu anderen Optimierungszielen durchgeführt werden. Die anderen bzw. übergeordneten Optimierungsziele werden in Absatz 5.1 in /BMU 10/ benannt:

- Strahlenschutz für Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers
- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit

Der zweite Aspekt in Absatz 5.2 in /BMU 10/ stellt darauf ab, dass die zukünftigen menschlichen Aktivitäten nicht prognostizierbar sind. Daher wird die Analyse von sogenannten Referenzszenarien gefordert. Diese Referenzszenarien (im Weiteren als HI-Szenarien bezeichnet) sind mit dem allgemein international geführten Begriff „Stylized Human Intrusion Scenarios“ gleichzusetzen. Bei den genannten stilisierten Szenarien

werden die Rahmenbedingungen vorgegeben, da diese aufgrund der fehlenden Vorhersagbarkeit nicht auf wissenschaftlicher Basis abgeleitet werden können. Des Weiteren wird nur die Untersuchung des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager gefordert. Darüber hinaus soll das unbeabsichtigte menschliche Eindringen unter Berücksichtigung derzeit üblicher menschlicher Aktivitäten erfolgen. Dies bedeutet, dass bei der Betrachtung menschlicher Aktivitäten heutige und hiesige Praktiken und Techniken zu berücksichtigen sind. Mit dieser Forderung soll vor allem möglichen Spekulationen über zukünftige Fähigkeiten und technische Möglichkeiten Einhalt geboten werden.

Abschließend erfolgt in Absatz 5.2 in /BMU 10/ die Angabe von anzustrebenden Optimierungszielen als Ergebnis der Untersuchung von HI-Szenarien. Es werden zwei allgemeine Ziele formuliert, die sich auf die Reduzierung

- der Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens und
- der radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung

beziehen.

Neben dem Absatz 5.2 stehen die folgenden zitierten Absätze aus /BMU 10/ im Zusammenhang mit zukünftigen menschlichen Aktivitäten:

- 6.5 Für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt.
- 9.7 8 [...] 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.
- 10.2 Für die Zeiten nach Verschluss des Endlagers sind vor Stilllegung des Endlagers Regelungen für Umfang, Erhalt und Zugänglichkeit der aufzubewahrenden Dokumentation durch den Bund im Benehmen mit der Genehmigungsbehörde zu treffen. Die nach Verschluss des Endlagers aufzubewahrende Dokumentation muss alle Daten und Dokumente aus der während des Betriebs fortgeschriebenen

Dokumentation enthalten, die für die Information zukünftiger Generationen relevant sein könnten. Hierzu gehören insbesondere Informationen darüber, welcher Bereich in der Umgebung des Endlagerbergwerks vor menschlichen Eingriffen in den tiefen Untergrund geschützt werden muss bzw. welche Eingriffe mit besonderen Auflagen versehen werden müssen.

Vollständige Dokumentensätze sind bei mindestens zwei unterschiedlichen geeigneten Stellen aufzubewahren.

Die genannte Sicherheitsanforderung Absatz 6.5 ist dahingehend hervorzuheben, dass wie in der Vergangenheit von vielen Nationen praktiziert, ein Vergleich von ermittelten Risiken der HI-Szenarien mit regulatorisch zugrunde gelegten Grenzwerten nicht mehr vorzunehmen ist. Ein entsprechender Grenzwert, wie z. B. für die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, wird in Bezug auf Entwicklungen hervorgerufen durch menschliche Aktivitäten nicht festgelegt.

Mit den beiden Absätzen 9.7 und 10.2 werden Sicherheitsanforderungen zur Ergreifung von Maßnahmen zur Verhinderung eines zukünftigen menschlichen Eindringens in das Endlager formuliert. Diese Maßnahmen, die möglichst lange wirken sollen, beziehen sich auf verwaltungstechnische Vorkehrungen wie z. B. eine Beschränkung der Flächennutzung sowie informationserhaltende Anordnungen wie die ausführliche Dokumentation und deren multiple Aufbewahrung.

4.1.1.2 Schweden

Anforderungen in Bezug auf HI werden in den schwedischen Regularien /SSM 08a/ und /SSM 08b/ formuliert. Die Regularien sind formal so aufgebaut, dass in einem ersten Teil die Anforderungen benannt werden und in einem zweiten Teil eine Orientierung hinsichtlich der Anwendung der Regularien gegeben wird. So wird in /SSM 08b/ die Durchführung einer Sicherheitsanalyse gefordert, die die FEP die eine Freisetzung von radioaktiven Substanzen beeinflussen können, umfassen soll. Unter dem zweiten Teil in /SSM 08a/ (Guidance Section 9 and Appendix) wird dann ausgeführt, dass auch Szenarien auf der Basis eines menschlichen Eindringens in das Endlager zu betrachten sind.

In den Regularien /SSM 08b/ werden weiterführende Anforderungen in Bezug auf HI erhoben. So beinhaltet die Sektion 4 die Forderung einer Optimierung zur Behandlung von abgebrannten Brennelementen und radioaktiven Abfällen. Die Sektion 8 fordert

u. a. bei Ergreifung von Maßnahmen, die ein menschliches Eindringen erschweren, welcher Einfluss dadurch auf das Schutzvermögen des Endlagers verbunden ist. Darüber hinaus beinhaltet die Sektion 9 die Dokumentation der Konsequenzen eines menschlichen Eindringens zu unterschiedlichen Zeitpunkten und die Beschreibung des Schutzvermögens des Endlagers nach einem entsprechenden Eindringen.

Im zweiten Teil in /SSM 08b/ werden wiederum Erläuterungen zum Umgang mit den Regularien gegeben. In Bezug auf unbeabsichtigte menschliche Einwirkungen auf ein Endlager sind mehrere entsprechende Szenarien einzubeziehen. Die Szenarien sollten in einem Fall das direkte Eindringen in Verbindung mit einer Bohrung und in anderen Fällen indirekte Aktivitäten, die zu einer Schädigung des Schutzvermögens des Endlagers führen können, beinhalten. Als Beispiele für indirekte Aktivitäten werden die Änderung der hydrologischen Bedingungen oder der Grundwasserchemie im Endlager oder seiner Umgebung genannt. Die Auswahl an Eindringenszenarien sollte sich auf heutige Lebensbedingungen und technische Gegebenheiten stützen sowie die vorliegenden Endlagereigenschaften berücksichtigen.

Die Konsequenzen der durch menschliche Aktivitäten verursachten Störungen des Schutzvermögens des Endlagers sollte anhand von Dosisberechnungen getrennt von der Risikoanalyse für das ungestörte Endlager dokumentiert werden. Die Ergebnisse sollen zur Darstellung möglicher Gegenmaßnahmen herangezogen werden und als Basis zur Bereitstellung für den Stand der Technik dienen. Die Ermittlung von direkten Konsequenzen auf die eindringende Person bzw. Personen ist nicht vorzunehmen.

4.1.1.3 Finnland

Die Regularien Finnlands /STUK 14/ weisen einige wenige Anforderungen in Bezug auf menschliche Aktivitäten aus, die im Folgenden benannt werden:

Die wesentliche Anforderung ist in Absatz 316 in /STUK 14/ formuliert. Hierin wird gefordert, das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in Form einer mitteltiefen Bohrung zur Wassergewinnung im Endlagerbereich sowie einer Kernbohrung, die die Abfallgebinde erreicht, zu betrachten. Dieses Ereignis ist frühestens 200 Jahre nach Verschluss anzunehmen.

Der Absatz 317 in /STUK 14/ beinhaltet die Forderung nach der Bestimmung der radiologischen Beeinträchtigung hervorgerufen durch die Ereignisse gemäß Absatz 316 und

dem Vergleich dieser Erwartungswerte mit den Grenzwerten zur Strahlendosis oder den zugrunde liegenden Freisetzungswerten.

In Absatz 408 in /STUK 14/ wird u. a. mindestens die Beurteilung der Sicherheitsfunktion der geologischen Barriere zum Schutz gegen menschliche Aktivitäten gefordert.

Als Maßnahme zur Abschwächung der Einwirkungen u. a. von menschlichen Aktivitäten wird in Absatz 414 in /STUK 14/ eine Teufe für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente von mehreren hundert Meter gefordert.

4.1.1.4 Schweiz

In der Schweiz wurden in der Richtlinie für schweizerische Kernanlagen spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis formuliert /ENSI 09a/. Zu dieser Richtlinie liegt ein entsprechender Erläuterungsbericht vor, der Erklärungen und Beispiele zu den gestellten Anforderungen beinhaltet /ENSI 09b/. Das Kernenergiegesetz /BSE 03/ und die Richtlinie /ENSI 09a/ enthalten die folgenden Grundsätze und Anforderungen, die einen Bezug zur Thematik menschliche Aktivitäten in der Nachverschlussphase eines Endlagers aufweisen:

- Kernenergiegesetz /BSE 03/
 - Art. 39: Beobachtungsphase und Verschluss
 - Art. 40: Schutz des geologischen Tiefenlagers
- Richtlinie /ENSI 09a/
 - Abs. 5.3.2: Markierung
 - Abs. 6.3: Dokumentation
 - Abs. 7.2.2: Sicherheitsanalyse

Insbesondere der Abs. 7.2.2 enthält eine Reihe von Anforderungen und Grundsätze, die einen Bezug zu HI haben. So wird beispielsweise gefordert, dass die Sicherheitsanalyse die Durchführung einer Szenarienanalyse und Festlegung von Rechenfällen bedingt, in denen mögliche Entwicklungen des Tiefenlagers untersucht werden. Zu den möglichen Entwicklungen gehören auch solche, in denen durch menschliche Handlungen die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers beeinflusst wird.

„7.2.2 Sicherheitsanalyse [...]“

f. Durchführen einer Szenarienanalyse und Festlegung der Rechenfälle, mit denen die zu betrachtenden Entwicklungen des Tiefenlagers untersucht werden. Die möglichen radiologischen Auswirkungen zukünftiger Entwicklungen sind durch umhüllende Varianten einzugrenzen.“

Darüber hinaus wird in Abs. 7.2.2 die Ermittlung eines Variationsbereiches der möglichen Freisetzung und des Dosismaximums aller Szenarien vorgeschrieben.

„g. Ermittlung des Variationsbereichs der möglichen Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Biosphäre und des Dosismaximums aller Szenarien mit Hilfe von Modellrechnungen.“

Weitere Anforderungen in Abs. 7.2.2 beziehen sich auf zu berücksichtigende Annahmen bzw. nicht zu betrachtende Fälle:

Zu berücksichtigende Annahme

„c. Szenarien, in denen durch menschliche Handlungen die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers beeinflusst wird, so anzunehmen, wie es mit Blick auf die heutige Gesellschaft glaubhaft erscheint.“

Nicht zu betrachtender Fall

„a. absichtliches Eindringen von Menschen in ein geologisches Tiefenlager“

Sowohl das Kernenergiegesetz /BSE 03/ als auch die Richtlinie /ENSI 09a/ sehen zu treffende Vorkehrungen vor, die einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in ein Tiefenlager entgegenwirken:

Überwachung

Hierzu gehören z. B. institutionelle Anforderungen an die Phase nach dem Verschluss des Tiefenlagers. So kann nach ordnungsgemäßem Verschluss der Bundesrat eine weitere, befristete Überwachung anordnen Art. 39 Abs. 3 /BSE 03/. Darüber hinaus kann der Bund nach Art. 39 Abs. 4 /BSE 03/ weitergehende Maßnahmen nach dem Zeitpunkt des Verschlusses, insbesondere eine Umweltüberwachung, durchführen.

Dokumentation

Der Eigentümer eines Endlagers muss eine Dokumentation zur langfristigen Sicherstellung der Kenntnisse über das Endlager erstellen. Diese nach dem ordnungsgemäßen Verschluss abzugebende Dokumentation ist in mindestens drei Exemplaren zu erstellen und an unterschiedlichen Stellen zu archivieren. Darüber hinaus ist die Langzeitbeständigkeit der Dokumentation aufzuzeigen Abs. 6.3 /ENSI 09a/.

Die Dokumentation muss folgende Mindestangaben enthalten:

- Beschreibung der verschlossenen Anlage und des Standorts,
- Informationen über jedes eingelagerte Gebinde,
- Informationen über die Zwischenlagerung,
- Ergebnisse aus der Überwachung und
- Ergebnisse der aktualisierten Sicherheitsanalyse.

