

**Vorgehensweise bei der
Szenarientwicklung
in der Nachverschluss-
phase von Endlagern
in tiefen geologischen
Formationen**

Vorgehensweise bei der Szenarientwicklung in der Nachverschluss- phase von Endlagern in tiefen geologischen Formationen

Bericht zum Arbeitspaket 1

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

Stephan Uhlmann

September 2016

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrun-
de liegende FE-Vorhaben
wurde mit Mitteln des Bun-
desministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktor-
sicherheit unter dem Kennzei-
chen 3615103240 durchgeführt.

Die Verantwortung für den In-
halt dieser Veröffentlichung
liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung
und Meinung des Auftragneh-
mers wieder und muss nicht
mit der Meinung des Auftrag-
gebers übereinstimmen.

Deskriptoren:

Szenarientwicklung, Störfallanalyse, Ereignisanalyse, Störfallauswahl, Störfall, Endlager, Betriebsphase

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Szenarientwicklung bei der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern	5
2.1 Aktueller Stand und Zusammenfassung von Szenarientwicklungsmethoden	5
2.1.1 Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems.....	8
2.1.2 Ableitung von Szenarien	10
2.1.3 Einteilung von Ungewissheiten	16
2.1.4 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien	17
2.1.5 Umgang mit subjektiven Entscheidungen	19
2.1.6 Nutzung von FEP.....	19
2.2 EVEREST Projekt.....	21
2.2.1 Independent Initiating Events (IIE)	21
2.2.2 Probabilistic Safety Assessment (PROSA)	22
2.2.3 Transport Mechanism Methodology (T.M.M.).....	23
2.3 Szenarientwicklung Deutschland	24
2.3.1 Szenarientwicklung im Projekt ISIBEL	24
2.3.2 Szenarientwicklung im Projekt Vergleichende Sicherheitsanalyse (VerSi)	26
2.3.3 Szenarientwicklung im Projekt Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG).....	30
2.4 Szenarientwicklung Frankreich	35
2.5 Szenarientwicklung Belgien	38
2.6 Szenarientwicklung Schweden und Finnland	43
2.7 Szenarientwicklung Schweiz.....	58
2.8 Zusammenfassung der Entwicklung	60

3	Strukturen von FEP-Datenbanken	65
3.1	NEA-FEP-Datenbank.....	65
3.2	ISIBEL-Projekt FEP-Katalog.....	68
3.3	VerSi-Projekt FEP-Katalog.....	72
3.4	VSG-Projekt FEP-Katalog.....	73
3.5	SR-Site-FEP-Katalog (SKB).....	77
3.6	Zusammenfassung.....	80
4	Ansatz für Übertragung von Vorgehensweisen	83
4.1	Struktureller Aufbau (FEP).....	83
4.2	Herleitung von Sicherheitsfunktionen.....	87
5	Zusammenfassung	89
	Glossar	91
	Literaturverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis	103
	Abbildungsverzeichnis	105
	Anhang A – Beispiele für FEP der Betriebsphase	108
	FEP „Förderturm“	108
	FEP „Erdbeben“	109
	FEP „Transport der Abfallbinde von über Tage nach unter Tage“	110

1 Einleitung und Zielsetzung

Dieser Bericht wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens 3615I03240 (Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Werkzeugen für Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise) erstellt. Er bezieht sich auf den AP1 des oben genannten Vorhabens. Eine Zielsetzung des AP1 ist es eine internationale Recherche von Szenarienentwicklungsmethoden für die Nachverschlussphase von Endlagern durchzuführen, die Ergebnisse der Recherche darzustellen und damit den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik zur Ableitung von Szenarien darzulegen. Darüber hinaus werden Struktur und Aufbau verschiedener FEP(Features, Events, Processes)-Datenbanken beschrieben und miteinander verglichen, um letztendlich eine Struktur für eine potenzielle FEP-Datenbank für die Betriebsphase auszuwählen. Außerdem ist eine erste Implementierung von allgemeinen betriebsspezifischen FEP angedacht.

Für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle wird international die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen favorisiert. Um die Sicherheit für ein Endlager und damit der Schutz von Mensch und Umwelt gegen die Auswirkungen eines Endlagers nachzuweisen, werden verschiedene Sicherheitsnachweise erbracht. Die Gesamtheit aller Sicherheitsnachweise wird als Safety Case bezeichnet /IAEA 12/. Der Safety Case beinhaltet alle wissenschaftlichen, technischen, administrativen und innerbetrieblichen Argumente und Nachweise, die die Sicherheit eines Endlagers belegen und damit die Erbringung eines umfangreichen Sicherheitsnachweises ermöglichen. Nach IAEA Guide SSG-23 /IAEA 12/ umfasst der Safety Case die Gesamtheit der wissenschaftlichen, technischen und administrativen Argumente, die zusammen mit Management Systemen den Nachweis über die Sicherheit eines Endlagers erbringen sollen. Diese Definition des Safety Case bezieht Endlager für alle Arten radioaktiver Abfälle und alle Endlagerphasen mit ein. Der Safety Case eines Endlagers umfasst demnach die Standort-eignung, die Anlagenauslegung, die Errichtung und den Betrieb der Anlage sowie die Störfallanalyse, die Verschlussphase und die Nachverschlussphase. Dazu gehört vor allem auch die Bewertung radiologischer Risiken /IAEA 12/. Das Ergebnis jeder Sicherheitsanalyse sind die aus den jeweiligen Szenarien folgenden, potenziellen, radiologischen Auswirkungen. Liegen die in den Sicherheitsanalysen ermittelten radiologischen Auswirkungen signifikant über den zulässigen Grenzwerten, müssen entsprechende Änderungen und Anpassungen am Endlagerdesign und der -auslegung vorgenommen werden. Auch unterhalb der radiologischen Grenzwerte sind die radiologi-

schen Auswirkungen so gering wie möglich zu halten (ALARA-Prinzip, §6 StrISchV /BUN 16/). Mit den implementierten Änderungen werden die Sicherheitsanalysen erneut durchgeführt um zu ermitteln, ob das ALARA-Prinzip sowie die radiologischen Grenzwerte eingehalten werden. Dieses Vorgehen wird als ein iterativer Prozess bezeichnet.

Störfallanalysen werden im Rahmen der Sicherheitsanalyse für die Betriebsphase durchgeführt und dienen dem Nachweis der Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für das Endlager Konrad in Deutschland, wurde eine Vorgehensweise für die Störfallanalyse entwickelt /GRÜ 86/ und wird seither in Deutschland praktiziert. Dazu gehört auch die Störfallanalyse, die nach der Wiedervereinigung Deutschlands für das Endlager Morsleben /BEI 91/ durchgeführt wurde und die Störfallanalyse, die für die ursprünglich geplante Stilllegung des Versuchsendlager ASSE II /MAR 08/ durchgeführt wurde.

Die Störfallanalyse besteht aus zwei Hauptschritten. Der erste Schritt der Störfallanalyse ist die Ereignisanalyse (Störfallauswahl). Für die Störfallauswahl wird das gesamte Endlagersystem auf potenzielle Störfälle hin untersucht (Screening). Der Hauptaugenmerk bei diesem Screening liegt auf dem Transportpfad der Abfallgebinde während des Einlagerungsbetriebs. Berücksichtigt werden mechanische und thermische Einflüsse auf das Abfallgebinde, die während des Betriebes des Endlagers eintreten könnten /HAR 15/. In einem zweiten Schritt werden die Störfälle aus dem Störfallspektrum aus Schritt eins bewertet. Dazu werden einzelne repräsentative Störfälle identifiziert und deren Auswirkungen ermittelt und bewertet.

Im Projekt ISIBEL /BUH 08/ aus dem Jahr 2008 wurde u. a. die betriebliche Sicherheit in einem geologischen Endlager in Salz betrachtet. Es wurde sich dazu an der Vorgehensweise der Analyse von Störfällen in Kernkraftwerken orientiert, indem versucht wurde das Prinzip des gestaffelten Sicherheitskonzepts, das bisher für Kernkraftwerke angewendet wurde, auf Endlager zu übertragen.

In den letzten Jahren hat im Bereich der Endlagerung eine intensive wissenschaftliche, politische und gesellschaftliche Diskussion stattgefunden. Insbesondere hat bei den Sicherheitsanalysen mit der zunehmenden Verbreitung des „Safety-Case-Gedankens“ eine Weiterentwicklung von Herangehensweise und Methodik stattgefunden /BFS 16/. Das Hauptaugenmerk bei der Durchführung eines Safety Case lag bisher meist auf der Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase, weil diese i. d. R für die Standort-

auswahl von Endlagern von Bedeutung ist, die meisten geologischen Endlagerprojekte weltweit sich noch in sehr frühen Phasen befinden und somit die Standortauswahl im Vordergrund stand. Gerade weil der Fokus bislang auf der Sicherheitsanalyse der Nachverschlussphase lag, lag auch der Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung bislang in diesen Bereich. Infolgedessen hat die Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase in den letzten zwei Jahrzehnten mehrere Entwicklungsstufen durchlaufen. Durch die Weiterentwicklung der weltweiten Endlagerprojekte rücken auch andere Sicherheitsanalysen zunehmend in den Focus. Erkennbar wurde dies vor allem als die IAEA im Rahmen des GEOSAF Projektes (International Project on Demonstration of the Operational and Long-Term Safety of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste) /GEO 11b/ eine Arbeitsgruppe für die betriebliche Sicherheit in geologischen Endlagern ins Leben gerufen hat. Der Focus der Arbeitsgruppe lag bei der Identifizierung von Störfällen für ein geologisches Endlager und das dazu genutzte methodische Vorgehen für die Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase. Als ein Ergebnis ging aus der Arbeitsgruppe hervor, dass die allgemeine methodische Vorgehensweise für die Störfallanalyse in kerntechnischen Anlagen prinzipiell auch für geologische Endlager zweckmäßig ist.

Dementsprechend soll die bisherige Vorgehensweise bei der Störfallanalyse methodisch weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, dass hierzu die methodischen Vorgehensweisen ausgewertet werden, in die bereits erhebliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten geflossen sind. Das Ziel der angestrebten Weiterentwicklung ist, dass ein höheres Maß an Vereinheitlichung bei der Vorgehensweise erreicht wird, was zu einer besseren Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise führen soll. Zudem soll die Methode strukturiert und modularisiert werden, damit es möglich ist bestimmte Betriebsabläufe bzw. Komponenten im Endlager auszutauschen und die Auswirkungen auf die Sicherheit zu ermitteln. Außerdem wird eine bessere Vergleichbarkeit zwischen Störfallanalysen für die Betriebsphase von unterschiedlichen Endlagern (bzgl. Endlagerkonzept und -standort) und deren Vorgehensweise erwartet. Es ist folglich angedacht die beiden Hauptschritte der Störfallanalyse folgendermaßen weiterzuentwickeln:

- **Störfallauswahl**

Für die Weiterentwicklung der methodischen Vorgehensweise der Störfallauswahl, soll die methodische Vorgehensweise der Szenarientwicklung für die Bewertung der Sicherheit der Nachverschlussphase analysiert werden. Es soll die Möglichkeit

der Übertragung dieser methodischen Vorgehensweisen in die Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase überprüft und ggf. umgesetzt werden.