Markierung

Der Bundesrat schreibt die dauerhafte Markierung des Endlagers vor (Art. 40 Abs. 7 /BSE 03/). In Abs. 5.3.2 der Richtlinie /ENSI 09a/ wird der Eigentümer verpflichtet, ein entsprechendes Konzept für die Markierung des geologischen Tiefenlagers vorzulegen. Konkrete Vorgaben zur Art der Markierungen werden in /ENSI 09a/ nicht behandelt. Durch die Markierung darf die Langzeitsicherheit des Tiefenlagers nicht beeinträchtigt werden. Die Markierung ist im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

Schutzbereich des Endlagers

In Art. 40 /BSE 03/ wird der Schutzbereich für ein Endlager definiert und bestimmt, dass der Bundesrat Kriterien für den Schutzbereich festzulegen hat. Zur Durchführung von Tätigkeiten und anderen Vorhaben in einem Schutzbereich, ist eine Genehmigung der vom Bundesrat bezeichneten Behörde notwendig. Der Bundesrat hat die Einzelheiten zu regeln. Der Schutzbereich wird im Grundbuch und in den kantonalen Richt- und den kommunalen Nutzungsplänen eingetragen.

Der Bundesrat sorgt dafür, dass die Informationen über das Endlager und die eingelagerten Abfälle so aufbewahrt werden, dass die Kenntnisse darüber erhalten bleiben.

Behandlung menschlichen Eindringens

Menschliches Eindringen wird unterteilt in:

- Absichtliches menschliches Eindringen
- Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen

Künftige menschliche Handlungen, die im Wissen um die Existenz des Endlagers vorgenommen werden, werden zu den „nicht zu betrachtenden Entwicklungen“ gezählt (siehe auch obiges Zitat). Diese Tätigkeiten werden in die Verantwortung der handelnden Gesellschaft gestellt.

Im Zusammenhang mit der Dokumentation nach dem ordnungsgemäßen Verschluss wird in /ENSI 09b/ erläutert:

„Um den Verlust durch zerstörerische Ereignisse zu vermeiden, sollen mindestens drei Exemplare der Dokumentation hergestellt werden, die an unterschiedlichen Orten geschützt aufbewahrt werden.“

Das Aufbewahren von verständlichen und allgemein zugänglichen Informationen über das geologische Tiefenlager hilft, die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens herabzusetzen. Es darf aber kein notwendiges Sicherheitselement für die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers sein, da das Funktionieren der Informationsübermittlung über sehr lange Zeiten nicht garantiert werden kann.“

Hinsichtlich der Durchführung einer Sicherheitsanalyse werden unter dem Aspekt „Annahmen zu Klimaentwicklung und Lebensweise der Bevölkerung“ in /ENSI 09b/ die Szenarien erläutert, in denen durch menschliche Handlungen die Sicherheit des Endlagers beeinflusst wird:

„Für die Bewertung der Langzeitsicherheit sind auch Szenarien einzubeziehen, welche die Folgen von menschlichen Handlungen analysieren. Die Annahmen für die künftigen menschlichen Handlungen sollen auf den Aktivitäten der heutigen Gesellschaft (z. B. bei der Erstellung von Stauseen, Tunnel- oder Brunnenbauten sowie Explorationsbohrungen) beruhen.“

4.1.1.5 UK

Für England und Wales sowie Nordirland ist in Februar 2009 die Richtlinie zu „Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes“ ausgegeben worden /EA 09a/. Diese Richtlinie gilt allerdings nicht für Schottland. Eine gemeinsame Richtlinie, die für das gesamte Königreich gilt, bezieht sich auf oberflächennahe Endlager /EA 09b/. Weiterhin wurde eine Richtlinie zu „Guidance on Requirements for Release of Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation“ /SEPA 16/ von den Organisationen Scottish Environment Protection Agency (SEPA), Environment Agency (EA) und Natural Resources Wales (NRW) erstellt. Diese Richtlinie, die im Februar 2016 veröffentlicht wurde, ist in England und Wales sowie Schottland anzuwenden.

In den folgenden Ausführungen wird auf die Anforderungen in Bezug auf die Thematik „menschliches Eindringen“ (HI) in der Richtlinie /SEPA 16/ eingegangen. Auf die Richtlinie /EA 09a/ wird hier nicht im Detail eingegangen, da sie bereits in einem früheren Vorhaben /FIS 10/ in Bezug auf Sicherheitsanforderungen bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen ausgewertet wurde. Bei der Richtlinie /EA 09b/ wird aufgrund des ausschließlichen Bezugs zur oberflächennahen Endlagerung auf eine Auswertung verzichtet.

Richtlinie /SEPA 16/

Die Richtlinie /SEPA 16/ gilt für alle Arten von kerntechnischen Standorten und für alle anlagenbezogenen Entwicklungsphasen (z. B. Konstruktion, Betrieb, Stilllegung und Nachverschluss).

Die Richtlinie enthält die folgende explizite Anforderung zu HI, die sich auf die Phase nach einer regulatorischen Aufsicht bzw. einer uneingeschränkten Nutzung, bezieht:

„Requirement R8: Human intrusion dose guidance level after the site reference state has been reached“

Weiterhin wird in der Richtlinie aufgezeigt, wie in einem Sicherheitsnachweis mit HI umzugehen ist. Darüber hinaus sind zu treffende Vorkehrungen formuliert, die den Erhalt von Informationen und Wissen über den Endlagerstandort zum Gegenstand haben. Im Folgenden werden die unter der o. g. Anforderung R8 formulierten untergeordneten Anforderungen in Kurzform wiedergegeben:

Abs. 5.3.31: Der Betreiber hat die möglichen Konsequenzen von HI zu bestimmen. Die daraus ermittelten effektiven Dosiswerte sollten den vorgegebenen Richtwertebereich von 3 mSv/a bis 20 mSv/a nicht überschreiten. Der Betreiber hat zudem praktische Maßnahmen zu berücksichtigen bzw. zu ergreifen, die die Möglichkeiten von HI reduzieren.

Abs. 5.3.32: Der Vergleichswert von ermittelten Werten mit vorgegebenen Richtwerten ist auf die Dosis zu beziehen, da das Risiko aufgrund der nicht einschätzbaren Eintrittswahrscheinlichkeit von HI nicht verlässlich ermittelt werden kann.

Abs. 5.3.33: Der Betreiber hat die potenziellen radiologischen Belastungen von möglichen eindringenden Personen aus einer Anzahl von HI Szenarien zu bestimmen.

Abs. 5.3.34: Bei der Durchführung der Dosisbestimmung sollten unterschiedliche Partikelgrößen berücksichtigt werden. Für kleinere Partikelgrößen sollte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass diese von Personen inklusive von Kindern über Inhalation oder Ingestion aufgenommen werden können.

Abs. 5.3.35: Der Betreiber hat zudem darzulegen, dass die ermittelten Konsequenzen aus HI auch für nicht menschliche Spezies akzeptabel sind.

Abs. 5.3.36: Der Betreiber hat ebenso darzulegen, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Dosisgrenzwerte für schwerwiegende Strahlenschäden von Körpergewebe verursacht durch die Folgen von HI nicht überschritten werden.

Abs. 5.3.37: Es werden drei unterschiedliche Klassen von HI betrachtet:

- i. Eindringen mit vorhandenem Wissen über den Standort und seinem Inhalt,
- ii. Eindringen ohne vorhandenem Wissen über den Standort und seinem Inhalt und
- iii. Eindringen mit vorhandenem Wissen über den Standort aber ohne das Wissen über den Inhalt.

Der Betreiber hat die Fälle ii) und iii) zu berücksichtigen. Ein Beispiel für den Fall ii) ist eine Explorationsbohrung ausgerichtet auf die Erkundung von mineralischen Ressourcen. Für den Fall iii) wird ein Beispiel einer archäologischen Bohrung angegeben, die

unter der Kenntnis, dass am Standort in der Vergangenheit menschliche Aktivitäten stattgefunden haben, durchgeführt wird.

Abs. 5.3.38: Folgende Ereignisse sind zu betrachten

- HI direkt in radioaktive Substanzen und
- andere menschliche Aktivitäten, die die Barrieren beschädigen oder deren Funktion beeinträchtigen. Es sind technische und natürliche Barrieren sowie deren Kombination zu berücksichtigen.

Abs. 5.3.39: Außerhalb des Bereiches in dem die Ereignisse nach Abs. 5.3.38 zu betrachten sind gilt für menschliche Aktivitäten der Richtwert für das Risiko (gemäß R7 in der Richtlinie).

Abs. 5.3.40: Für natürliche Barrieren, die einen großen Bereich einnehmen können, ist im Einzelfall zu klären, inwieweit der Risiko- oder der Dosisrichtwert zugrunde zu legen ist.

Abs. 5.3.41: Der Betreiber hat praktische Maßnahmen zu berücksichtigen bzw. zu ergreifen, die die Möglichkeiten von HI reduzieren (siehe auch Abs. 5.3.31). Jedoch ist von den Maßnahmen kein Kredit in den Sicherheitsanalysen zu nehmen. Allerdings können die getroffenen Maßnahmen im Sicherheitsnachweis als zusätzliche qualitative Argumente einbezogen werden. Die Maßnahmen dürfen jedoch die Sicherheit des Gesamtsystems nicht beeinträchtigen. Die Berücksichtigung von Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten von HI sollte im Rahmen der geforderten Optimierung nach R9 in der Richtlinie erfolgen.

Abs. 5.3.42: Der Ablauf, die Art und das Ausmaß von HI sind mit großen Unsicherheiten behaftet, sodass diese im Rahmen von einem oder mehreren What-If Szenarien separat zu der normalen oder erwarteten Entwicklung des Standortes zu behandeln sind.

Abs. 5.3.43: HI Szenarien sollten heutige oder in der Vergangenheit in ähnlichen geologischen und geographischen Umgebungen angewandte Techniken und Praktiken berücksichtigen. Außerdem sollten das angenommene Sozialverhalten und die Gewohnheiten der Menschen denen aus heutiger/vergangener Zeit entsprechen. Aus der Betrachtung der Szenarien ist folgendes zu bestimmen:

- Art und Umfang des kontaminierten Materials, das aufgrund des HI Szenariums in die Umwelt verbracht wird sowie weitere Verwendung/Verbleib des Materials.
- Anzahl der Arbeiter, die bei der zugrunde gelegten Aktion im HI Szenarium beteiligt sind (abgeleitet aus heutiger und früherer Praxis).
- Anzahl der Personen, die durch das Material eine radiologische Belastung erfahren können.

Abs. 5.3.44: Der Betreiber hat Abschätzungen von Strahlendosen vorzulegen, die sich auf die eindringende Personengruppe und auf die Menschen, die sich möglicherweise am Standort oder in der Nähe angesiedelt haben, beziehen. Die Abschätzungen sollten darüber hinaus die Konsequenzen über einen ausgedehnten geographischen Bereich und die Langzeitauswirkung auf den Standort aufzeigen.

Abs. 5.3.45: Der Betreiber hat Abschätzungen von Strahlendosen vorzulegen, die sich auf nicht menschliche Organismen beziehen. Hierin ist nachzuweisen, dass die ermittelten Strahlendosen keine Gefährdung für die Population der Organismen darstellen.

Abs. 5.3.46: Der Betreiber hat die Ergebnisse aus der Betrachtung der HI Szenarien im Rahmen der Optimierung zu berücksichtigen. Das vornehmliche Ziel hierbei ist, die radiologischen Auswirkungen durch HI in Abhängigkeit aller anderen zu betrachtenden relevanten Aspekte für eine Optimierung zu reduzieren.

Abs. 5.3.47: Die folgende schematische Darstellung (Abb. 4.1) illustriert den Ansatz zur Behandlung von HI nachdem die Überwachung über den Standort aufgehoben ist.

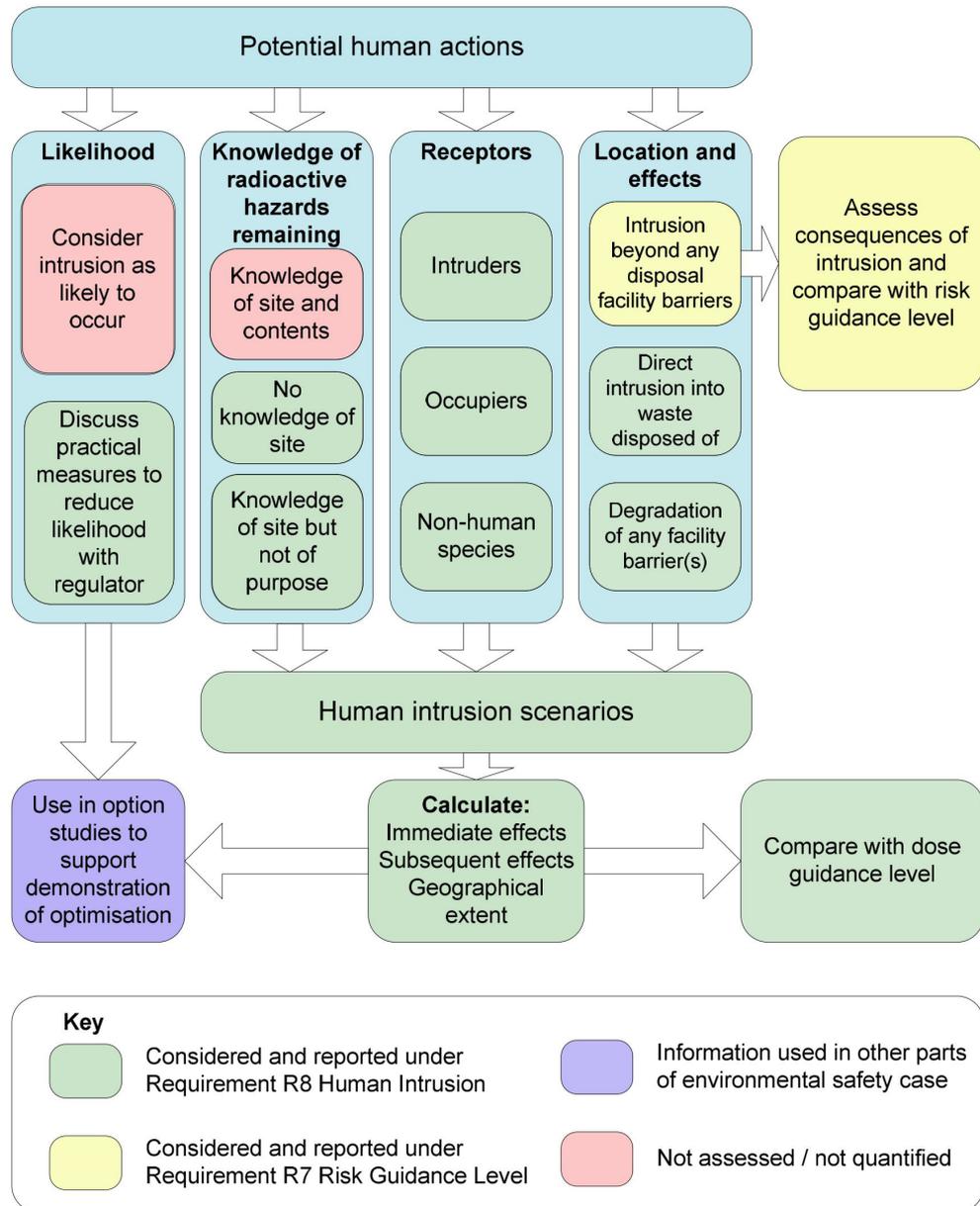


Abb. 4.1 Ansatz zur Behandlung von HI (entnommen aus /SEPA 16/)

Abs. 5.3.48: Aufgrund der Unsicherheiten im Zusammenhang mit HI und anderen unvorhersagbaren sowie zerstörenden Ereignissen kann ein Missverhältnis zwischen der Ausgewogenheit von wünschenswerten Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten und Konsequenzen von HI und der im Rahmen eines Sicherheitsnachweis noch vernünftiger Weise zu erhebenden Forderungen, auftreten. In einem solchen Fall ist der Betreiber dazu angehalten möglichst praktische Maßnahmen zu ergreifen.

Abs. 5.3.49: Für Substanzen mit radiologisch signifikanten Mengen an langlebigen Nukliden ist es möglich, dass HI zu Dosen führt, die in der Größenordnung des zu-

grunde gelegten Dosisrichtwertes liegen. In solchen Fällen hat der Betreiber sein Hauptaugenmerk auf die Berücksichtigung von Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten oder Konsequenzen von HI zu konzentrieren.

Abs. 5.3.50: Für viele Substanzen die in gewissem Maße noch eine radiologische Gefährdung darstellen sind voraussichtlich die aus HI Szenarien ermittelten Dosen unterhalb der Dosisrichtwerte. In solchen Fällen sind angemessene Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten von HI zu identifizieren.

Abs. 5.3.51: Im Fall, das nicht radiologische Gefährdungen mit radiologischen Gefährdungen im Zusammenhang stehen (z. B. radiologisch kontaminiertes Asbest) sollte der Betreiber im Sicherheitsnachweis belegen, dass auch für nicht radiologische Gefährdungen ein adäquater Schutz besteht.

Abs. 5.3.52: Der Betreiber hat Beurteilungen vorzulegen, dass die ermittelten Konsequenzen aus HI auch für nicht menschliche Spezies akzeptabel sind (siehe auch Abs. 5.3.35).

Neben den o. g. Anforderungen, die unter „Requirement R8“ subsumiert sind, liegen in der Richtlinie /SEPA 16/ weitere Anforderungen vor, die sich auf zu treffende Vorkehrungen bzw. Maßnahmen beziehen, die die Möglichkeit eines wesentlichen Eindringens einschränken. Hierzu gehören die Absätze 5.4.17 bis 5.4.22 unter der Anforderung „Requirement R14. Preservation of knowledge and records“ zum Informations- und Wissenserhalt.

4.1.2 International

Die Thematik „menschliches Eindringen in ein Endlager“ wird ebenfalls auf internationaler Ebene behandelt. Hierzu haben die verschiedenen Organisationen wie die International Atomic Energy Agency (IAEA), International Commission on Radiological Protection (ICRP), Nuclear Energy Agency of the Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD/NEA) und die Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) entsprechende Empfehlungen, Anforderungen und/ oder Leitlinien erarbeitet und ausgegeben.

Im Folgenden werden die identifizierten essenziellen Referenzen und Empfehlungen in Bezug auf HI von den o. g. Organisationen aufgeführt:

4.1.2.1 IAEA

Die IAEA erarbeitet und aktualisiert kontinuierlich die sog. Safety Standards, die nach dem folgenden Schema in Kategorien eingeordnet werden:

- Safety Fundamentals (SF)
(beinhalten die übergeordneten Sicherheitsziele und Schutzprinzipien, die die Basis für die Sicherheitsanforderungen bilden)
- Safety Requirements
 - General Safety Requirements (GSR)
(Anwendbar auf alle kerntechnischen Einrichtungen und Aktivitäten)
 - Specific Safety Requirements (SSR)
(Anwendbar auf spezifische kerntechnische Einrichtungen und Aktivitäten)
- Safety Guides
 - General Safety Guides (GSG)
(Anwendbar auf alle kerntechnischen Einrichtungen und Aktivitäten)
 - Specific Safety Guides (SSG)
(Anwendbar auf spezifische kerntechnische Einrichtungen und Aktivitäten)

Für die vorliegende Recherche wurden insbesondere die SSR- und SSG-Berichte herangezogen, die einen Bezug zur geologischen Endlagerung haben. Hierzu sind die folgenden Berichte hinsichtlich Aussagen zur Behandlung von HI gesichtet worden:

- SSR-5 „Disposal of radioactive waste“ (bezogen auf alle Arten von Endlagereinrichtungen) /IAEA 11a/, /IAEA 14/,
- SSG-14 „Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste“ (bezogen auf geologische Endlager) /IAEA 11b/ und
- SSG-23 „The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste“ (bezogen auf alle Arten von Endlagereinrichtungen) /IAEA 12/.

Die identifizierten Aussagen zur Thematik „menschliches Eindringen in ein Endlager“ aus den genannten Berichten werden im Folgenden in konzentrierter Form wiedergegeben:

Bericht SSR-5 /IAEA 11a/, /IAEA 14/:

Abs. 1.10: Die vornehmlichen Ziele der Endlagerung sind:

- Den Abfall einzuschließen
- Isolation von Biosphäre und die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit sowie der Folgen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlagersystem
- Zurückhaltung, Reduzierung und Verzögerung einer Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre
- Im Fall einer Freisetzung von Radionukliden muss sichergestellt sein, dass mögliche radiologische Konsequenzen gering sind

Abs. 2.15: (c) In Bezug auf die Auswirkungen eines unabsichtlichen menschlichen Eindringens nach Verschluss, bei erwarteten jährlichen Dosen kleiner als 1 mSv auf die umliegende Bevölkerung, sind keine Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten und der Begrenzung von Konsequenzen erforderlich.

(d) Bei erwarteten jährlichen Dosen größer als 20 mSv auf die umliegende Bevölkerung sind alternative Möglichkeiten für die Endlagerung der Abfälle zu berücksichtigen, z. B. die Endlagerung der Abfälle in geologische Schichten oder Separierung derjenigen Radionuklide die zu höheren Dosen führen.

(e) Bei jährlichen Dosen im Bereich von 1 – 20 mSv sind angemessene Maßnahmen zur Reduzierung der Möglichkeiten eines menschlichen Eindringens und der daraus resultierenden Konsequenzen durch Optimierung der Auslegung der Endlagereinrichtung zu ergreifen.

Abs. 3.20: Bei der Auswahl des Standortes ist darauf zu achten, dass keine bedeutenden mineralischen Ressourcen, geothermische Energie und andere verwertbaren Bodenschätze vorliegen. Hierdurch soll das Risiko eines menschlichen Eindringens in den Standort und die Nutzung der näheren Umgebung reduziert werden. Die Sicherheit des Endlagers ist in jedem Schritt des Entscheidungsprozesses im Sinne einer Optimierung zu hinterfragen.

Abs. 3.46: In manchen Fällen kann es sein, dass keine ausreichende Abschottung der Abfälle von der Biosphäre, in Anbetracht von natürlichen Phänomenen wie Hebung,

Erosion und Kaltzeiten, gegeben ist. Hierbei und bei einer noch bedeutenden Aktivität des radioaktiven Abfalls zum Zeitpunkt des Eintretens der genannten Phänomene sind die Möglichkeiten eines menschlichen Eindringens zur Ermittlung des vorliegenden Isolationsvermögens zu bewerten.

Abs. 5.12: Die Sicherheit von geologischen Endlagern darf nicht von langzeitigen institutionellen Kontrollen nach Verschluss abhängen. Dennoch können institutionelle Kontrollen zur Sicherheit durch Verhinderung oder Reduzierung der Möglichkeiten von menschlichen Handlungen, die die Abfälle oder das Endlagersystem beeinflussen, beitragen. Darüber hinaus können institutionelle Kontrollen einen Beitrag zur Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz leisten.

Abs. 5.13: Endlagereinrichtungen werden nicht vor mehreren Dekaden oder mehr nach Aufnahme des Einlagerungsbetriebes verschlossen werden. Planungen für mögliche zukünftige Kontrollen und entsprechende Zeithorizonte für die Durchführung können anfänglich flexible und konzeptionell sein. Mit annähernden Zeitpunkt an den Endlagerverschluss sind diese Planungen jedoch weiterzuentwickeln und zu konkretisieren. Zu berücksichtigen sind hierbei: Kontrollen der lokalen Flächennutzung, Standortbeschränkungen oder Überwachung und Beobachtung, lokale, nationale und internationale Aufzeichnungen sowie die Verwendung von dauerhaften Markierungen an der Oberfläche und/ oder im Untergrund. Es sind Vorkehrungen zu treffen, die die Informationsweitergabe an zukünftige Generationen sichert um zukünftige Entscheidungen über das Endlager und der Sicherheit zu ermöglichen.

Bericht SSG-14 /IAEA 11b/:

Abs. 2.2: Der Einschluss und die Isolierung von radioaktiven Abfällen ist eine akzeptierte Entsorgungsstrategie. Die Endlagerteufe und die Eigenschaften des Wirtsgesteins tragen zur Abschottung der Abfälle vor der umliegenden Biosphäre und der Reduzierung der Möglichkeiten eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens bei.

Abs. 4.18: Die Sicherheit eines Endlagers nach Verschluss ist durch ein passives System von geologischen und geotechnischen Barrieren gegeben. Geologische Endlager in entsprechender Tiefe beinhalten die Isolierung der Abfälle von der Biosphäre als ein inhärentes Merkmal. Von einer Überwachung oder institutioneller Kontrolle wird in Bezug auf die Sicherheit des Endlagers nach Verschluss kein Kredit genommen. Das bedeutet nicht, dass eine Überwachung in der Nachverschlussphase ausgeschlossen

wird. Es ist möglich, dass passive institutionelle Kontrollen wie die Markierung des Standortes und die Einschränkung der Flächennutzung vorgesehen werden, zumindest für eine entsprechende Zeitdauer nach dem Verschluss des Endlagers. Auch aktive institutionelle Kontrollen können für eine bestimmte Zeitdauer nach Verschluss des Endlagers vorgesehen werden, um z. B. den Bedenken der Öffentlichkeit und Genehmigungsanforderungen nachzukommen oder als Schutz gegen menschliches Eindringen.