- **Störfallbewertung**

Für die Weiterentwicklung der methodischen Vorgehensweise der Störfallbewertung, soll die methodische Vorgehensweise der Störfallanalyse für Kernkraftwerke betrachtet werden. Es soll die Möglichkeit der Übertragung dieser methodischen Vorgehensweisen in die Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase überprüft und ggf. umgesetzt werden.

In diesem Bericht werden ausschließlich die Ergebnisse der Recherche von Szenari-entwicklungsmethoden aus der Nachverschlussphase von Endlagern für den erste Punkt (Störfallauswahl) dargestellt.

Es ist geplant die Ergebnisse aus diesem Bericht im Vorhaben 3615E03230 (Bewertung der Methoden zur Durchführung und Analyse der Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise von Endlagern) im AP 5 miteinander zu vergleichen. Anschließend sollen die potenziell interessanten Einzelschritte der Szenari-entwicklung ausgewählt werden und in einer weiterentwickelten Methode zur Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase eines Endlagers zur Anwendung kommen.

2 Szenarientwicklung bei der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern

In diesem Kapitel wird der internationale Stand von W&T für die methodische Vorgehensweise bei der Szenarientwicklung im Rahmen der Bewertung der Sicherheit in der Nachverschlussphase von Endlagern dargelegt. Dazu wird zunächst in Kapitel 2.1 eine Zusammenfassung gegeben. In den folgenden Kapiteln 2.2 bis 2.7 wird die Entwicklung der Vorgehensweise bei der Szenarientwicklung im Rahmen der Bewertung der Sicherheit in der Nachverschlussphase von Endlagern anhand von chronologisch angeordneten nationalen und internationalen Projekten beschrieben. Kapitel 2.8 gibt eine Zusammenfassung dieser Entwicklung.

Szenarien sind Zukunftsbilder, die einen potenziellen Einfluss auf ein betrachtetes Objekt oder eine betrachtete Eigenschaft besitzen. Sie beschreiben mögliche Entwicklungen unter Einbeziehung von Erfahrungen und Kenntnissen. Diese Zukunftsbilder werden in der Szenarientwicklung wissenschaftlich begründet hergeleitet.

2.1 Aktueller Stand und Zusammenfassung von Szenarientwicklungsmethoden

Das MeSA Projekt (Methods for Safety Assessment for long-term safety of geological repositories for disposal of radioactive waste) /NEA 12/ hatte die Aufgabe, eine Zusammenfassung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik in Bezug auf die Sicherheitsbewertung der Langzeitsicherheit von geologischen Endlagern für radioaktive Abfälle zu erstellen. Damit handelt es sich um die Fortsetzung der 1991 erschienenen Broschüre "Review of Safety Assessment Methods" /NEA 91/ von der OECD/NEA. Im MeSA Projekt wurden u. a. auch Szenarientwicklungsmethoden aus verschiedenen Ländern (z. B. Frankreich, Belgien, Schweiz, Schweden und Finnland) dargestellt. Im Folgenden wird der Inhalt des MeSA-Berichtes in Bezug auf die Szenarientwicklung für die Bewertung der Sicherheit in der Nachverschlussphase von Endlagern dargestellt.

Die Sicherheitsbewertung für die Nachverschlussphase dient als eine Basis zur Festlegung von Annahmebedingungen für radioaktiven Abfall. Eine periodische Neubewertung und damit wiederholte Durchführung der Sicherheitsbewertung sollte während der Betriebszeit eines Endlagers durchgeführt werden, da es über den Zeitraum des Be-

triebs zu Änderungen oder neuen Erkenntnissen kommen kann, die einen Einfluss auf die Sicherheit eines Endlagers in der Nachverschlussphase haben können /NEA 12/.

Der Betrachtungszeitraum sollte von der Aufsichtsbehörde festgelegt werden. Vor allem für die zu betrachtenden geologischen Prozesse und beispielsweise die klimatischen Randbedingungen spielt der Betrachtungszeitraum eine wichtige Rolle. Der Betrachtungszeitraum für die Sicherheit der Nachverschlussphase liegt im Allgemeinen bei einer Million Jahren /NEA 12/.

In Abb. 2.1 ist das allgemeine Vorgehen bei der Erstellung eines Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase nach der Vorstellung der NEA im MeSA-Bericht /NEA 12/ dargestellt. Zur Orientierung welche Verbindungen (a - g) der Sicherheitsnachweis (Safety Case) in Abb. 2.1 besitzt, wird der Safety Case in Abb. 2.2 mit seinen Verbindungen gezeigt.

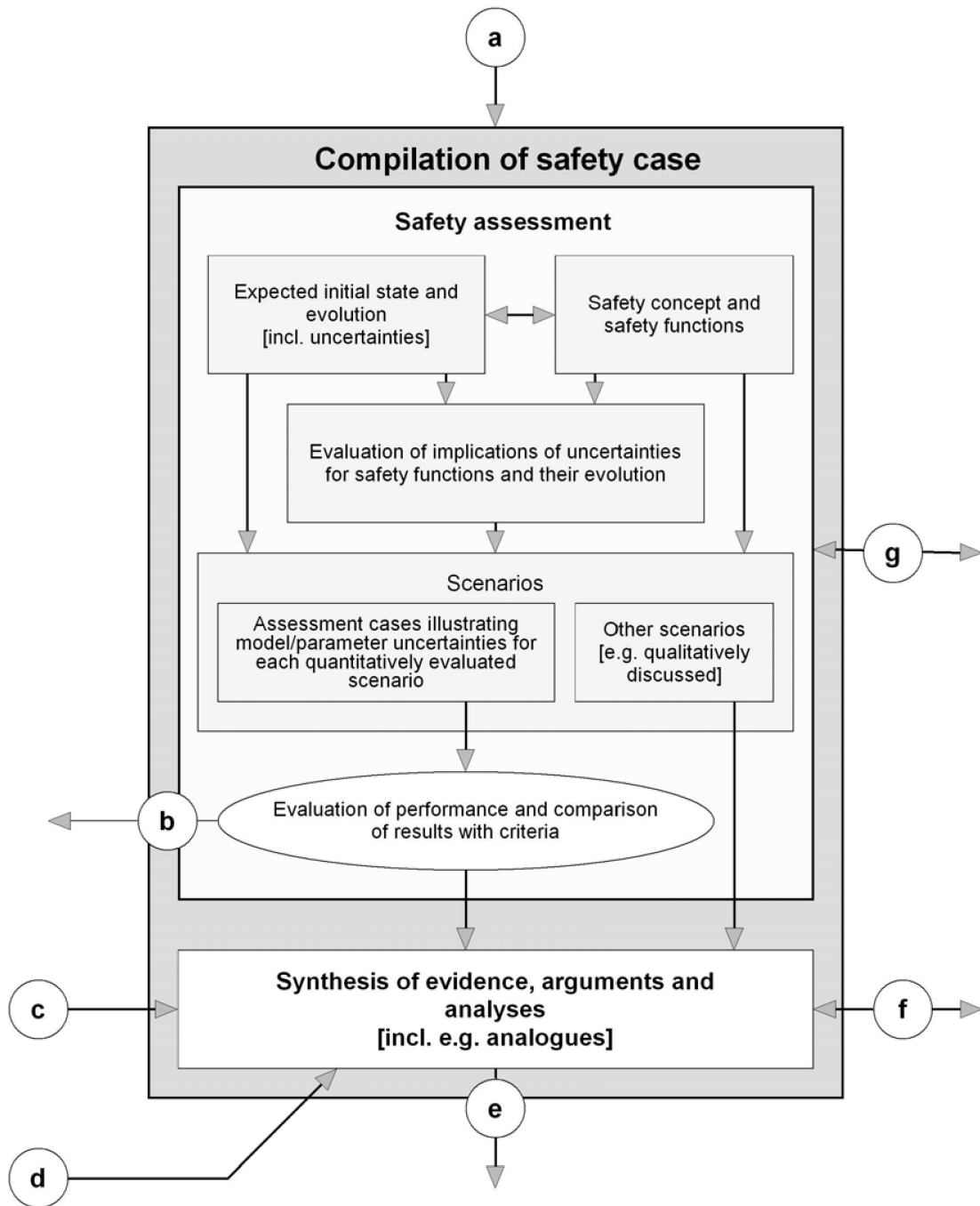


Abb. 2.1 Allgemeines Ablaufdiagramm zur Darstellung der Elemente und Verbindungen bei der Erstellung einer Sicherheitsbewertung /NEA 12/