Abs. 5.15: In Sicherheitsanalysen ist die Entwicklung des Endlagersystems zu untersuchen. Diese Sicherheitsanalysen sollten auch einige stilisierte Szenarien des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens nach Verschluss des Endlagers beinhalten.

Bericht SSG-23 /IAEA 12/:

Abs. 5.74: Für geologische Endlager sind HI Szenarien im Hinblick auf die Robustheit des Endlagersystems zu bewerten. Die Betrachtung der Möglichkeiten von HI sollten ebenfalls als ein Aspekt bei der Standortwahl berücksichtigt werden.

Zu erwähnen ist noch, dass entsprechende technische Dokumente sog. TECDOC von der IAEA vorliegen, die den Aspekt eines menschlichen Eindringens z. T. neben anderen Schwerpunkten thematisieren. In diesem Zusammenhang ist auch das IAEA Vorhaben „Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste (HIDRA)“ zu nennen, dessen Phase I in 2012 begann und in 2015 endete und seit 2016 in einer Phase II weiter fortgeführt. Es ist geplant, die Ergebnisse aus der Phase I des HIDRA Vorhabens im Rahmen eines TECDOC zu publizieren. Ein Berichtsentwurf /IAEA 16/ liegt bereits vor, auf den im Kapitel 4.2.2 näher eingegangen wird.

4.1.2.2 ICRP

Die ICRP hat unter dem Titel „Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste (ICRP 122)“ /WEI 13/ Empfehlungen veröffentlicht, die u. a. auf die Behandlung von HI in Sicherheitsnachweisen eingehen. Die ICRP 122 ist z. Z. die aktuelle Referenz im Zusammenhang mit der geologischen Endlagerung von langlebigen verfestigten radioaktiven Abfällen. Mit der ICRP 122 war u. a. auch die Zielsetzung verbunden, die bis dahin ausgegebenen Empfehlungen aus der ICRP 81 /ICRP 98/ zu aktualisieren. Mit der ICRP 122 wurde der Begriff „Oversight“ eingeführt, der unter Berücksichtigung der Entwicklungsphasen eines Endlagers unterteilt wird in

„direct, indirect und no oversight“ (siehe Abb. 4.2) und hinsichtlich HI eine wesentliche Rolle spielt. Im Weiteren wird für „Oversight“ der Begriff „Aufsicht“ verwendet.

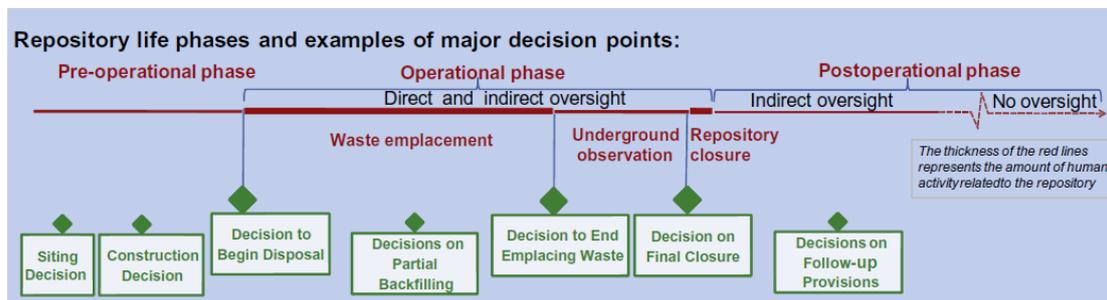


Abb. 4.2 Entwicklungsphasen des Endlagers und relevante Aufsicht-Perioden (entnommen aus /WEI 13/)

In Bezug auf HI sind die folgenden Aussagen aus ICRP 122 hervorzuheben:

Abs. 62: Der Sinn und Zweck radioaktive Abfälle in geologische Endlager zu verbringen besteht in dem Einschluss und der Isolierung der Abfälle von der Umwelt. Ein Aspekt hierbei ist die Vermeidung von HI. Es ist zwischen beabsichtigten und unbeabsichtigten menschlichen Eindringen zu unterscheiden, wobei das beabsichtigte menschliche Eindringen nicht weiter berücksichtigt wird, da es nicht im Verantwortungsbereich der gegenwärtigen Generation liegt, diejenigen die bewusst in das Endlager eindringen zu schützen. Die Ausgestaltung und die Standortwahl der Endlagereinrichtung haben Merkmale aufzuweisen, die die Möglichkeiten eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens reduzieren.

Abs. 63: HI kann mit erhöhten Strahlenbelastungen und signifikanten Strahlendosen einhergehen. Diese Konsequenz ist unausweichlich mit der Entscheidung verknüpft, die Abfälle zu isolieren und zu konzentrieren im Gegensatz zur Verteilung und Verdünnung.

Abs. 64: Der Schutz gegen hohe radiologische Belastungen in Folge von HI kann am besten durch die Reduzierung der Möglichkeiten entsprechender Ereignisse erbracht werden. Das kann durch die Einlagerung der Abfälle in tiefen geologischen Schichten, Vermeidung von Standorten mit nützlichen Ressourcen, Vorkehrungen die das Eindringen erschweren und indirekte Aufsicht (z. B. Einschränkung der Flächennutzung, Umweltkontrollsysteme, Überwachung und Sicherungsmaßnahmen, Informationserhalt und Standortmarkierung), erfolgen. Es ist anzunehmen, dass die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den Phasen einer direkten und

indirekten Aufsicht sehr gering ist. Im Falle, dass trotzdem ein entsprechendes Ereignis eintritt, können geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von signifikanten Konsequenzen ergriffen werden.

Abs. 65: In entfernter Zukunft, wenn keine indirekte Aufsicht mehr vorhanden ist, kann HI nicht mehr ausgeschlossen werden. Daher sind die Konsequenzen aus einem oder mehreren stilisierten HI Szenarien zu ermitteln, um die Robustheit des Endlagersystems gegen potenzielles menschliches Eindringen einschätzen zu können. Da das zukünftige menschliche Verhalten nicht prognostiziert werden kann, ist die Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeiten in quantitativen Sicherheitsanalysen nicht geeignet. In der Planungsphase sind daher die Ergebnisse aus den stilisierten Szenarien oder vereinfachten Berechnungen vielmehr als Indikatoren für die Robustheit des Endlagersystems durch Vergleich mit numerischen Dosiswerten heranzuziehen. Es wird empfohlen, die definierten Referenzwerte für den Notfall und/ oder bestehende Strahlungssituationen anzuwenden. Sollten die ermittelten Ergebnisse die Referenzwerte übersteigen, dann sind angemessene Maßnahmen zu ergreifen, die die Möglichkeiten von HI und die potenziellen Konsequenzen reduzieren.

Abs. 66: In Bezug auf ein geologisches Endlager beinhaltet ein Eindringen, dass viele der in der Optimierung berücksichtigten Barrieren zum Schutz des Endlagersystems umgangen werden. Mögliche Schutzfunktionen gegen HI sollten während der Entwicklung des Endlagersystems in der Standortauswahl und Auslegung berücksichtigt werden. Darüber hinaus kann die Einschätzung der Robustheit des Endlagers gegen HI das Vertrauen in den Sicherheitsnachweis erhöhen.

4.1.2.3 OECD/NEA

Die NEA hat in der Vergangenheit eine Reihe von Veranstaltungen durchgeführt und Initiativen ins Leben gerufen, die sich intensiv mit Themen wie zukünftige menschliche Aktivitäten an einem Endlagerstandort bzw. Szenarienentwicklung inklusive HI auseinandersetzten. Die folgende Liste gibt Beispiele von entsprechenden NEA Veranstaltungen und Initiativen wieder:

- Systematic Approaches to Scenario Development /NEA 92/,
- Future Human Actions (FHA) /NEA 95/,
- Scenario Development /NEA 01/,

- Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (MeSa) /NEA 12/ und
- Scenario Workshop /NEA 16/.

Insbesondere werden die beiden letztgenannten Beispiele herangezogen und die in entsprechenden Berichten identifizierten Aussagen zu HI auszugsweise aufgeführt:

Bericht zu MeSa /NEA 12/:

Seite 19, Abs. 4: Zur Unterstützung für die Behandlung von Unsicherheiten, insbesondere Unsicherheiten die nicht quantifizierbar sind, wie solche in Verbindung mit HI oder der zukünftigen Biosphärenentwicklung, bieten sich regulatorischen Leitlinien an.

Seite 40 – 41, Abs. 3: Eine Reihe von möglichen zukünftigen menschlichen Handlungen (FHA), die das Potenzial haben, die natürlichen und geotechnischen Barrieren oder das Sicherheitsvermögen des Endlagersystems bedeutend zu beeinflussen, können als besondere Arten von plausiblen alternativen Szenarien betrachtet werden. Da FHA nicht vorhergesagt werden kann und Szenarien die FHA zum Inhalt haben auf stilisierten Annahmen beruhen, werden diese oftmals als eine spezifische Kategorie von Szenarien betrachtet. HI, das direkt das Isolations-/ Einschlussvermögen beeinträchtigt, wird häufig systematisch in Regularien behandelt. Hierbei wird gewöhnlich unterschieden in unbeabsichtigtes und beabsichtigtes menschliches Eindringen. Die Aufsichtsbehörde betrachtet im Allgemeinen nur den Fall eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens, dass oftmals mit dem Verlust der Informationen und dem Wissen über das Endlager verbunden wird. Verschiedene Regularien fordern die Betrachtung der radiologischen Auswirkungen auf den oder diejenigen, die in das Endlager eindringen. Jedoch wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass eine Person, die direkt in Kontakt mit hochaktivem Abfall gelangt, eine radiologische Belastung bis hin zu einer letalen Dosis erfährt. Nicht vorhandene regulatorische Dosisgrenzwerte für die genannte radiologische Situation werden durch die Notwendigkeit kompensiert, die Möglichkeiten von HI durch die Endlagerteufe, Standortauswahl oder Standortmarkierung zu reduzieren. Darüber hinaus können mögliche radiologische Belastungen des/ der Eindringenden detektiert und möglicherweise auch behandelt werden, wenn die Gesellschaft in der die belastete Person lebt entsprechende Fähigkeiten bzw. Kenntnisse wie die heutige Gesellschaft hat. Das ist eine vereinfachende Annahme die manchmal in Regularien anzutreffen ist. In einigen Regularien wird der frühestmögliche

Zeitpunkt für ein menschliches Eindringen vorgegeben, obwohl ein Wissenserhalt so lange wie möglich angestrebt wird.

Seite 41, Abs. 1: Stilisierung kann als geeignet für Szenarien betrachtet werden, die das menschliche Eindringen zur Grundlage haben.

Seite 62, Abs. 4: Von einigen Aufsichtsträgern wird die Möglichkeit von HI und seiner potenziellen Konsequenzen unter der Bedingung akzeptiert, dass das Endlager nachweislich in ausreichender Teufe und entfernt von natürlichen Ressourcen errichtet wird. Die genannten Aspekte werden als die hauptsächlichen Gegenmaßnahmen zu HI betrachtet. Darüber hinaus ist das Endlager derart auszugestalten, dass die Möglichkeiten von HI und der daraus resultierenden Konsequenzen reduziert werden.

Seite 76, Abs. 2: Aufgrund der Unsicherheiten in Verbindung mit HI werden entsprechende stilisierte Szenarien aufgestellt und untersucht. Hierbei ist es gängige Praxis die potenziellen Konsequenzen von HI Szenarien durch deterministische Berechnungen separat von anderen Aspekten des Leistungsvermögens und der Sicherheitsanalyse zu bestimmen.

Seite 117, Abs. 4: Es wird allgemein die Wichtigkeit von regulatorischen Leitlinien in Bezug auf die zu untersuchenden Szenarien betont. Hier stehen insbesondere die Szenarien im Zusammenhang mit HI und der Biosphäre im Vordergrund.

Seite 142, Spiegelpunkt 6 sowie Seite 230, Abs. 4: HI Szenarien werden mit Ausnahme der Regularien zur Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) separat behandelt.

Seite 234, Abs. 1: Es besteht allgemeiner Konsens, dass nur gegenwärtige und vergangene Techniken in einer begrenzten Anzahl an HI Szenarien zu berücksichtigen sind. Die Aufsichtsträger sollen entsprechende Leitlinien zur Stilisierung von spezifischen Szenarien zur Unterstützung des Antragstellers als Rechtfertigung der zu treffenden Annahmen, auf der die Entwicklung dieser Szenarien basiert, bereitstellen.

Bericht zum Scenario Workshop /NEA 16/

Der Bericht enthält eine synoptische Zusammenstellung der Beiträge vom Szenarien Workshop, der im Juni 2015 bei der NEA in Paris abgehalten wurde, und eine Auswertung der Antworten zu einem Fragenkatalog der im Vorfeld der Veranstaltung ausge-

geben wurde. Darüber hinaus reflektiert der Bericht auf internationale Empfehlungen, Vorhaben und Initiativen. Hierauf wird nicht eingegangen, da diese bereits in Kapitel 4.1.2 aufgegriffen und dargestellt wurden. Auch die Ausführungen zu Deutschland werden hier nicht behandelt, da die entsprechenden Aussagen Gegenstand der Kapitel 2.1, 0 sowie 4.2.1 sind.

Seite 11, Spiegelpunkt 3: Unter den verschiedenen Klassen von Szenarien wird im Bericht in einem extra Kapitel (Kapitel 5.3 in /NEA 16/) die Klasse HI behandelt.

Seite 26, Abs. 2: In Bezug auf HI Szenarien fordern verschiedene nationale Regularien die Betrachtung der radiologischen Auswirkungen auf die eindringende Person oder andere Personengruppen. Im Allgemeinen wird in den Regularien keine maximale Dosisgrenze für die Belastung des oder der Eindringenden festgelegt. Es wird implizit eingeräumt, dass eine Person, die in direktem Kontakt mit hochaktivem Abfall kommt, eine radiologische Belastung bis hin zu einer letalen Dosis erfährt (siehe auch /NEA 12/).

Seite 26, Abs. 3 sowie Seite 27, Abs. 2: Auch hier werden für die Analyse der Szenarien regulatorische Leitlinien bezüglich der Anwendung von deterministischen und probabilistischen Methoden als nützlich angesehen. Auch die Stilisierung von HI Szenarien wird als geeignet angesehen und in vielen Regularien zur Behandlung von HI akzeptiert. Jedoch wird auch darauf hingewiesen, dass die Interpretation hinsichtlich Charakter und Umfang der Stilisierung im Aufgabenbereich der Entwickler liegt.

Seite 32, Abs. 1: Als Indikator für die Durchführung einer Analyse von HI Szenarien wird folgendes Beispiel angeführt:

Wenn in der Standortauswahlphase hinsichtlich der Möglichkeiten und der Konsequenzen von HI zwischen potenziellen Endlagerstandorten kein großer Unterschied besteht, dann ist eine Analyse der HI Szenarien nicht erforderlich, da hinsichtlich der Standortabwägung zu diesem Aspekt folglich auch keine Unterschiede auftreten. In Bezug auf die Genehmigungsphase eines Standortes ist hingegen die Beurteilung von HI Szenarien generell gefordert.

Seite 40, Abs. 2: Es besteht allgemein Konsens, dass die Vorhersage menschlicher Handlungen über lange Zeiträume nicht möglich ist, z. B. aufgrund der unbekannt zukünftigen Techniken, Gesellschaft und menschliches Verhalten im Allgemeinen. Daher werden FHA und insbesondere HI in eine separate Kategorie eingestuft, da diese

Szenarien im Vergleich zu den anderen Szenarien (z. B. natürliche Phänomene) eine unterschiedliche Behandlung erfordern. Für HI Szenarien wird ein stilisierter Ansatz als geeignet für die Analyse angesehen. Das bedeutet, dass kein Versuch unternommen wird den gesamten Bereich aller möglichen Szenarien abzudecken oder den Szenarien Wahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Es wird vielmehr eine begrenzte Anzahl an anschaulichen Fällen für die Analyse zugrunde gelegt, die oftmals auf der Basis von Regularien oder im Dialog zwischen Antragsteller und Aufsichtsträger definiert werden. Die formale Einholung von Expertenmeinungen können ebenfalls nützlich für die Identifizierung, Zusammenstellung und Parametrisierung von repräsentativen HI Szenarien sein.

4.1.2.4 WENRA

Die WENRA hat mit dem Bericht „Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels“ /WEN 14/ erstmals sog. Safety Reference Level (SRL) für Endlagereinrichtungen vorgelegt. Der Bericht enthält einige SRL die direkt und indirekt auf HI abstellen. Die indirekten SRL beziehen sich auf zu treffende Maßnahmen, wie z. B. Überwachung und Informationserhalt, die einem unbeabsichtigten menschlichen Eindringen entgegenwirken.

Im Folgenden werden die identifizierten SRL benannt und deren Inhalt in konzentrierter Form dargestellt:

SRL mit direktem Bezug zu HI:

DI-88: Der Betreiber hat im Sicherheitsnachweis zukünftige menschliche Aktivitäten inklusive eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens zu berücksichtigen. Hierbei soll die Reduzierung der Möglichkeiten und der potenziellen Konsequenzen im Zusammenhang mit HI im Fokus der Untersuchungen stehen. Jegliche getroffene Maßnahme gegen HI darf die Betriebssicherheit und die Sicherheit in der Nachverschlussphase nicht gefährden.

SRL mit indirektem Bezug zu HI:

DI-19: Der Betreiber hat ein Erfahrungsrückfluss-Programm mit dem Ziel einzurichten und zu betreiben, die sicherheitsrelevanten Erfahrungen zu allen Phasen der Endlagereinrichtung bis zum Ablauf der Betreibergenehmigung in systematischer Weise zu

sammeln, auszuwerten und zu analysieren sowie zu dokumentieren. Diese Informationen sollen dazu genutzt werden, mögliche einflussnehmende Ereignisse und Prozesse auf die Sicherheit der Anlage zu verhindern und bei Bedarf zur Verbesserung der Auslegung, Konstruktion und Betrieb der Endlagereinrichtung. Erfahrungen aus anderen Einrichtungen sollen ggf. auch in das Programm einfließen.

DI-20: Der Betreiber hat zu allen Phasen der Endlagereinrichtung bis zum Ablauf der Betreibergenehmigung sicherzustellen, dass sicherheitsrelevante Daten und das Wissen zur Verfügung stehen und ggf. zu aktualisieren sind für gegenwärtige Aktivitäten, Sicherheitsanalysen und langzeitigen Informationserhalt.

DI-21: Der Betreiber hat zum Ablauf der Betreibergenehmigung sicherzustellen, dass die Standort- und Anlagendaten der Endlagereinrichtung im Einklang mit nationalen Gesetzen und regulatorischen Anforderungen für einen kontinuierlichen Erhalt bzw. Konservierung zur Verfügung stehen.

DI-22: Der Betreiber hat u. a. bei Bedarf die Überwachung der Endlagereinrichtung in der Nachverschlussphase zum Schutz von Mensch und Umwelt fortzuführen.

DI-72: Der Betreiber hat bei Bedarf nach Verschluss der Anlage und bis zum Ablauf der Betreibergenehmigung ein Überwachungsprogramm zu implementieren und auszuführen.

4.2 Übertragbarkeit der VSG Methode auf andere Standorte

4.2.1 Kurzdarstellung der VSG Methode

Zur Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager wurde in der VSG eine entsprechend Methode entwickelt und angewandt /BEU 12a/. Die Zielsetzung war gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ (vgl. Kap. 4.1.1.1) auf die Optimierung des Endlagersystems, in Bezug auf die Reduzierung der Möglichkeiten eines menschlichen Eindringens und auf die Reduzierung möglicher Konsequenzen im Falle, dass ein menschliches Eindringen stattfindet, ausgerichtet. Die Methode, deren Anwendung in verschiedenen Schritten erfolgt, ist in Abb. 4.3 dargestellt.

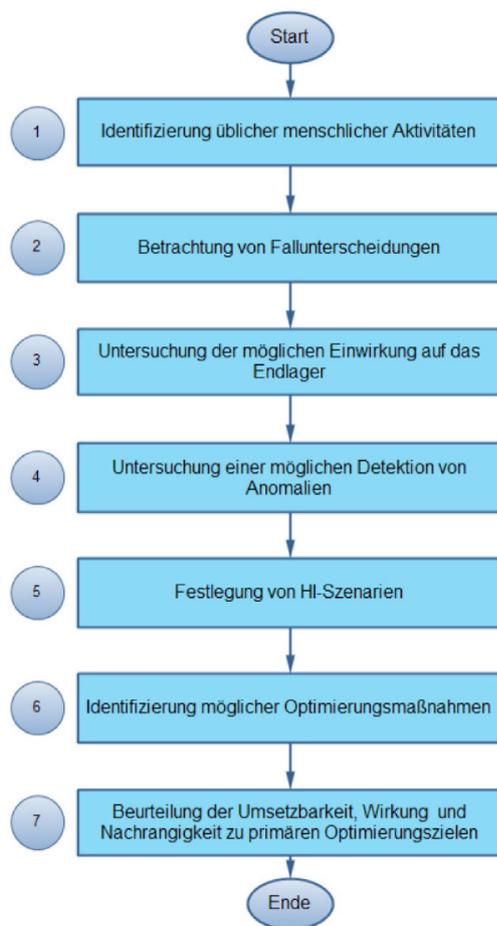


Abb. 4.3 Darstellung der durchzuführenden Arbeitsschritte hinsichtlich der Untersuchung des menschlichen Eindringens in ein Endlager /BEU 12a/

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Methode kurz beschrieben:

1. In einem ersten Arbeitsschritt sind unter Berücksichtigung bestehender Praxis diejenigen menschlichen Aktivitäten zu identifizieren, die das Potenzial haben in entsprechende Endlagerteufen vorzudringen.
2. Betrachtung von sogenannten Fallunterscheidungen für jede aus (1) identifizierte menschliche Aktivität. Die Fallunterscheidungen können sich beispielsweise auf unterschiedliche Ansatzpunkte, z. B. für vertikale Bohrungen, die somit unterschiedliche Bereiche des Endlagersystems betreffen können, beziehen.
3. Diskussion der möglicherweise resultierenden Einwirkungen auf das Endlager unter Einbeziehung der in (2) aufgestellten Fallunterscheidungen.

4. Diskussion der Möglichkeiten einer Wahrnehmung und/ oder Detektion von vorliegenden Auffälligkeiten bzw. Anomalien verursacht durch die Handlungsabläufe der identifizierten menschlichen Aktivitäten.
5. Festlegung von HI-Szenarien für die Fälle, die sicherheitsrelevante Implikationen für das Endlager nach sich ziehen können, und aus der fallbezogenen Diskussion einer möglichen Wahrnehmung von endlager- und abfallinduzierten Auffälligkeiten.
6. Identifizierung möglicher Optimierungsmaßnahmen für die in (5) festgelegten HI-Szenarien.
7. Diskussion der Umsetzbarkeit der aus (6) identifizierten möglichen Optimierungsmaßnahmen unter Beachtung, dass keine gemäß den Sicherheitsanforderungen genannten primären Optimierungsziele (z. B. Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit, und Strahlenschutz) gefährdet werden.

4.2.2 Internationale Vorgehensweise

In 2012 wurde von der IAEA das Vorhaben HIDRA ins Leben gerufen. Die Zielsetzung dieses Vorhabens liegt auf die Verfügbarmachung eines Forums zum Austausch von Informationen zur Thematik HI und auf die Entwicklung eines Ansatzes zur Identifizierung und Auswahl von HI Szenarien sowie Schutzmaßnahmen gegen HI, die auf unterschiedliche Endlagerstandorte und Einrichtungen anwendbar sind. In Bezug auf die Endlagereinrichtung standen vorwiegend oberflächennahe und geologische Endlager im Fokus.

In einer ersten Phase, die als HIDRA I bezeichnet wird, und in 2015 endete, wurde der o. g. Zielsetzung nachgekommen und ein entsprechender Ansatz (Abb. 4.4) ausgearbeitet. Zu der Phase I existiert ein Abschlussbericht im Entwurfsstatus /IAEA 16/. Es ist geplant diesen Bericht im Rahmen der IAEA TECDOC – Reihe zu publizieren.