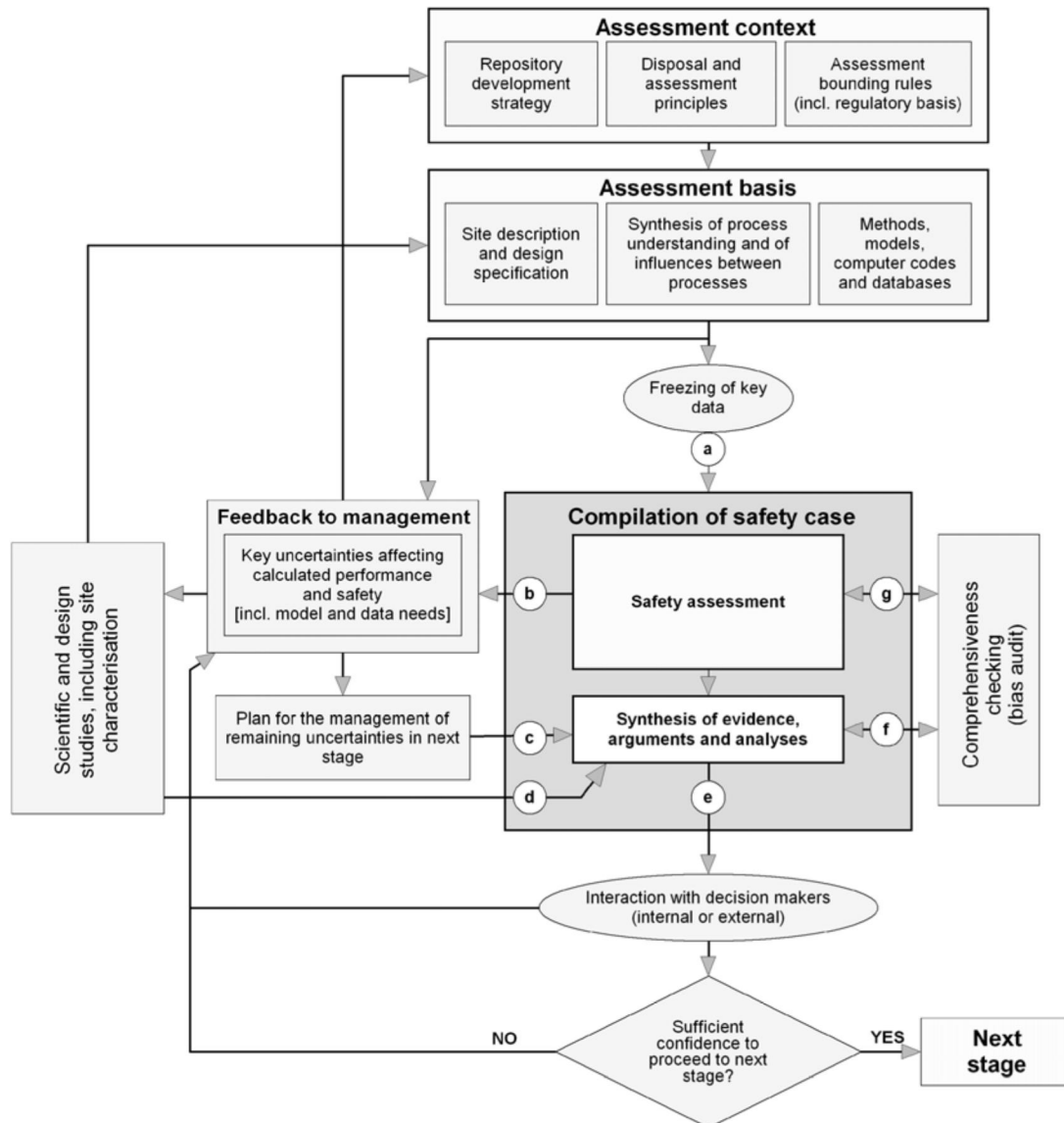


Abb. 2.2 Allgemeines Ablaufdiagramm zur Darstellung der Elemente und Verbindungen bei der Erstellung eines Safety Case /NEA 12/

2.1.1 Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems

Die Grundlage für die Ableitung von Szenarien stellt, unabhängig von der Vorgehensweise (Bottom-Up oder Top-Down), die Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems dar /NEA 12/.

Eine detaillierte Untersuchung und Beschreibung eines Endlagerstandortes (Standortcharakterisierung) wird als essenziell für den Ausgangspunkt einer Sicherheitsbewer-

tung für die Nachverschlussphase eines geologischen Endlagers angesehen. Die Beschreibung des Endlagersystems umfasst Informationen über den endzulagernden Abfall, die Standortcharakterisierung und die Beschreibung des geplanten Einschlusssystems (geologische Verhältnisse, natürliche und künstliche Barrieren und deren Funktionen) /NEA 12/.

Ausgehend von der Beschreibung des Endlagersystems (Ausgangszustand) wird die Entwicklung des Endlagersystems über den Nachweiszeitraum beschrieben. Bei der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems sind neben geologischen und klimatischen Prozessen (geowissenschaftliche Langzeitprognose) abhängig vom festgelegten Nachweiszeitraum auch alle denkbaren thermischen, hydraulischen, mechanischen, chemischen (THMC) Prozesse und Effekte zu berücksichtigen /NEA 12/.

Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung eines Endlagersystems wird das Aktualitätsprinzip angewendet, das besagt, dass die naturwissenschaftlichen Gesetze auch in Zukunft gültig sind und dass die daraus resultierenden Prozesse, in gleicher Weise wie in der Vergangenheit ablaufen werden. Zudem beinhaltet das Aktualitätsprinzip in Bezug auf die Langzeitsicherheit die Annahme, dass komplexe geologische und klimatische Prozesse, die in der Vergangenheit abgelaufen sind 1:1 in die Zukunft gespiegelt werden. Auf dieser Basis können bekannte vergangene Entwicklungen in die Zukunft extrapoliert werden, wodurch eine Abschätzung von zukünftigen Gegebenheiten möglich ist /MRU 11/.

Für die Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems kann zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden werden. Die Beschreibung unter Nutzung von THMC-Prozessen und die Beschreibung unter Nutzung von FEP (siehe z. B. Kapitel 2.3.3), wobei THMC-Prozesse auch in den FEP enthalten sind. Es handelt sich bei FEP aber um eine strukturiertere Form der Darstellung von THMC-Prozessen. Außerdem beinhalten FEP zusätzlich Merkmale und Ereignisse. Merkmale sind dabei in Bezug auf die Systemkomponenten des Endlagers zum Verschlusszeitpunkt des Endlagers zu verstehen (Ausgangszustand). Ereignisse und (THMC-)Prozesse hingegen beschreiben die erwartete Entwicklung des Endlagersystems ausgehend von dessen Ausgangszustand /BUH 08/. Beide Vorgehensweisen kommen zur Anwendung. Die Nutzung von FEP bringt dabei im Vergleich zu der Nutzung von THMC-Prozessen einige Vorteile mit sich.

Ein Vorteil der Nutzung von FEP ist die durch die Struktur einer FEP-Liste vereinfachte Überprüfbarkeit einer FEP-Liste auf die Vollständigkeit durch den Vergleich mit anderen FEP-Listen und/oder der internationalen NEA-FEP-Datenbank /NEA 12/.

Bei der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems ist das Auftreten von Ungewissheiten unausweichlich. Ungewissheiten beziehen sich immer auf die Entwicklung im Allgemeinen bzw. speziell auf einzelne Prozesse, Parameter, oder Randbedingungen die die Entwicklung beeinflussen. Diese Ungewissheiten, die bei der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems identifiziert werden, müssen analysiert, dokumentiert und im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz bewertet werden /NEA 12/.

Bei der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems sind grundsätzlich alle bekannten exogenen und endogenen Prozesse zu berücksichtigen. Die verschiedenen Projekte nutzen unterschiedliche Begriffe. FEP, Erscheinungen und THMC-Prozesse. FEP und Erscheinungen sollen beide allumfassende Begriffe sein die für die Szenarientwicklung benötigt werden. THMC-Prozesse hingegen beziehen sich nur auf die über den Nachweiszeitraum stattfindenden Prozesse, die einen Einfluss auf das Endlagersystem haben können.

2.1.2 Ableitung von Szenarien

Es wird zwischen zwei grundlegenden Ansätzen bei der Ableitung von Szenarien unterschieden. Dem Bottom-Up Ansatz und dem Top-Down Ansatz. Als Top-Down Ansatz wird die Ableitung von Szenarien ausgehend von Sicherheitsfunktionen bezeichnet. Andererseits bezeichnet der Bottom-Up Ansatz die Ableitung von Szenarien ausgehend von der Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems /NEA 12/. Siehe dazu Abb. 2.3. Im Folgenden werden beide Methoden beschrieben.

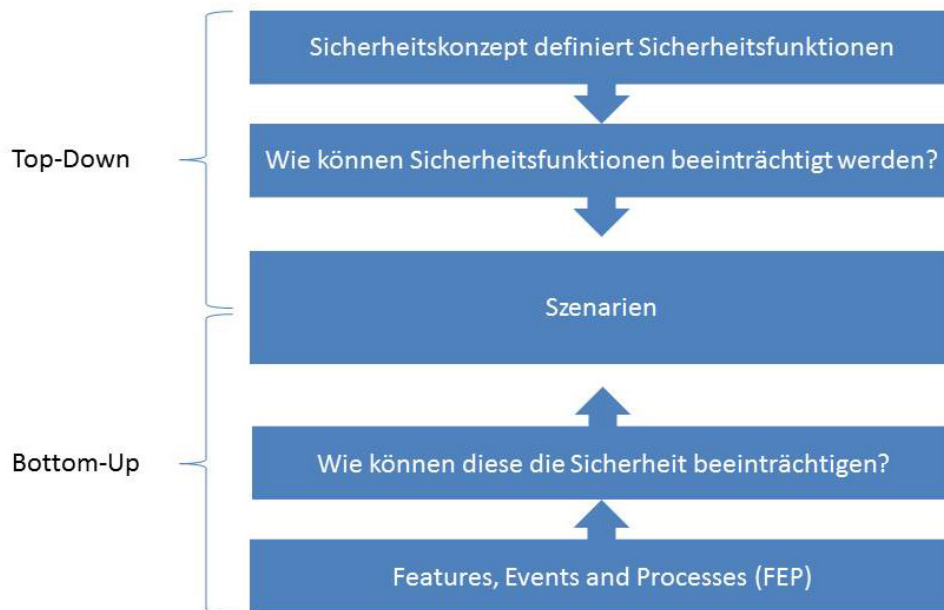


Abb. 2.3 Grafische Darstellung des Top-Down und des Bottom-Up Ansatzes zur Ableitung von Szenarien

Bottom-Up

Ausgehend von der Beschreibung des Ausgangszustandes und möglichen Entwicklungen des Endlagersystems wird die Entwicklung die als „am wahrscheinlichsten“ angesehen wird, für das Referenzszenario zugrunde gelegt. Die „weniger wahrscheinlichen“ Entwicklungen bilden die Grundlage für die Alternativszenarien /NEA 12/.

Die Ableitung von Szenarien nach dem Bottom-Up Ansatz kann durch diverse Hilfsmittel unterstützt werden. Es kommen z. B. Abhängigkeitsmatrizen, Einfluss-Diagrammen, Prozess-Ablauf-Diagrammen, Einfluss-Tabellen o. ä. (siehe auch Abb. 2.4) zum Einsatz, um Abhängigkeiten und gegenseitige Einflüsse unter den relevanten FEP darzustellen.

Unter Berücksichtigung von Ungewissheiten aus der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems und mithilfe der identifizierten Abhängigkeiten und Einflüsse zwischen den FEP, werden alternative Entwicklungen abgeleitet (Alternativszenarien) /NEA 12/.

Im EU-Projekt PAMINA /NEA 12/ wurde der Bottom-Up Ansatz in folgenden vier Punkten zusammengefasst:

- Sammeln von FEP

- relevante FEP festlegen
- Szenarien aus Kombination von FEP ableiten
- Gruppieren von Szenarien, um repräsentative Szenarien festzulegen

Top-Down

Der Top-Down Ansatz beginnt mit der Identifikation der Funktionen, die im gesamten Endlager zur Einhaltung des Sicherheitskonzepts dienen (sog. Sicherheitsfunktionen). Ein systematischer Ansatz zur Herleitung von Sicherheitsfunktionen ist in Abb. 2.14 dargestellt. Die übergeordneten Schutzziele werden mit weiteren Aussagen gestützt. Das kann in mehreren Ebenen geschehen. So werden Sicherheitsfunktionen in einer Ebene formuliert und eine Ebene tiefer werden spezifische Aussagen getroffen, durch welche Eigenschaften (z. B. einer Komponente) eine Sicherheitsfunktion erfüllt wird. Es werden THMC-Prozesse identifiziert, die einen Einfluss auf diese Sicherheitsfunktionen haben könnten. Diese relevanten THMC-Prozesse werden dann untersucht wie und in welchem Ausmaß diese Prozesse, während der Entwicklung des Endlagersystems, stattfinden können bzw. ausgelöst werden können /NEA 12/.

Der Zusammenhang zwischen den THMC-Prozessen und den Sicherheitsfunktionen wird analysiert. Für jede Sicherheitsfunktion werden die THMC-Prozesse untersucht, in wie weit sie die Sicherheitsfunktion beeinflussen können. Für diese Analyse werden verschiedene Methoden und Hilfsmittel, wie beispielsweise die QSA („qualitative safety analysis“ siehe Kapitel 2.4) von der französischen ANDRA, genutzt. Weitere Hilfsmittel die zur Analyse von Sicherheitsfunktionen genutzt werden sind in Abb. 2.4 dargestellt.

Der Top-Down Ansatz lässt sich in den folgenden fünf Punkten zusammenfassen:

- Identifizierung von Sicherheitsfunktionen
- Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Prozessen und erwarteter Entwicklung des Endlagersystems
- Untersuchung der Einflüsse von Prozessen auf Sicherheitsfunktionen
- Ableitung von Szenarien aus der erwartete Entwicklung und hiermit verbundenen Ungewissheiten
- Gruppieren von Szenarien um repräsentative Szenarien festzulegen

In den deutschen Projekten ist das Verständnis vom Top-Down Ansatz abweichend. Um nach dem Top-Down Ansatz Szenarien abzuleiten wird die Frage gestellt: „Wie können Lösungen mit dem Abfall in Kontakt treten?“ /BUH 10/. Daraufhin werden Szenarien vorgegeben und es wird analysiert, unter welchen Bedingungen diese Szenarien eintreten können.

Kombination

Beide Ansätze zur Ableitung von Szenarien („Bottom-Up“ und „Top-Down“) schließen sich nicht aus und kommen i. d. R. in Kombination zum Einsatz, wobei einem Ansatz meist eine primäre Rolle zukommt. Damit lassen Nachteile des einen Ansatzes mit den Vorteilen des anderen Ansatzes kompensieren /NEA 12/.

Der Verlauf in Abb. 2.1 von „expected initial state and evolution“ zu den „scenarios“ kann als die Bottom-Up Ansatz bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu stellt der Verlauf von „safety concept and safety functions“ zu den „scenarios“ den Top-Down Ansatz dar /NEA 12/.

Ein allgemein gültiger formaler Algorithmus zur Ableitung von Szenarien nach dem Top-Down oder Bottom-Up Prinzip existiert nicht und ist auch nicht möglich. Grund dafür sind mangelnde Kenntnisse zu bestimmten Phänomenen, komplex abzubildende Vorgänge und wechselwirkende, Einfluss nehmende Prozesse. Diese unterscheiden sich je nach Standort, Endlagerkonzept und Wirtsgestein.

Es werden zusätzlich Szenarien für zukünftige menschliche Handlungen erstellt. Dazu zählen Human Intrusion oder auch ein zurückgelassenes, nicht verschlossenes Endlager. Diese Szenarien zählen zu den stilisierten Szenarien, die nicht systematisch abgeleitet werden können. Angaben zu dem Umfang von stilisierten Szenarien sollten in Regelwerken verankert sein oder von der Behörde gemacht werden /NEA 12/.

Weiterhin werden Szenarien von möglichen Abweichungen und Fehleinschätzungen gegenüber dem definierten Ausgangspunkt der Nachverschlussphase im Rahmen der Betrachtung von sogenannten What-If-Cases gebildet. Die Betrachtung von What-If-Cases dient dem Nachweis der Robustheit eines Endlagers /NEA 12/. Beispielsweise wird der Ausfall bestimmter Sicherheitsfunktionen unterstellt, selbst wenn diese unwahrscheinlich sind oder gar ausgeschlossen werden können. Ereignisse, denen keine

Wahrscheinlichkeit zugewiesen werden können, werden ebenfalls im Rahmen von What-If-Cases betrachtet.

Die Abläufe die sich auf Grundlage der „wahrscheinlichsten“ erwarteten Entwicklung des Endlagersystems ergeben bilden das Referenzszenario. U. a. durch Parametervariationen, die sich aus den identifizierten Parameterunsicherheiten ergeben, werden alternative Abläufe und damit alternative Szenarien beschrieben /NEA 12/.

Für alle Szenarien wird untersucht in wie weit sich die ablaufenden Prozesse auf das Endlagersystem auswirken. Speziell wird analysiert, ob dadurch die (Sicherheits-)Funktionen von Barrieren beeinträchtigt werden können (Integritätsanalyse). Die Untersuchung der radiologischen Auswirkungen ist Gegenstand der Konsequenzenanalyse. Diese Untersuchungen werden mit Hilfe von Modellierungen durchgeführt.

In der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers in der Nachverschlussphase gibt es zwei unterschiedliche Verständnisse für ein Szenario. Die NEA versteht in /NEA 92/ unter einem Szenario eine Folge von Ereignissen mit all ihren verschiedenen Parametervariationen. Die Amerikaner (DOE) verstehen unter einem Szenario eine Folge von Ereignissen ohne Parametervariation. Jede Parametervariation erstellt ein neues Szenario. "Gleiche" Szenarien mit unterschiedlichen Parametern werden in Szenariengruppen zusammengefasst. Damit stellt eine Szenariengruppe aus dem letzteren Verständnis das gleiche dar, wie ein Szenario aus dem ersten Verständnis /NEA 12/.

Ein Nachweis der Vollständigkeit des Szenarienumfangs (d. h. alle relevanten Szenarien werden berücksichtigt) kann nicht erbracht werden.

Step/objective	Tool	Organisation
Developing system-specific understanding of processes and the interactions or influences between processes, including uncertainties	System-specific FEP databases	All
	FEP interaction matrices	SKB, DBE Tec/GRS/BGR, BfS, NUMO, JAEA
	Influence diagrams	Nagra, NUMO, JAEA
	Process diagrams, Influence tables	SKB
	Master directed diagram (MDD) (tree structure)	UK Nirex Limited/NDA
	Assessment Model Flowcharts (AMF)	SKB
Structuring description of initial state and subsequent evolution, including uncertainties	Phenomenological Analysis of the Repository System (PARS)/"situations"	Andra
	Storyboards	Ondraf/Niras, NUMO
	Timelines/subdivision of time frame	GRS, BfS, NDA, POSIVA, BGR, NRI
	Process reports	SKB
Step/objective	Tool	Organisation
Identifying which uncertainties in the initial state and subsequent evolution are safety relevant	Procedures to address (i) key contributors to the safety functions, (ii) perturbing phenomena and uncertainties, and (iii) system attributes giving robustness to these perturbing phenomena and uncertainties. In the case of Andra, this is termed "qualitative safety analysis (QSA)"	Andra
		Nagra
	Phenomenological description of disposal system	BfS
	Safety concept / safety statements	Ondraf/Niras
	Safety functions, safety function indicators and criteria, performance targets and associated criteria, FEP charts	SKB, Posiva
	Sensitivity analysis	All
	Function analysis	GRS
	Table and graphics (safety function vs. time and component)	NUMO
Ensuring all potentially relevant FEPs taken into account in the above steps	International FEP databases	All

Abb. 2.4 Beispiele für Hilfsmittel, die bei der Identifizierung sicherheitsrelevanter Prozesse und Ungewissheiten in den verschiedenen Ländern zum Einsatz kommen /NEA 12/

SKB (Schweden) und Posiva (Finnland) nutzen teilweise abweichende Sicherheitsindikatoren, die sich von den üblichen (Strahlendosis für die Umwelt und den Menschen) unterscheiden. Es handelt sich dabei bspw. um die Dichte des Bentonit-Versatzes (Bereich um den Abfallbehälter, der mit Bentonit verfüllt wird), die als Sicherheitsindikator verwendet wird. Inwiefern die Indikatoren, für die Erfüllung von Sicherheitsfunktionen,

auf andere Endlagerkonzepte und andere Wirtsgesteine übertragen werden können, sollte geprüft werden. Wenn dieses Konzept auf verschiedene Wirtsgesteine angewendet werden könnte, wäre das eine Weiterentwicklung der „Safety Statement“ Methode der belgischen ONDRAF/NIRAS (siehe Abb. 2.14) /NEA 12/.

2.1.3 Einteilung von Ungewissheiten

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Ungewissheiten einzuteilen. Eine Einteilung kann zunächst in sicherheitsrelevant und nicht sicherheitsrelevant erfolgen, wobei sicherheitsrelevante Ungewissheiten in Szenarien-, Modell- und Parameterunsicherheiten weiter unterteilt werden können. Außerdem können Unsicherheiten in epistemische und aleatorische Ungewissheiten eingeteilt werden. Epistemische Ungewissheiten sind solche, die man durch zusätzliche Forschung reduzieren kann. Aleatorische Ungewissheiten sind solche, die sich von Natur aus zufällig ergeben und somit nicht reduziert werden können. Diese Einteilung wird als klassische Einteilung von Ungewissheiten angesehen /NEA 12/.

Es gibt weiter Möglichkeiten zu Einteilungen von Ungewissheiten (/NEA 12/):

- extrapolierte Ungewissheiten
Ungewissheiten, die auf räumlich und zeitlich begrenzten Beobachtungen und Experimenten beruhen und auf das Endlagersystem, mit größeren räumlichen und zeitlichen Spannen, übertragen werden
- transferierte Ungewissheiten
Ungewissheiten, die sich auf Eigenschaften des Wirtsgesteins beziehen, die von bestimmten untersuchten Orten auf einen größeren Bereich angewendet werden
- sich entwickelnde Ungewissheiten
Ungewissheiten über langwierige Prozesse, die sich auf Daten stützen welche durch vergleichsweise kurzzeitige Experimente gewonnen wurden (z. B. Auswirkungen auf die Eigenschaften von Ton durch thermischen Einfluss)

Ungewissheiten werden oftmals durch *Expert Judgement* identifiziert und quantifiziert (siehe auch 2.1.4) /NEA 12/. *Expert Judgement* ist die Nutzung von Einschätzungen und Entscheidungen, die auf Grundlage von subjektiven Meinungen von Spezialisten gebildet werden (siehe auch 2.1.5).

2.1.4 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien

Die Angaben von Eintrittswahrscheinlichkeiten sind in dieser Hinsicht sowohl qualitativ als auch quantitativ möglich. Eine Einteilung in die Klasse „wahrscheinlich“ wird für Szenarien durchgeführt die im Rahmen einer „normalen“ Entwicklung (Referenzszenario) erwartet werden. Eine Herausforderung ist der Nachweis, dass das Referenzszenario wirklich das wahrscheinlichste Szenario ist, bzw., dass die Alternativszenarien, die sich durch weniger wirksame Sicherheitsfunktionen auszeichnen, weniger wahrscheinlich sind /NEA 12/.