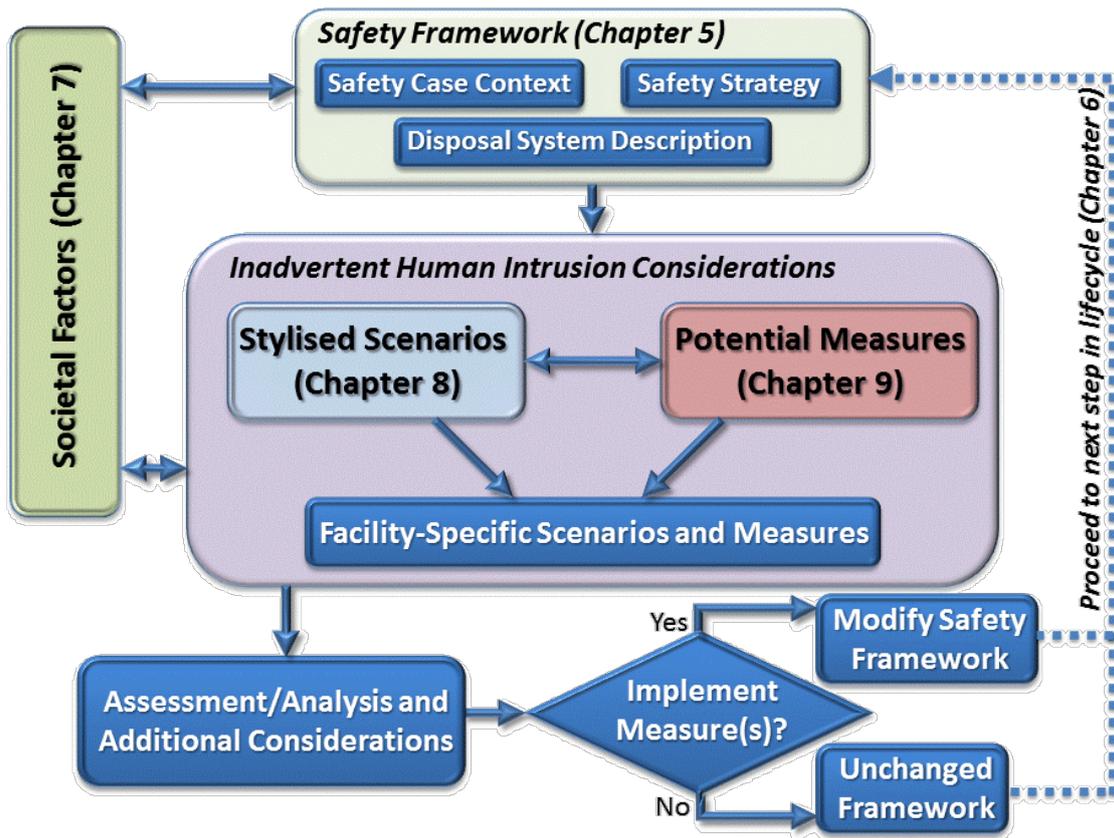


Abb. 4.4 Schematische Darstellung des Ansatzes zur Behandlung von HI /IAEA 16/

Ein wesentliches Element des entwickelten Ansatzes ist die Ableitung von Schutzmaßnahmen gegen HI. Die Vorgehensweise zur Ableitung entsprechender Maßnahmen ist in Abb. 4.5 dargestellt.

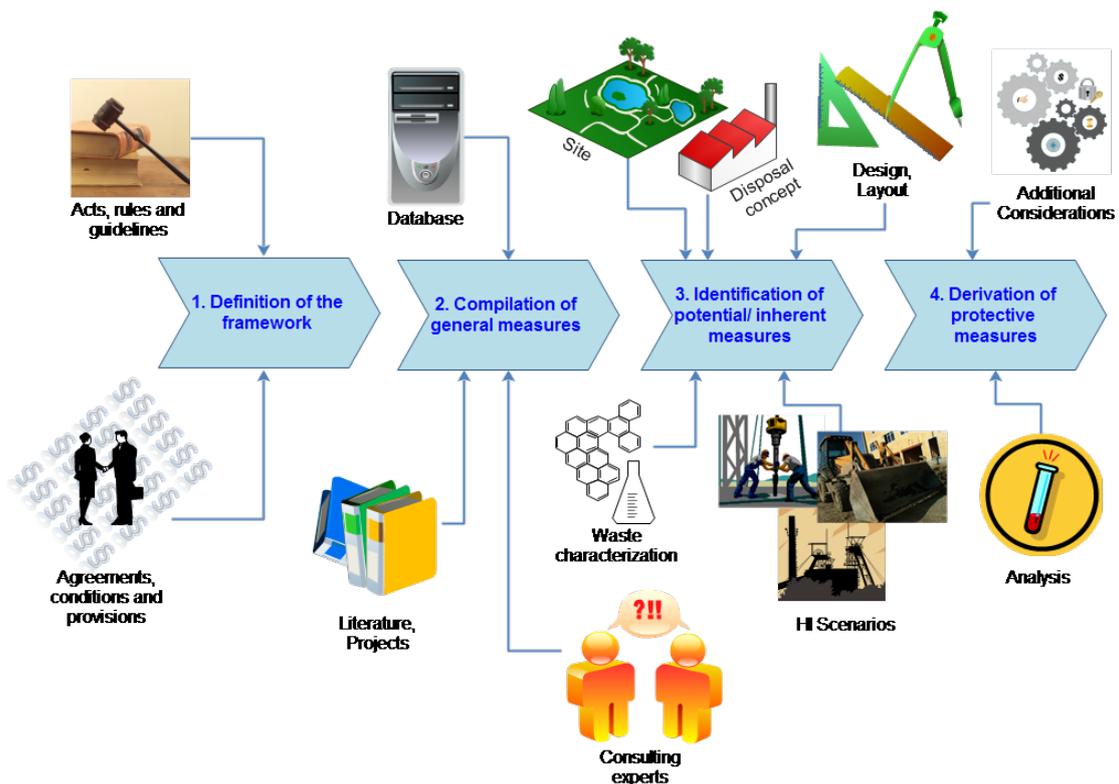


Abb. 4.5 Darstellung des Ablaufes zur Ableitung von Schutzmaßnahmen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager /IAEA 16/

Der Weg zur Ableitung von Schutzmaßnahmen erfolgt in insgesamt vier Schritten, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

Schritt 1: Bestimmung der Rahmenbedingungen

Der erste Schritt mit der Bestimmung der Rahmenbedingungen bildet die Grundlage für die weiteren Schritte. Zur Bestimmung der Rahmenbedingungen hat jedes Land, das die Methode anwendet, die entsprechenden einschlägigen nationalen regulatorischen Vorgaben wie z. B. Gesetze, Verordnungen, Sicherheitsanforderungen und Leitlinien in Bezug auf die Behandlung von HI zu berücksichtigen. Darüber hinaus können Bedingungen, Festlegungen und Annahmen zur Vorgehensweise getroffen werden. Beispiele hierzu sind, dass nur das unbeabsichtigte menschliche Eindringen und hierzu heutige Techniken zu berücksichtigen sind.

Schritt 2: Zusammenstellung von allgemeinen Maßnahmen

Die Zusammenstellung von allgemeinen Maßnahmen ist als Vorstufe zur Identifikation von potenziellen Maßnahmen im Schritt 3 der Methode zu sehen. In dem Schritt 2 ist

es noch nicht erforderlich spezifische Informationen zum Endlagerkonzept und zur Auslegung bzw. Ausgestaltung des Endlagersystems vorliegen zu haben. Jedoch sind allgemeine Informationen zum Standort und zum Endlagersystem wie z. B. Wirtsgestein, Endlagerkonzeption sowie Art und Umfang des einzulagernden Abfalls hilfreich. Je mehr spezifische Informationen in dieser Phase der Methodenanwendung zur Verfügung stehen desto konkreter, umfassender und qualitativ belastbarer lässt sich die Ausgangssituation zur Identifizierung geeigneter Maßnahmen zusammenstellen.

Für die Zusammenstellung der allgemeinen Maßnahmen werden die folgenden möglichen Quellen angegeben:

- Datenbasis (bereits vorliegende allgemeine Maßnahmen, die im Rahmen eines gedanklichen Findungsprozesses in eine Datenbank aufgenommen wurden, die Datenbank ist dabei nicht abschließend und soll kontinuierlich weiterentwickelt werden)
- Literatur/ Projekte (vorliegende Referenzen in Form von Berichten, Dokumentationen, Anwendungsbeispielen sowie Projekte wie z. B. durchgeführte Sicherheitsnachweise)
- Expertenbefragung (Hinzuziehung von Expertenmeinungen bzw. Erfahrungen und Fachwissen zu bestimmten Aktivitäten wie z. B. Durchführung von Explorationsbohrungen und Planung und Errichtung von Bergwerken)

Das Ergebnis aus Schritt 2 ist eine Zusammenstellung von allgemeinen Maßnahmen gegen HI, die als Ausgangsgrundlage zur Identifizierung von potenziellen Maßnahmen in Schritt 3 dient.

Schritt 3: Identifizierung von potenziellen und inhärenten Maßnahmen

Die potenziellen Maßnahmen sind solche Maßnahmen, die als relevant für ein spezifisches Endlagersystem identifiziert werden und vor der eigentlichen Analyse in Schritt 4 zur Verfügung stehen müssen. Der Schritt 3 erfordert u. a. die Betrachtung von spezifischen Informationen zum Standort und Endlagerkonzept sowie zur Ausgestaltung des Endlagers und zur Abfallcharakterisierung. Darüber hinaus sind Informationen zu den relevanten menschlichen Aktivitäten in der Region des Endlagers wie z. B. Bohrung und Abbau von Bodenschätzen als Teil der HI Szenarien relevant.

Vor der Auswahl von potenziellen Maßnahmen ist es wesentlich die inhärenten Maßnahmen des Endlagersystems zu identifizieren. Inhärente Maßnahmen sind solche Maßnahmen, die bereits in der Konzeption oder durch den Standort gewollt oder ungewollt, wissentlich oder unwissentlich existieren bzw. vorliegen. Beispiele hierfür sind die Separierung von Einlagerungsbereichen und die Endlagerteufe. Der Grund für die Identifizierung solcher Maßnahmen liegt zum einen in der Erweiterung des Systemverständnisses und des bestehenden Widerstandsvermögen und zum anderen als Potenzial für die Steigerung der Effektivität der inhärenten Maßnahme gegen HI.

Einige der allgemeinen Maßnahmen werden möglicherweise aus verschiedenen Gründen nicht als potenzielle Maßnahmen berücksichtigt. Das gilt z. B. dann, wenn die betreffenden nationalen Regularien bestimmte Maßnahmen wie „Marker“ nicht vorsehen. In diesem Fall würden alle allgemeinen Maßnahmen im Zusammenhang mit einer Standortmarkierung aus dem weiteren Prozess ausgeschlossen.

Letztendlich stellt eine Liste von potenziellen Maßnahmen eine Vorauswahl von möglichen Kandidaten für die weitere Analyse dar, aus der dann die Schutzmaßnahmen abgeleitet werden. Die potenziellen Maßnahmen sind in angemessener Weise unter Berücksichtigung der folgenden Aspekte zu selektieren bzw. zu identifizieren:

- Maßnahmen dürfen nicht offensichtlich die Sicherheit der Endlagereinrichtung gefährden.
- Maßnahmen dürfen nicht zu anderen unzulässigen Gefährdungen für den Menschen und die Umwelt führen.
- Maßnahmen haben dem Prinzip der Verhältnismäßigkeit hinsichtlich Nutzen, Aufwand und Kosten zu folgen.

Schritt 4: Ableitung von Schutzmaßnahmen

Im Schritt 4 werden die Schutzmaßnahmen, die geeignet für eine entsprechende Implementierung und Umsetzung erachtet werden, abgeleitet. Hierzu werden die im vorangegangenen Schritt identifizierten potenziellen Maßnahmen qualitativ und ggf. quantitativ analysiert. Die Analyse erfolgt hierbei in enger Verbindung mit den aufgestellten stilisierten HI Szenarien (siehe hierzu auch Abb. 4.4). Das Hauptziel der Analyse besteht darin zu beurteilen, ob die betrachteten potenziellen Maßnahmen im Konflikt mit vorrangigen Zielen wie der Langzeitsicherheit und der Betriebssicherheit des Endlagers stehen. Ein weiteres Ziel besteht in der Beurteilung der Machbarkeit bzw. Um-

setzbarkeit und der Effektivität. Die Beurteilung kann z. B. durch Fachdiskussion und/oder Berechnung (Bestimmung der Konsequenzen durch HI vor und nach der Implementierung der Maßnahme) erfolgen.

Diejenigen potenziellen Maßnahmen, die nicht die vorrangigen Ziele gefährden sowie umsetzbar und effektiv gegen HI beurteilt werden, stellen letztendlich die abgeleiteten Schutzmaßnahmen dar.