Es gibt auch risikobasierte Anforderungen von Behörden. Dabei können höhere Auswirkungen von einem Szenario durch eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios kompensiert werden. Das DOE beispielsweise berechnet das jährliche Risiko für von auslösenden Ereignissen ausgelöste Szenarien mit dem Integral aus den Konsequenzen aller Ereignisse multipliziert mit der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung aller Ereignisse /NEA 12/.

Die Festlegung von Eintrittswahrscheinlichkeiten für Szenarien ist mit Hinblick auf den langen Bewertungszeitraum keine leichte Aufgabe. Das Problem stellt die Datenbasis zur Ableitung von quantitativen Eintrittswahrscheinlichkeiten dar. Es werden beispielsweise Statistiken für Erdbeben, Erkennungsgenauigkeiten von szenarienauslösenden Eigenschaften und statistisch basierte Herstellungsgenauigkeiten als Grundlage benutzt. Für Erdbeben müssen die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume der Statistik (einige zehner bis hunderter Jahre) und der Nachverschlussphase (eine Million Jahre) berücksichtigt werden. Statistiken für Herstellungsgenauigkeiten für z. B. Endlagerbehälter können bei einem Vergleich von Ergebnissen aus zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfungen, die auch im Rahmen späterer Qualitätssicherungsmaßnahmen durchgeführt werden, ermittelt werden. Eine Möglichkeit Eintrittswahrscheinlichkeiten für unentdeckte Störungen im Gestein zu bestimmen, ist die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten durch Berücksichtigung der Auflösung von geophysikalischen Untersuchungsmethoden /NEA 12/.

Oftmals werden Eintrittswahrscheinlichkeiten für Szenarien auf der Basis von *Expert Judgement* bestimmt. Eintrittswahrscheinlichkeiten die so festgelegt werden, repräsentieren den sogenannten „Degree of Belief“ /NEA 12/. Dabei handelt es sich um eine Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffs als Grad persönlicher Überzeugung (Bayesscher Wahrscheinlichkeitsbegriff). Dieser kommt zur Anwendung, wenn es kei-

ne Möglichkeit gibt über Daten und Statistiken eine Wahrscheinlichkeit zu ermitteln (Objektivistischer Wahrscheinlichkeitsbegriff). *Expert Judgement* und der „Degree of Belief“ hängen immer mit mehr oder weniger subjektiven Entscheidungen zusammen. Siehe dazu auch Kapitel 2.1.5.

Im VSG Projekt (siehe Kapitel 2.3.3) wurden die Eintrittswahrscheinlichkeiten etwas differenzierter ermittelt. Es wurden keine Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Szenarien direkt ermittelt. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten wurden bereits für jedes FEP festgelegt. Zusätzlich wurden auch für verschiedene Ausprägungen von FEP die Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Damit wird die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten, im Verhältnis zu anderen Vorgehensweisen in der Szenarientwicklung, auf einer früheren Ebene und damit auch zu einem früheren Zeitpunkt in der Szenarientwicklung durchgeführt.

Es gibt somit folgende Möglichkeiten Eintrittswahrscheinlichkeiten für Szenarien bzw. FEP zu bestimmen:

- durch Betrachtung vergangener Ereignisse und Gegebenheiten
- durch Stichprobenahmen eines physikalischen Systems mit Monte Carlo Simulationen
- durch Nutzung von Wahrscheinlichkeitsmodellen (z. B. Poissonverteilung)
- durch Nutzung von *Expert Judgement*, idealerweise unter Nutzung eines gut entwickelten Expertenauswahlprozesses. Dies ist von besonderem Interesse, wenn wenige Basisdaten zur Verfügung stehen bzw. wenn die Abhängigkeit des Safety Case von einer zu bestimmenden Eintrittswahrscheinlichkeit sehr hoch ist (Sensitivität) /NEA 12/.

Eintrittswahrscheinlichkeiten werden oftmals überschätzt, indem eine Eintrittswahrscheinlichkeit mit dem Wert von eins (wahrscheinlich) angenommen wird, wenn sich die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien schwierig gestaltet. Es sollte jedoch bedacht werden, dass in solchen Fällen die Beiträge der entsprechenden Szenarien am berechneten Gesamtrisiko und deren Vergleich wenig oder keine Bedeutung haben, da bei diesen nur die Konsequenzen in das Gesamtrisiko eingehen, nicht aber realistische Eintrittswahrscheinlichkeiten /NEA 12/.

2.1.5 Umgang mit subjektiven Entscheidungen

Subjektive Entscheidungen sind in Form von *Expert Judgement* in der Szenarientwicklung (der Nachverschlussphase) nicht vermeidbar. Trotzdem sollten Subjektivitäten möglichst minimiert werden, indem mehrere unabhängig voneinander getroffene Entscheidungen von Wissenschaftlern aller relevanten Fachgebiete einbezogen und verglichen werden. Zusätzlich müssen Entscheidungen und insbesondere subjektive Entscheidungsvorgänge detailliert Dokumentiert werden, um eine hohes Maß an Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten.

Die Nagra schlägt folgende Prinzipien bei der Anwendung von *Expert Judgement* vor (/JOH 02/):

- Berücksichtigung von Wissenschaft und Technik aller Bereiche
- alle für eine Entscheidung notwendigen Informationen müssen zugänglich sein
- Sicherstellung der Unbefangenheit
- Diskussion und Austausch zwischen mehreren Experten
- Überprüfung von Entscheidungen per *Expert Judgement*
- Übernahme von Verantwortung von Experten für Entscheidungen

2.1.6 Nutzung von FEP

Gerade in den Anfängen der Planung eines Endlagers haben sich FEP-Datenbanken als wertvolles Hilfsmittel erwiesen. FEP-Listen werden vor allem bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten für neue Endlagerstandorte erstellt (Analyse und Identifizierung von FEP) /NEA 12/.

Unterschieden werden muss zwischen standort- bzw. konzeptspezifischen FEP-Katalogen, die alle sicherheitsrelevanten Vorgänge und Erscheinungen umfassen und vom ganzheitlichen Verständnis des betrachteten Systems abgeleitet werden sowie den generischen FEP-Listen wie z. B. die NEA-FEP-Datenbank, die vermehrt zum Abgleich des Umfangs eines standort- bzw. konzeptspezifischen FEP-Kataloges genutzt wird /NEA 12/. Das Ziel der NEA-FEP-Datenbank ist es möglichst alle nationalen FEP-

Datenbanken in die NEA-FEP-Datenbank einzupflegen, um möglichst umfassend und vollständig zu sein.

In den deutschen Projekten spielt der FEP-Katalog eine zentrale Rolle bei der Ableitung von Szenarien.

Die drei Vorgehensweisen die im EVEREST-Projekt behandelt wurden nutzen alle FEP-Listen und *Expert Judgement* für die Auswahl von relevanten FEP. Ein wesentlicher Teil aller drei Vorgehensweisen ist die transparente und umfassende Dokumentation der gesamten Abläufe und des Umgangs mit den FEP /CAD 96/.

2.2 EVEREST Projekt

Das Everest Projekt wurde in den 90er Jahren von der Europäischen Kommission finanziert. EVEREST steht für „**E**valuation of **E**lements **R**esponsible for the effective **E**ngaged dose rates associated with the final **S**Storage of radioactive waste“. Das vorrangige Ziel dieses Projektes war es die quantitativen Auswirkungen variabler und ungewisser Eingangsparameter auf die Ergebnisse einer Langzeitsicherheitsanalyse für ein Endlager für hoch- und mittelradioaktive Abfälle zu bewerten /CAD 96/.

Im Bericht wurden drei verschiedene Vorgehensweisen zur Ableitung von Szenarien für die Nachverschlussphase eines Endlagers beschrieben. Als Ergebnis wurde für jedes Wirtsgestein (Ton, Granit und Salz) eine einheitliche Liste von Szenarien erstellt. Die beteiligten Institutionen haben versucht ihre Szenarientwicklungsmethoden so zu harmonisieren, dass unabhängig von der Vorgehensweise die gleichen Szenarien für ein bestimmtes Wirtsgestein resultieren /NEA 12/. Eine vollständige Harmonisierung der Methoden wäre im Rahmen des EVEREST-Projektes schwierig und möglicherweise auch nicht erstrebenswert gewesen. Vielmehr lieferte der Vergleich der durch unterschiedliche Verfahren erzielten Ergebnisse signifikante Hinweise auf die Sensitivität der jeweiligen Methode gegenüber dem erzielten Ergebnis /CAD 96/. Die drei Vorgehensweisen werden im Folgenden kurz dargestellt:

2.2.1 Independent Initiating Events (IIE)

Independent Initiating Events (IIE) wurden von der ANDRA für Granitformationen und von der IPSN (Institut de protection et de Sûreté nucléaire) für Tonstein-, Salz- und Granitformationen angewendet.

Zu Beginn wird eine Liste mit Ereignissen, die das Endlager und den eingelagerten Abfall beeinflussen können erstellt. Es werden natürliche und vom Menschen hervorgerufene Ereignisse berücksichtigt. Zu den natürlichen Ereignissen zählen z. B. lokale und globale Klimaveränderungen, tektonische Vorgänge, Diapirismus und Meteoriteneinschlag. Zu den vom Menschen ausgelösten Ereignissen zählen unentdeckte Merkmale des Wirtsgesteins und des Deckgebirges, Abdichtungsmängel, Human Intrusion, Sabotage, Krieg und der Treibhaus-Effekt.

Einige der aufgelisteten Ereignisse werden anhand von verbal argumentierten Plausibilitätsbetrachtungen aussortiert und damit im weiteren Vorgehen nicht weiter berücksichtigt /CAD 96/. So kann beispielsweise argumentiert werden, dass der Prozess „Konvergenz“ für das Wirtsgestein Granit nicht relevant ist und daher nicht betrachtet wird.

2.2.2 Probabilistic Safety Assessment (PROSA)

Probabilistic Safety Assessment (PROSA) kam bei der niederländischen ECN für einen flachen Salzstock und bei der belgischen SCK•CEN für eine Tonformation zum Einsatz. Die PROSA-Vorgehensweise folgt dem Top-Down Prinzip.

Der erste Schritt besteht aus der Erstellung eines FEP-Katalogs. Dabei werden FEP berücksichtigt, die potenzielle Auswirkungen auf das Verhalten des Endlagersystems haben und somit beispielsweise Abdichtfunktion von Barrieren beeinträchtigen können.