Die Durchführung der beschriebenen Analyse ist schematisch in Abb. 4.6 wiedergegeben.

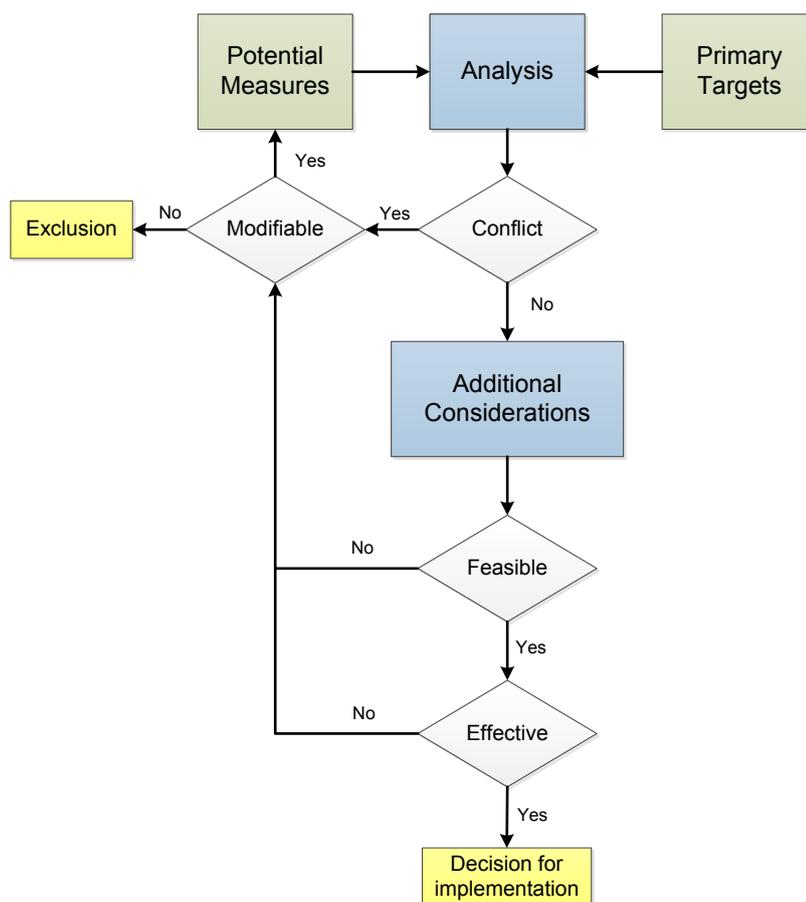


Abb. 4.6 Schematische Darstellung der wesentlichen Elemente für die Analyse und zusätzlicher Betrachtungen /IAEA 16/

In 2016 wurde das HIDRA Vorhaben mit der Phase II (im Folgenden als HIDRA II bezeichnet) fortgesetzt. Die Zielsetzung hierbei ist, die entwickelte Methode aus der Phase I auf generische Standorte mit realitätsnahem Bezug anzuwenden. Zur Festlegung

der Standorte und Endlagerkonzeptionen sowie Anwendung der Methode wurden die beiden folgenden Arbeitsgruppen in HIDRA II eingerichtet:

- Arbeitsgruppe „Oberflächennahe Endlagerung“ und
- Arbeitsgruppe „Geologische Endlagerung“.

In Bezug auf den Beispielstandort für die Arbeitsgruppe „Oberflächennahe Endlagerung“ hat man sich auf den bereits im IAEA Vorhaben PRISM generierten Standort verständigt.

Die Arbeitsgruppe „Geologische Endlagerung“ hat als Standortbasis ein fiktives Land (Landesgrenzen) und für das Wirtsgestein des Endlagers Ton zugrunde gelegt. Für das Endlagerkonzept werden bereits bestehende Elemente bzw. Konzeptionen berücksichtigt.

Es sollen im Ablauf des HIDRA II Vorhabens die folgenden Aspekte berücksichtigt bzw. behandelt werden:

- Berücksichtigung von unbeabsichtigten HI im Rahmen der Überlegungen zu Entscheidungsprozessen und Betrachtungen zum Sicherheitsnachweis des PRISM/PRISMA Vorhabens.
- Entwicklung des regulatorischen Rahmens zur Behandlung von HI (z. B. vorschreibend/ flexibel, Kriterien, quantitativ/ qualitativ).
- Effektive Ansätze zur Kommunikation und Information bezogen auf HI zu den unterschiedlichen Schritten in der Entwicklungsphase eines Endlagers.
- Anpassung von repräsentativen Szenarien aus dem HIDRA Vorhaben für die hypothetischen Standorte bzw. Endlager.
- Nutzung der Datenbank von zusammengestellten potenziellen Maßnahmen zur Identifizierung von geeigneten Optimierungsmaßnahmen gegen HI für ein spezifisches Endlager in Verbindung mit der Anpassung von HI Szenarien für die hypothetischen Standorte bzw. Endlager.
- Praktische Implementierung der Optimierung zur Reduzierung der Möglichkeiten von HI und der Reduzierung von Konsequenzen im Fall von HI unter Berücksichtigung der repräsentativen Szenarien und entwickelten Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf die hypothetischen Beispiele.

- Rolle der passiven/ indirekten Kontrolle/ Überwachung zur Bestimmung des frühesten möglichen zeitlichen Eintretens von HI.

Im Ergebnis des HIDRA II Vorhabens sollen Hinweise auf die Anwendbarkeit und Praktikabilität der Methode bzw. Rückschlüsse für eine Optimierung gewonnen werden. Das HIDRA II Vorhaben soll in 2018 abgeschlossen werden.

4.2.3 Fazit

Im Folgenden werden einige Aspekte genannt, die aus der Betrachtung der VSG Methode und der Methode aus dem HIDRA Vorhaben der IAEA resultieren:

- Die in der VSG entwickelte Methode /BEU 12a/ ist auf die Anforderungen gemäß /BMU 10/ abgestimmt.
- Vorgehensweise der VSG Methode lässt keine Aspekte erkennen, die eine Anwendung auf andere Standorte einschränkt bzw. nicht ermöglicht.
- Der VSG Ansatz entspricht in weiten Teilen der Vorgehensweise gemäß dem HIDRA Vorhaben der IAEA.
- Die zugrunde liegende Zielsetzung ist für die Anwendung beider Methoden auf die Reduzierung der Möglichkeiten und Konsequenzen von HI ausgerichtet.
- Zur Umsetzung der genannten Ziele steht in beiden Methoden die Ableitung von möglichen Maßnahmen gegen HI im Vordergrund.
- Ebenfalls ist in beiden Vorgehensweisen die Forderung zu beachten, dass die abgeleiteten Maßnahmen vordergründige Ziele wie die Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen dürfen.
- Der IAEA Ansatz wird in dem Fortsetzungsvorhaben HIDRA II auf seine Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit geprüft. Die Anwendung erfolgt hier auf ein generisches oberflächennahes Endlager und ein Tiefenendlager in geologischen Schichten. Bei dem Tiefenendlager wird von einer Wirtsfornation in Ton ausgegangen.
- Das HIDRA II Vorhaben sollte weiter begleitet bzw. verfolgt und die Ergebnisse insbesondere auf mögliche standorteinschränkende Anwendungen ausgewertet werden.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die durchgeführten Recherchearbeiten und daraus gewonnene Erkenntnisse im Arbeitspaket 1 des FuE-Vorhabens 3615103240 in Bezug auf nationale/internationale Vorgehensweisen bei der Entwicklung von Szenarien für die Nachverschlussphase.

Hierzu wurden in Kapitel 2 von ausgewählten Ländern, die zugrundeliegenden Methoden, die bei der Szenarientwicklung zur Anwendung kommen, dargestellt. Zur Einschätzung von möglichen Unterschieden und/ oder grundsätzlichen Abweichungen bzw. zum Vergleich, wurde einleitend die in Deutschland im Rahmen des Vorhabens VSG entwickelte Methode (Kapitel 2.1) beschrieben. Ein weiterer Aspekt geht auf die Ableitung von Rechenfällen aus entwickelten Szenarien ein.

Neben der Recherche zur nationalen/ internationalen Vorgehensweise in Bezug auf die Szenarientwicklung wurden potenzielle Ansätze, die eine Verifizierung von abgeleiteten Szenarien zur Nachverschlussphase ermöglichen sollen, identifiziert und beurteilt (Kapitel 3.1). Den potenziellen Ansätzen liegt der Leitgedanke zu Sicherheitsfunktionen zugrunde. Es wurde ein orientierender Überblick zu den aufgestellten Sicherheitsfunktionen zu konkreten Endlagerkonzepten und Endlagerstandorten bzw. Wirtsgesteinen, von denen sich zwei im Kristallingestein (Schweden, Finnland) und ein weiterer in Tongestein (Frankreich) befinden, gegeben (Kapitel 3.2). Zusammen mit der Aufstellung von Sicherheitsfunktionen aus dem VerSi Vorhaben, die sich auf einen Standort in Salz beziehen, liegen für alle zu betrachtenden Wirtsgesteine für einen Endlagerstandort in Deutschland Beispiele vor, die für weitere Anwendungsbetrachtungen und Erprobungen eine potenzielle Ausgangsgrundlage darstellen.

Eine Teilmenge oder auch Sondergruppe von Szenarien stellen diejenigen Entwicklungen dar, die sich auf der Basis eines zukünftigen menschlichen Eindringens in ein Endlager ergeben können. Aufgrund der mit diesen Szenarien verbundenen großen Ungewissheiten in Bezug auf deren Prognose und Ablauf sind zur entsprechenden Behandlung in einem Sicherheitsnachweis klare regulatorische Rahmenbedingungen hilfreich bzw. erforderlich. Hierzu wurden in Kapitel 4 zu ausgewählten Ländern entsprechende Anforderungen sowie Richtlinien/ Empfehlungen von internationalen Organisationen identifiziert. Analog zu Kapitel 2 wurde auch hier zu Vergleichszwecken der in Deutschland zugrunde liegende regulatorische Rahmen einleitend dargestellt (Kapitel 4.1.1.1). Darüber hinaus wurde auf die mögliche Übertragbarkeit auf andere Standorte, der aus

dem VSG Vorhaben vorliegenden Methode unter Berücksichtigung internationaler Entwicklungen, eingegangen.

Abschließend ist festzuhalten, dass die durchgeführte Recherche einen essenziellen Beitrag für die Weiterentwicklung bestehender Ansätze und der Entwicklung diversitärer Ansätze zur Untermauerung/ Verifizierung bereits vorliegender Methoden in Deutschland darstellt.

Literaturverzeichnis

- /AKS 16/ Arbeitskreis "Szenarientwicklung" (AKS): Anforderungen an die Methode zur Ableitung von Szenarien für ein Endlager für radioaktive Abfälle. im Entwurf, Stand 20. Juni 2016.
- /AND 00/ Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K.-E., Ericsson, L.O.: What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-00-12, 144 S.: Stockholm, Sweden, April 2000.
- /AND 05a/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs: Dossier 2005 Argile. Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. Meuse/Haute-Marne site, Collection les Rapports, Bd. 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /AND 05b/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA) (Hrsg.): Dossier 2005 Argile. Tome: Phenomenological evolution of a geological repository, Report Series, 525 S., ISBN 2-9510108-7-70108-8-5: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /AND 05c/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA) (Hrsg.): Dossier 2005 Argile. Tome: Safety evaluation of a geological repository, Report Series, 525 S., ISBN 2-9510108-7-70108-8-5: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /ASN 08/ RFS-III.2.f du 01.06.1991. (abrogée par le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08). 12.02.2008.
- /BEU 10/ Beuth, T., Bracke, G.: VerSi Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02580 „Szenarientwicklung“, GRS-A-3525, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1. März 2010.

- /BEU 12a/ Beuth, T., Baltes, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübél, A., Wolf, J.W.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-56-4: Köln, 2012.
- /BEU 12b/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung für die Endlagervariante AB1. Kammerlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Südwestflügel und Streckenlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle im Nordostflügel des Salzstockes Gorleben. Zwischenbericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 21 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BMUB 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand vom 1. März 2012, erreichbar unter <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nuklearesicherheit/sicherheit-endlager/sicherheitsanforderungen/?type=98>, zitiert am 14. August 2014.
- /BSE 03/ Kernenergiegesetz (KEG). in der Fassung vom 1. Januar 2009, 21.03.2003.
- /CNS 06/ Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC-CCSN): Regulatory Guide G-320: Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management, 48 S.: Ottawa, Ontario, Canada, December 2006, erreichbar unter http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/G-320_Final_e.pdf, zitiert am 6. April 2016.