In einem zweiten Schritt werden für alle FEP unter Berücksichtigung des betrachteten Standortes Plausibilitätsbetrachtungen durchgeführt und nicht zu berücksichtigende FEP für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Dies geschieht mit FEP die beispielsweise für ein vorhandenes Wirtsgestein nicht relevant sind (z. B. Subrosion für das Wirtsgestein Ton). Zudem werden FEP mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten aussortiert.

In den folgenden Schritten wird die Anwendung der übrigen FEP für die Bereiche Nahfeld, Wirtsgestein, wasserführende Schichten und Biosphäre des Endlagersystems untersucht. Die Endlagerbereiche können Barrieren- oder Transportbereiche sein. Es werden die relevanten FEP aufgefunden, die die Funktion von Barrieren im Endlagersystem beeinträchtigen können. Die FEP werden klassifiziert in „primäre“ und „sekundäre“ FEP. Primäre FEP führen zu einem „überbrücken“ der Barriere eines Endlagerbereichs (Barrierenbereich). Sekundäre FEP haben lediglich eine Beeinflussung des Transportes von Radionukliden oder von Randbedingungen (Barrieren- und Transportbereiche) zur Folge. Damit ergeben sich für die drei Bereiche Nahfeld, Wirtsgestein und wasserführende Schichten nur zwei mögliche Zustände. Der Erste Zustand beschreibt die vollständige oder teilweise Aufrechterhaltung der Funktionen eines Bereichs. Der zweite Zustand beschreibt das Versagen der Funktion eines Bereichs. Durch die Kombination dieser Zustände der drei Bereiche ergeben sich acht mögliche

Anlagenzustände (siehe Abb. 2.5). Jedes dieser Anlagenzustände entspricht einer Kombination aller relevanten FEP und repräsentiert ein oder mehrere Szenarien. Diese Vorgehensweise setzt eine Dokumentation von Entscheidungsvorgängen, vorrangig beim Ausschluss von FEP, voraus /CAD 96/.

State	Near-field	Host rock	Aquifers Overburden
1	1	1	1
2	1	1	0
3	1	0	1
4	1	0	0
5	0	1	1
6	0	1	0
7	0	0	1
8	0	0	0

Abb. 2.5 Übersicht der Möglichen Zustände des Endlagersystems nach der PROSA Methode /CAD 96/

Tabelle mit der Angabe der Erfüllung der Funktion je Endlagerbereich durch „0“ für Funktion versagt und „1“ für Funktion erfüllt. Durch diese binäre Bewertung der Funktion ergeben sich 8 Anlagenzustände.

2.2.3 Transport Mechanism Methodology (T.M.M.)

Die Transport Mechanism Methodology (T.M.M.) wurde von der GRS für das in einem Salzstock liegende Forschungsbergwerk Gorleben angewendet.

Der Grundgedanke der Vorgehensweise ist, dass jede radiologische Auswirkung außerhalb des Endlagers mit einem Transportprozess im Zusammenhang steht, der die Verlagerung der Radionuklide bewirkt. Zu Transportprozessen im Salz zählen Konvektion, Diffusion, Subrosion, Diapirismus, direkte Freisetzung von Nukliden durch vulkanische Eruptionen und Meteoriteneinschlag /BEC 97/. Jedes Szenario ist aus einem oder mehreren Transportprozessen und den einflussnehmenden FEP, die zu potenziellen radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre führen können, abgeleitet.

Die Vorgehensweise besteht aus mehreren iterativen Schritten. Im ersten Schritt wird eine umfassende FEP-Liste mit relevanten FEP für den zu betrachtenden Standort erstellt. Der zweite Schritt umfasst eine Identifizierung aller potenziell für den Standort relevanten Transportprozesse. Anschließend erfolgt die Kombination der identifizierten

Transportprozesse mit den FEP, die in der Lage sind Barrieren im Endlagersystem zu beeinträchtigen. Dabei werden die Parameter entlang der möglichen Wege vom Abfallgebinde bis zur Biosphäre berücksichtigt. Jede Kombination ergibt ein Szenario.

Einige FEP werden aufgrund von sehr niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeiten oder geringen radiologischen Auswirkungen aus der Bewertung ausgeschlossen und nicht weiter betrachtet /CAD 96/.

2.3 Szenarienentwicklung Deutschland

2.3.1 Szenarienentwicklung im Projekt ISIBEL

Das Projekt ISIBEL hatte die Zielsetzung: „auf der Grundlage des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik eine systematische Bestandsaufnahme zur High-Active-Waste(HAW)-Endlagerung in Salzformationen vorzunehmen, um insbesondere zu untersuchen, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie zur Endlagersicherheit auf der Grundlage des erreichten Kenntnis- und Entwicklungsstandes geführt werden können und worin die Schwerpunkte zukünftiger FuE-Arbeiten bestehen“ /BUH 08/.

Es wurde erstmals ein Sicherheitsnachweiskonzept für HAW-Endlager im Steinsalz erstellt, welches das Konzept des sicheren Einschlusses der Radionuklide nutzt. Es wurde allerdings kein vollständiger Sicherheitsnachweis durchgeführt /BUH 08/. Aus diesem Grund wurde auch keine vollständige Szenarienentwicklung durchgeführt. Der methodische Ansatz ist aber erkennbar und wird im Folgenden beschrieben.

Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems

Die Beschreibung erfolgt mit Hilfe von FEP. Merkmale sind dabei in Bezug auf die Systemkomponenten des Endlagers zum Verschlusszeitpunkt des Endlagers zu verstehen (Ausgangszustand). Ereignisse und Prozesse hingegen beschreiben die erwartete Entwicklung des Endlagersystems ausgehend von dessen Ausgangszustand /BUH 08/.

Nutzung von FEP

Im Rahmen des ISIBEL-Projekts wurde erstmals in Deutschland ein umfangreicher FEP-Katalog für einen Endlagerstandort für abgebrannte Brennelemente und weitere hochradioaktive Abfälle in der norddeutschen Tiefebene am Beispiel des Standortes Gorleben erstellt. Bei der Erarbeitung des FEP-Kataloges wurden zwei verschiedene Herangehensweisen genutzt. FEP wurden zunächst durch die Fragestellung „Welche FEP einen Einfluss auf geologische Entwicklungen oder auf die Mobilisierung von Radionukliden haben können“ aufgestellt. Dieses Vorgehen wird als Bottom-Up-Ansatz bezeichnet. Mit einer weiteren Fragestellung: „Wie können Lösungen mit dem Abfall in Kontakt treten?“ konnten weitere FEP für den Standort aufgestellt werden. Diese Vorgehensweise wird als Top-Down-Ansatz bezeichnet /BUH 10/.

Ein FEP umfasst eine Kurzbeschreibung, die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit (wahrscheinlich, gering wahrscheinlich und äußerst gering wahrscheinlich), Einwirkungen auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren, Informationen und Beispiele, Sachlage und Auswirkungen im Endlagersystem, zeitliche Beschränkungen, direkte Abhängigkeiten, Handhabung bei den erwarteten Ausprägungen und Literaturquellen /BUH 10/.

Ableitung von Szenarien

Die Grundlage für das Referenzszenario ist die erwartete Entwicklung des Endlagersystems. Die erwartete Entwicklung beschreibt die wahrscheinlichsten Entwicklungen und nutzt daher nur die wahrscheinlichen FEP mit ihren wahrscheinlichen Ausprägungen. Ebenfalls gelten für das Referenzszenario gewisse Annahmen, wie:

- es treten keine Wegsamkeiten im Wirtsgestein auf,
- es gibt keine Lösungszutritt durch die geologische Barriere von außen,
- makroskopische Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein werden nicht angetroffen,
- alle Verschlussbauwerke funktionieren anforderungsgemäß,
- Eigenschaften der Verschlussbauwerke entsprechen den Planungswerten /BUH 08/.

Alternativszenarien wurden im ISIBEL-Projekt nur beispielhaft betrachtet. Dazu zählen:

- Versagen des Schachtverschlusses (nach 50 Jahren),

- Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen (nach 50 Jahren),
- gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse,
- sofortiger Zutritt von Lösungen aus begrenzten Lösungseinschlüssen im Wirtsgestein,
- Szenarien, in denen die vorstehenden Ereignisse miteinander kombiniert wurden /BUH 08/.

Obwohl keine vollständige Szenarientwicklung im ISIBEL-Projekt durchgeführt wurde, kann anhand der betrachteten Beispielszenarien die Ableitung von alternativen Szenarien wie folgt beschrieben werden. Alternative Szenarien werden erstellt, indem begründete Annahmen getroffen werden, die beinhalten, dass bestimmte sicherheitsrelevante Funktionen von Barrieren teilweise oder gar nicht erfüllt werden.

Zusätzlich werden nicht systematisch ableitbare Szenarien betrachtet. Es handelt sich um stilisierte Szenarien zu menschlichen Handlungen und sogenannte What-If-Cases. Beispielsweise der Ausfall einer Funktion von Barrieren ohne Angabe von Gründen für den Ausfall.

2.3.2 Szenarientwicklung im Projekt Vergleichende Sicherheitsanalyse (VerSi)

Das Projekt VerSi diente der Entwicklung einer Methode zur Ableitung von Szenarien für die Nachverschlussphase eines Endlagers in den Wirtsgesteinen Ton oder Salz. Dabei werden FEP und Sicherheitsfunktionen (SF) eingesetzt /BEU 10/.

In der entwickelten Methode im Projekt VerSi wird mit der Aufstellung von Systemkomponenten begonnen. Dafür wird das gesamte Endlager in Komponenten und Teilsysteme eingeteilt (siehe auch Abb. 2.6). Beispielsweise zählt das Abfallprodukt zu den Teilsystemen und enthält die beiden Komponenten Abfall und Fixierungsmatrix /BEU 10/.