- /CUR 94/ Curti, E., Klos, R., Smith, P., Zuidema, P., Sumerling, T.J.: Kristallin-I Safety Assessment Report, Nagra Technical Report, NTB 93-22, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, Juli 1994.
- /EA 09a/ Environment Agency (EA), Northern Ireland Environmental Agency (NIEA): Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes. Guidance on Requirements for Authorisation, February 2009, erreichbar unter https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/296504/geho0209bpjm-e-e.pdf, zitiert am 14. Juni 2016.
- /EA 09b/ Environment Agency (EA), Northern Ireland Environmental Agency (NIEA), Scottish Environment Protection Agency (SEPA): Near-surface Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes. Guidance on Requirements for Authorisation, 144 S., February 2009, zitiert am 14. Juni 2016.
- /ENSI 09a/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 21 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), April 2009.
- /ENSI 09b/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Erläuterungsbericht zur Richtlinie, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 26 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), April 2009.
- /ESK 12/ Entsorgungskommission (ESK): Empfehlung der Entsorgungskommission; Leitlinie zum menschlichen Eindringen in ein Endlager für radioaktive Abfälle; Fassung vom 26.04.2012: Bonn, 26. April 2012.
- /FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Kindt, A., Oppermann, U., Röhlig, K.-J., Walterscheidt, K.H., Beuth, T.: Ressortforschungsbericht zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz. Bilaterale und multilaterale Zusammenarbeit im regulatorischen Bereich auf dem Gebiet der Entsorgung und Endlagerung radioaktiver Abfälle – Vorhaben 3607I09175. Entwicklungen im Bereich von

Regeln und Richtlinien im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen bei der Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, BfS-RESFOR-32/10, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Salzgitter, 1. Januar 2010.

- /GAU 10/ Gautschi, A., Gribi, P., Mayer, G., Holocher, J., Poller, A., Schneider, J., Schnellmann, M., Traber, D., Zuidema, P.: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nagra Technischer Bericht, NTB 10-01, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Oktober 2010.
- /GRI 02/ Gribi, P., Klos, R., Kosakowski, G., Mayer, G., Robinson, P., Smith, P.: Models, Codes and Data for Safety Assessment. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Project Opalinus Clay, Technical Report, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 02-06, 231 S.: Wettingen, Schweiz, Dezember 2002.
- /GRS 16/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Szenari-entwicklung, erreichbar unter <http://www.grs.de/content/szenari-entwicklung>, zitiert am 6. Juli 2016.
- /HSK 07/ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) (Hrsg.): Sachplan geologische Tiefenlager. Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, HSK 33/001, November 2007.
- /IAEA 11a/ International Atomic Energy Agency: Disposal of radioactive waste, IAEA Safety Standards Series, Specific safety requirements No. SSR-5, International Atomic Energy Agency (IAEA), 62 S., ISBN 978-92-0-103010-8, International Atomic Energy Agency (IAEA): Vienna, 2011.
- /IAEA 11b/ International Atomic Energy Agency: Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-14, 124 S., ISBN 978-92-0-111510-2: Vienna, 2011.

- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide SSG-23, International Atomic Energy Agency (IAEA), ISBN 978-92-0-128310-8: Vienna, 2012.
- /IAEA 14/ International Atomic Energy Agency: Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-29, International Atomic Energy Agency (IAEA), ISBN 978-92 -0-114313-6: Vienna, 2014.
- /IAEA 16/ International Atomic Energy Agency (IAEA): HIDRA - The International Project on Human Intrusion in the context of Disposal of RadioActive Waste, 2. Aufl.: Vienna, Austria, 2016, Draft.
- /ICRP 98/ Valentin, J.: ICRP PUBLICATION 81: Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, Annals of the ICRP, Bd. 28, Nr. 4, S. 1–32, 1998.
- /JOH 02/ Johnsin, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 472 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, 1. Dezember 2002.
- /LIT 11/ Little, R., Humphreys, P., King, F., Metcalfe, R., Penfold, J., Suckling, P.: Postclosure Safety Assessment: System and Its Evolution, NWMO DGR-TR-2011-28, Quintessa Ltd., March 2011.
- /MEE 08/ Ministry of Employment and the Economy (MEE): Government Decree (736/2008) on the safety of disposal of nuclear waste: Helsinki, 27. November 2008, erreichbar unter <http://www.finlex.fi/fi/laki/kaannokset/2008/en20080736.pdf>, zitiert am 13. Juni 2016.
- /NEA 01/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Scenario Development Methods and Practice. An

evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development. Madrid, May 1999, 2001.

- /NEA 03/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) in co-operation with the European Commission: Engineered barrier systems and the safety of deep geological repositories. State-of-the-art report, Radioactive Waste Management, Hrsg.: Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), EUR 19964 EN, 70 S.: Paris, France, 2003.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA) in co-operation with the European Commission: Engineered Barrier Systems (EBS). Design requirements and constraints ; Workshop Proceedings, Turku, Finland, 26-29 August 2003, Radioactive Waste Management, NEA No. 4548, 145 S., ISBN 92-64-02068-3, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development: Issy-les-Moulineaux, France, 2004.
- /NEA 12/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative, 239 S., ISBN 978-92-64-99190-3, 2012.
- /NEA 16/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case, NEA/RWM/R(2015)3, 2016.
- /NEA 92/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency: Systematic Approaches to Scenario Development;. A report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal // Safety assessment of radioactive waste repositories, Radioactive Waste Management, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 76 S., ISBN 9264136053, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Paris, 1992.

- /NEA 95/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Future Human Actions at Disposal Sites; A report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites, Radioactive Waste Management: Paris, 1. Januar 1995.
- /NUC 12/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Adaptive Phased Management - Used Fuel Repository Conceptual Design and Postclosure Safety Assessment in Crystalline Rock. Pre-Project Report, NWMO TR-2012-16 4CS, December 2012, erreichbar unter https://www.nwmo.ca/~media/Site/Reports/2015/09/25/05/59/NWMO-TR-2012-16_4CS-Pre-project-Report_FinalforWebsite.ashx?la=en.
- /POS 12a/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Synthesis 2012, POSIVA, 2012-12, 277 S., Posiva Oy: Olkiluoto, December 2012.
- /POS 12b/ POSIVA Oy (Hrsg.): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. Data Basis for the Biosphere Assessment BSA-2012. Part I, POSIVA, 2012-28, ISBN 978-951-652-209-1, January 2012.
- /POS 12c/ POSIVA Oy (Hrsg.): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto. Data Basis for the Biosphere Assessment BSA-2012. Appendices, POSIVA, 2012-28, ISBN 978-951-652-209-1, January 2014.
- /SEPA 16/ Scottish Environmental Protection Agency (SEPA), Environment Agency (EA), Natural Resources Wales (NRW): Guidance on Requirements for Release of Nuclear Sites from Radioactive Substances Regulation. Consultation Document February 2016, Scottish Environmental Protection Agency (SEPA); Environment Agency (EA); Natural Resources Wales (NRW), February 2016, erreichbar unter <https://consultation.sepa.org.uk/operations-portfolio/grr>.
- /SKB 06/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project, SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Schweden, 1. Oktober 2006.

- /SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume I. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 1–276: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume II. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 279–552: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume III. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 555–893: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SSM 08a/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code. The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:21, 8 S., Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): Stockholm, Sweden, 19. Dezember 2008.
- /SSM 08b/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste, Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:37, 18 S., 19. Dezember 2008, zitiert am 4. März 2016.
- /STU 15/ STUK - SÄTEILYTURVAKESKUS STRÅLSÄKERHETSCENTRALEN: STUK's review on the construction license stage post closure safety case of the spent nuclear fuel disposal in Olkiluoto, STUK-B, 147 S., STUK - SÄTEILYTURVAKESKUS STRÅLSÄKERHETSCENTRALEN: Helsinki, zitiert am 15. Dezember 2015.

- /STUK 14/ STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority: GUIDE YVL D.5. DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE, YVL, D.5, 20 S., Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Helsinki, 2014, zitiert am 10. Dezember 2015.
- /WEI 13/ Weiss, W., Larsson, C.-M., McKenney, C., Minon, J.-P., Mobbs, S., Schneider, T., Umeki, H., Hilden, W., Pescatore, C., Vesterlind, M.: ICRP PUBLICATION 122: radiological protection in geological disposal of long-lived solid radioactive waste, Annals of the ICRP, Bd. 42, Nr. 3, S. 1–57, DOI 10.1016/j.icrp.2013.01.001, 2013.
- /WEN 14/ Working Group on Waste and Decommissioning (WGWD) (Hrsg.): Radioactive Waste Disposal Facilities Safety Reference Levels, Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), 22. Dezember 2014.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, 864 S., 2012.

Abkürzungsverzeichnis

ALLIANCES	Atelier Logiciel d'Intégration, d'ANalyse et de Conception pour l'Entreposage et le Stockage
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs
APSS	Analysis of the evolution of the repository in time and space
ASN	Nuclear Safety Authority
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CEA	French Atomic Energy Commission
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission
EA	Environment Agency
EBS	Engineered Barrier System
ENSI	Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat
ESK	Entsorgungskommission
FEP	Features, Events and Processes
FHA	Future Human Actions
F&E	Forschung und Entwicklung
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit
GSG	General Safety Requirements
GSR	General Safety Requirements

HI	Human Intrusion
HIDRA	Human Intrusion in the context of Disposal of Radioactive Waste
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
KBS-3	Kärnbränslesäkerhet
MeSA	Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NEA	Nuclear Energy Agency of the Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD)
NRW	Natural Resources Wales
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
QSA	Qualitative Sicherheitsanalyse
SEA	alterierte Szenarien (Alternativszenarien)
SEN	Szenarium der normalen Entwicklung (Referenzszenarium)
SEPA	Scottish Environment Protection Agency
SF	Sicherheitsfunktion
SF	Safety Fundamentals

SK	Systemkomponente
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company
SRL	Safety Reference Level
SSG	Specific Safety Guides
SSM	Swedish Radiation Safety Authority
SSR	Specific Safety Requirements
STUK	Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority
TECDOC	Technical Document
VerSi	Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Darstellung und Einteilung von Szenarien /GRS 16/	6
Abb. 2.2	Vorgehen der Szenarientwicklung in Frankreich /AND 05c/	9
Abb. 2.3	Endlagerbeeinflussende Faktoren in der Methodik von Kanada /NUC 12/11	
Abb. 2.4	Tabellarische Übersicht der Szenarientwicklung Schwedens.....	13
Abb. 2.5	Klassifikation der Szenarien gemäß der finnischen Richtlinien /POS 12a/15	
Abb. 2.6	Aufbau der Szenarientwicklung in der Schweiz /JOH 02/	16
Abb. 3.1	Methodische Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien unter Berücksichtigung von Sicherheitsfunktionen gemäß /BEU 10/	20
Abb. 3.2	Sicherheitsfunktionen bezogen auf die Sicherheitsbehälter /SKB 11a/	33
Abb. 3.3	Sicherheitsfunktionen bezogen auf die Rückhaltung /SKB 11a/	34
Abb. 3.4	Szenarientwicklung mithilfe der Sicherheitsfunktionen /SKB 06/, /SKB 11c/	36
Abb. 3.5	Zugeordnete Sicherheitsfunktionen zu den Barrieren (EBS Komponenten und Wirtsgestein) im KBS-3V Endlager (entnommen aus /POS 12a/)	40
Abb. 3.6	Binäre Kombinationsvarianten von Szenarien /POS 12a/	41
Abb. 4.1	Ansatz zur Behandlung von HI (entnommen aus /SEPA 16/)	56
Abb. 4.2	Entwicklungsphasen des Endlagers und relevante Aufsicht-Perioden (entnommen aus /WEI 13/)	62
Abb. 4.3	Darstellung der durchzuführenden Arbeitsschritte hinsichtlich der Untersuchung des menschlichen Eindringens in ein Endlager /BEU 12a/	69

Abb. 4.4	Schematische Darstellung des Ansatzes zur Behandlung von HI /IAEA 16/	71
Abb. 4.5	Darstellung des Ablaufes zur Ableitung von Schutzmaßnahmen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager /IAEA 16/	72
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der wesentlichen Elemente für die Analyse und zusätzlicher Betrachtungen /IAEA 16/.....	75

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Sicherheitsfunktionen und Endlagerkomponenten im Konzept von Frankreich /AND 05c/	28
----------	---	----

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

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

Forschungszentrum
Boltzmannstraße 14
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