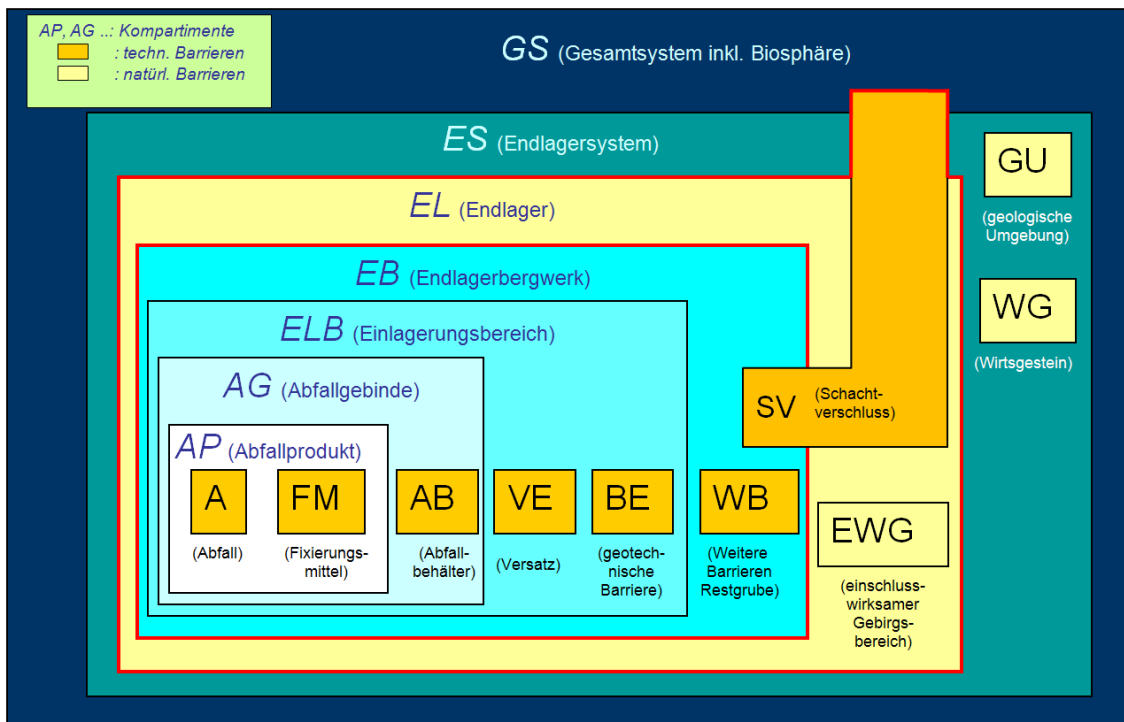


Abb. 2.6 Komponenten und Teilsysteme eines tiefen geologischen Endlagers mit Multibarrierenprinzip /BEU 10/

Jeder Systemkomponente werden sicherheitsgerichtete Eigenschaften und Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Somit hat z. B. die Systemkomponente „Abfallbehälter“ u. a. die sicherheitsgerichtete Eigenschaft „Isolation“ und diese erfüllt u.a. die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/ Verzögerung des Lösungszutritts“ /BEU 10/.

Im nächsten Schritt wird eine individuelle Basis (FEP-Datenbasis) für die FEP-Liste zusammengestellt. Dabei wird entweder auf eine bestehende Datenbasis (z. B. FEP-Datenbanken aus anderen Projekten) aufgebaut und unter Berücksichtigung externer FEP-Datenbanken (z. B. die NEA-FEP Datenbank) ergänzt oder es werden direkt externe FEP-Datenbanken zugrunde gelegt. Zusätzlich können Ergänzungen durch Eigenentwicklungen in die FEP-Datenbasis einfließen. Bei der Zusammenstellung der FEP-Datenbasis werden bereits offensichtlich nicht relevante FEP per *Expert Judgment* ausgeschlossen. Damit sind die übrig bleibenden FEP als „möglicherweise relevant“ einzustufen und bilden damit die FEP-Datenbasis für die FEP-Liste /BEU 10/.

In Form einer Matrix erfolgt danach eine Zuordnung der FEP aus der Datenbasis zu den im ersten Schritt aufgestellten Systemkomponenten. Dabei wird eine Wertung der Zuordnung vorgenommen, indem die Einflussnahme als „direkt“, „indirekt/nachrangig“ oder „nicht erkennbar aber nicht ausschließbar“ gekennzeichnet wird.

Als nächstes werden Sicherheitsfunktionen abgeleitet. Dabei wird zunächst eine Datengrundlage (Merkmale, Ereignisse und Prozesse) aus nationaler und internationaler Fachliteratur zusammengestellt. Außerdem können Eigenentwicklungen ergänzt (Merkmale, Ereignisse und Prozesse die bisher noch nicht berücksichtigt wurden) werden. Ausgehend von dieser Datengrundlage werden durch zusammenfassen redundanter Sicherheitsfunktionen und Festlegung relevanter Sicherheitsfunktionen die Sicherheitsfunktion-Datenbasis abgeleitet. Die Sicherheitsfunktionen werden nach ihrer Funktion (Radionuklidrückhaltung bzw. Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen) geordnet (Primär-Sicherheitsfunktionsgruppen). Sicherheitsfunktionen werden weiter nach ihren Anforderungen an die Systemkomponenten geordnet (Sekundär-Sicherheitsfunktionsgruppen). Siehe dazu Abb. 2.7. Die Sekundärgruppen werden anschließend den Systemkomponenten zugeordnet /BEU 10/.

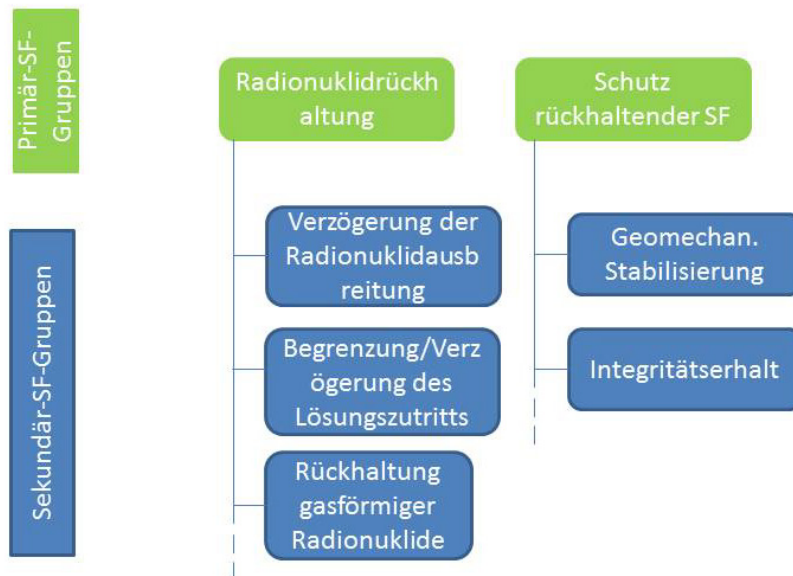


Abb. 2.7 Darstellung der Einteilung der Sicherheitsfunktionen in Primär- und Sekundärgruppen

Der nächste Schritt ist die Funktionsanalyse. Ziel der Funktionsanalyse ist es, die Einflüsse von FEP auf die Sicherheitsfunktionen zu untersuchen. Da die Verbindung von FEP zu Sicherheitsfunktionen indirekt über die Systemkomponenten und die sicherheitsgerichteten Eigenschaften bereits besteht, können die direkten Abhängigkeiten zwischen FEP und Sicherheitsfunktionen in einer weiteren Matrix dargestellt werden (siehe Abb. 2.8).

LFD_NR	GRS_FEP_NR	GRS_FEP_NAME	SK_NR 14	Sicherheitsfunktionen zum WG (Salzstandort)			
			WG	SF_4: Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Gebirgsspannungen	SF_8: Integritätschutz des ewG vor Erosion und Subrosion	SF_9: Begrenzung/Verzögerung des Lösungszutritts	SF_10: Rückhaltung gasförmiger Radionuklide
1	1_2_1	Kriechen des Gesteins	1	x		x	
2	1_2_3	Diapirismus, Halokinese, Salztektonik	1	x	x	x	
3	1_2_4	Aktivierung von Störungen (Verwerfungen)	1	x		x	
4	1_2_5	Bildung von Störungen (Verwerfungen)	1	x		x	
5	1_2_6	Rissbildung (Bildung von natürlichen Kluftsystemen)	1	x		x	
6	1_2_9	Gesteinsheterogenitäten	1	x		x	
7	1_2_12	Hebung und Absenkung (Subsidenz)	1	x		x	
8	1_2_13	Bildung von durchlässigen Diskontinuitäten	1	x		x	
9	1_2_16	Gesteinseigenschaften, Standorteigenschaften	1	x		x	
10	1_3_2	Klimatische Variabilität	2	x	x		
11	1_3_3	Extremer Niederschlag	2	x		x	
12	1_3_4	Kaltzeit (Glazial)	1	x		x	
13	1_3_5	Periglaziale Effekte (Permafrost)	1	x		x	
14	1_3_7	Änderungen des Meeresspiegels (Absenkung "Regression", Anstieg "Transgression")	2	x		x	
15	1_3_8	Änderungen im Grundwassersystem	2			x	
17	1_4_1	Rinnenbildung	1	x		x	
18	1_4_2	Chemische Alterung, Verwitterung	2		x		
21	1_4_5	Subrosion	1		x		
22	1_5_1	Änderungen des Flusslaufs, Wasserspiegel im See	2			x	

Abb. 2.8 Matrix zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen FEP und Sicherheitsfunktion /BEU 10/

Die FEP sind in den Zeilen angegeben und sind den Systemkomponenten und den Sicherheitsfunktionen, die in den Spalten angeordnet sind, zugeordnet auf die die FEP Auswirkungen besitzt. WG steht für Wirtsgestein.

Mithilfe dieser Verbindung ist die Analyse von Ausfällen bzw. Beeinträchtigungen von Sicherheitsfunktionen möglich. Dafür wird zunächst der Zweck der Sicherheitsfunktion hinterfragt. Beispielsweise ist der Zweck der Sicherheitsfunktion mit dem Namen „Begrenzung / Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG“ die Radionuklidrückhaltung durch Verhinderung bzw. Begrenzung des Übergangs von Lösungen vom WG (Wirtsgestein) zum ewG (Einschlusswirksamer Gebirgsbereich). Anschließend werden die Prozesse und Bedingungen aufgestellt, die zu Einschränkungen oder Außerkraftsetzung der Sicherheitsfunktion führen. Zuletzt werden die Einflüsse von FEP auf die Prozesse und Bedingungen diskutiert. Damit ergibt sich ausgehend von jeder Sicherheitsfunktion eine Kette, die über Prozesse und Eigenschaften zu den FEP führt /BEU 10/.

Da die Sicherheitsfunktionen bzw. Systemkomponenten nicht unabhängig voneinander sind werden die jeweiligen Beziehungen und Abhängigkeiten untereinander ebenfalls untersucht und mithilfe einer Matrix dargestellt. Bei der Untersuchung werden die Auswirkung von Ausfall oder Ausfällen auf die Abhängigkeiten analysiert und die Wirkungszeiträume der Beziehungen diskutiert /BEU 10/.

Für den letzten Schritt, dem Ableiten der Szenarien, werden die Ergebnisse aus der Funktionsanalyse zugrunde gelegt. Zusätzlich werden standortspezifische Eigenschaften und Rahmenbedingungen erst in diesem letzten Schritt berücksichtigt. Grund dafür ist die Zielsetzung des Projektes, die Anwendung der Methode für Ton- als auch für Salzstandorte zu ermöglichen. D. h. der letzte Schritt muss für jeden Standort gesondert durchgeführt werden. Um die Szenarien abzuleiten werden die Abläufe und Abhängigkeiten von FEP und Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung von standort-spezifischen Eigenschaften und festgelegten Randbedingungen betrachtet /BEU 10/.

2.3.3 Szenarientwicklung im Projekt Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG)

Im Projekt VSG war das Ziel eine methodische Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien der Nachverschlussphase für das Endlager Gorleben zu entwickeln. Dabei kommen u. a. FEP zum Einsatz /BEU 12/. In Abb. 2.9 ist die Szenarientwicklung im VSG-Projekt systematisch dargestellt.

Der FEP-Katalog bildet im VSG-Projekt das Bindeglied zwischen den Grundlagen (Standortbeschreibung, geowissenschaftliche Langzeitprognose und Abfallspezifikation), dem Endlagerkonzept und der Systemanalyse /WOL 12b/.

Anschließend folgt der zweite Schritt, das FEP-Screening. Dabei wird die im Schritt zuvor erarbeitete FEP-Datenbasis nach ausschließbaren FEP analysiert. Als Ausschlusskriterien dienen dabei regulatorischen Vorgaben (z. B. Betrachtungszeitraum / Nachweiszeitraum), die Standortauswahl (Standortgegebenheiten wie z. B. Wirtsgestein), das Endlagerdesign (z. B. Behälterauslegung, Anzahl der Schächte), extrem kleine Eintrittswahrscheinlichkeiten (kleiner 1 %) und vernachlässigbare Konsequenzen (Szenarien bei denen es zu keinen radiologischen Auswirkungen kommt) /BEU 12/.

Im dritten Schritt werden alle Barrieren im Endlager analysiert, um festzustellen, ob es sich um eine Initial-Barriere handelt oder nicht. Als Initiale-Barriere werden Barrieren im Endlager bezeichnet, die durch unterschiedliche Schutzfunktionen direkt oder indirekt zum sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beitragen /BEU 12/.

Der umfangreichste Schritt ist der vierte Schritt. Darin werden die Eigenschaften jedes FEP ausführlich beschrieben, beispielsweise die Angabe, ob es sich um eine Initial-FEP handelt oder nicht. Ein Initial-FEP ist ein FEP dessen Eintrittswahrscheinlichkeit wahrscheinlich ist und das einen direkten Einfluss auf eine Funktion einer Initialen Barriere hat. Diese ausführliche Beschreibung beinhaltet:

- Allgemeine Informationen
- Sachlage am Standort
- Auswirkungen am Standort
- Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit
- Ausprägungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten
- Angaben ob es sich um eine Initiale-FEP handelt

Direkte Abhängigkeiten (auslösende- und resultierende FEP sowie beeinflussende- und beeinflusste-FEP; siehe

Abb. 2.10)

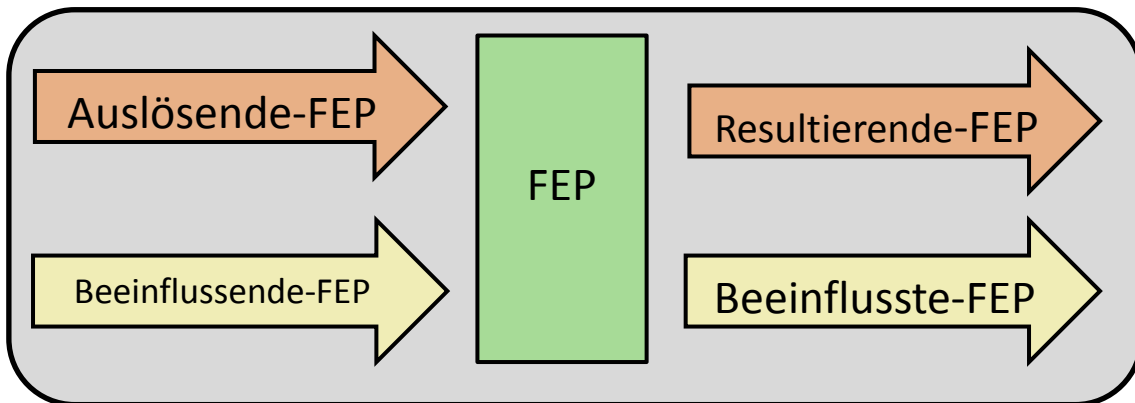


Abb. 2.10 Darstellung der direkten Abhängigkeiten von FEP

Diese komplexen Beschreibungen dienen im Folgenden fünften Schritt als Basis, anhand derer die Szenarien abgeleitet werden. Dazu werden zunächst die sogenannten Referenzszenarien abgeleitet. Referenzszenarien sind alle wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten (Initial-FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen, wahrscheinliche FEP für die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden mit wahrscheinlichen Ausprägungen und Berücksichtigung festgelegter Annahmen).

Wahrscheinliche Szenarien weisen eine Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 1 (100 %) und 0,1 (10 %), weniger wahrscheinliche Szenarien eine Eintrittswahrscheinlichkeit zwischen 0,1 (10 %) und 0,01 (1 %) auf. Szenarien werden als unwahrscheinlich eingestuft, wenn ihre Eintrittswahrscheinlichkeit unter 0,01 (1 %) liegt. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten werden in /BMU 10/ vorgegeben und beziehen sich immer auf den Betrachtungszeitraum der Nachverschlussphase.

Die zur Ableitung der Referenzszenarien benötigten Initial-FEP und die FEP für die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden werden dem FEP-Katalog entnommen. Um die wahrscheinlichen Ausprägungen der FEP für das Referenzszenarium festzulegen, werden diese unter Berücksichtigung auslösender- und beeinflussender-FEP diskutiert und individuell festgelegt. Spezifische Annahmen beinhalten festgelegte Randbedingungen, die für die Szenarienentwicklung benötigt werden. Dazu zählen die Auslegung von Komponenten (z. B. auslegungsgerechte Errichtung von Abdichtbauwerken), die Anordnung des Grubengebäudes (z. B. Abstände von Grubengebäuden) und die Klimaentwicklung /BEU 12/.

Die Alternativszenarien ergeben sich aus den Initial-FEP mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen, FEP für die Mobilisierung und den Transport von Radionukliden mit weniger wahrscheinlichen Ausprägungen und weniger wahrscheinlichen FEP mit wahrscheinlichen Ausprägungen. Außerdem werden Szenarien aus alternativen spezifischen Annahmen abgeleitet. Ein Beispiel für eine alternative spezifische Annahme ist die nicht auslegungsgerechte Errichtung von Abdichtbauwerken /BEU 12/.

Lediglich wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien werden im Langzeitsicherheitsnachweis betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit eines Szenarios ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit einer FEP und der Wahrscheinlichkeit der Ausprägung (siehe dazu auch Abb. 2.11) /BEU 12/.

Bei der Ableitung von alternativen Szenarien können sich qualitativ vergleichbare Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems in verschiedenen Alternativszenarien ergeben (z. B. Szenarien die sich nur in der Ausprägung unterscheiden). In einem solchen Fall können diese gleichartigen Szenarien zu abdeckenden Szenarien zusammengefasst werden /BEU 12/.

FEP (Initial-FEP, Radionuklid-Mobilisierung und Radionuklid-Transport sowie weniger wahrscheinliche FEP)				Mögliche Wahrscheinlichkeitsklassen der Szenarien		Szenarien
bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit		Ausprägung				
Einschätzung aus FEP-Katalog		Einschätzung unter Berücksichtigung von FEP Abhängigkeiten (s. Anhang A bzw. B)		wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	
wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich			
X		X		X		Referenzszenarium
X			X		X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen
	X	X			X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP
Einschätzung aus der jeweiligen Betrachtung der diskutierten Abweichung von der Annahme				X	X	Alternativszenarien aus alternativer Betrachtung von spezifischen Annahmen

Abb. 2.11 Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsklasse von Szenarien /BEU 12/

Nach diesem Schema wurde im VSG-Projekt die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios ermittelt. Abhängig von der Wahrscheinlichkeitsklasse (wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich) des FEP und der Ausprägung des FEP ergeben sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Szenario und demzufolge auch die Zuordnung zum Referenzszenario bzw. zu Alternativszenarien.

2.4 Szenarientwicklung Frankreich

Den Komponenten des Endlagers mit einer sicherheitskonzeptionell bedeutsamen Aufgabe (Wirtsgestein, Abfallbehälter, Bestandteile des Grubenbaus) werden Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Bei der Analyse der Komponenten des Endlagers werden ebenfalls Anforderungen an die Komponenten (Randbedingungen) formuliert und berücksichtigt. Diese können bei einer iterativen Durchführung angepasst werden (Optimierung). Diese Anforderungen betreffen beispielsweise Materialarten oder Abmessungen von Einlagerungsstollen. Sie werden unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit der Umwelt und möglichen Ungewissheiten festgelegt. Die Anforderungen werden dann in die Szenarien integriert und mit mehr oder weniger pessimistischen Berechnungsparametern bewertet /AND 05/.

Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems

ANDRA nutzt drei sich ergänzende Methoden um das Wissen bezüglich des Endlagerstandortes zusammenzufassen, um die zukünftige Entwicklung des Endlagers zu beschreiben und um mit Ungewissheiten im Zusammenhang mit der zukünftigen Entwicklung umzugehen:

- Es werden Dokumente für Einzelthemen (z. B. Wirtsgestein, Materialien usw.) erstellt und in Wissenssammlungen zusammengefasst. Diese stellen den Stand des Wissens und gleichzeitig auch die Wissenslücken dar. Die Wissenssammlung trägt damit zu einer Festlegung von Ursprüngen von Ungewissheiten bei und gibt Anhaltspunkte für Maßnahmen zur Reduzierung von Ungewissheiten.
- Mit PARS (phenomenological analysis of repository situations) wird die künftige Entwicklung des Endlagers beschrieben. Dabei werden thermische, mechanische, hydraulische, chemische und radiologische Prozesse (THMCR) sowie die daran gekoppelte Komponenten beschrieben. Dabei werden innerhalb des Nachweiszeitraums von einer Million Jahren für jeden relevanten Prozess Zeitabschnitte angegeben, in denen sie relevant sind (siehe Abb. 2.12). Auch das Endlagersystem wird in Untersysteme aufgeteilt. Die Entwicklung des Endlagers wird in „Situationen“ unterteilt. Eine Situation bezieht sich auf einen bestimmten Zeitabschnitt (zeitliche Diskretisierung) in der Entwicklung und auf ein bestimmtes Untersystem (örtliche Diskretisierung). Die Prozesse, die beteiligten Komponenten und die damit in Verbindung stehenden Modelle werden für jede Situation bewertet. Dabei werden

Kenntnisse und Ungewissheiten deutlich. Als Ergebnis gilt eine Liste von Ungewissheiten. Vervollständigt wird diese Methode mit einer groben Beschreibung der wesentlichen Prozesse, die die Entwicklung des Endlagers beherrschen.

- Um eine Nachvollziehbarkeit sicherzustellen und um zunehmend neuere Erkenntnisse für die Sicherheitsberechnungen leichter zu integrieren, werden letztendlich die Parameter, die Modelle oder Daten systematisch aufgelistet /AND 05/.

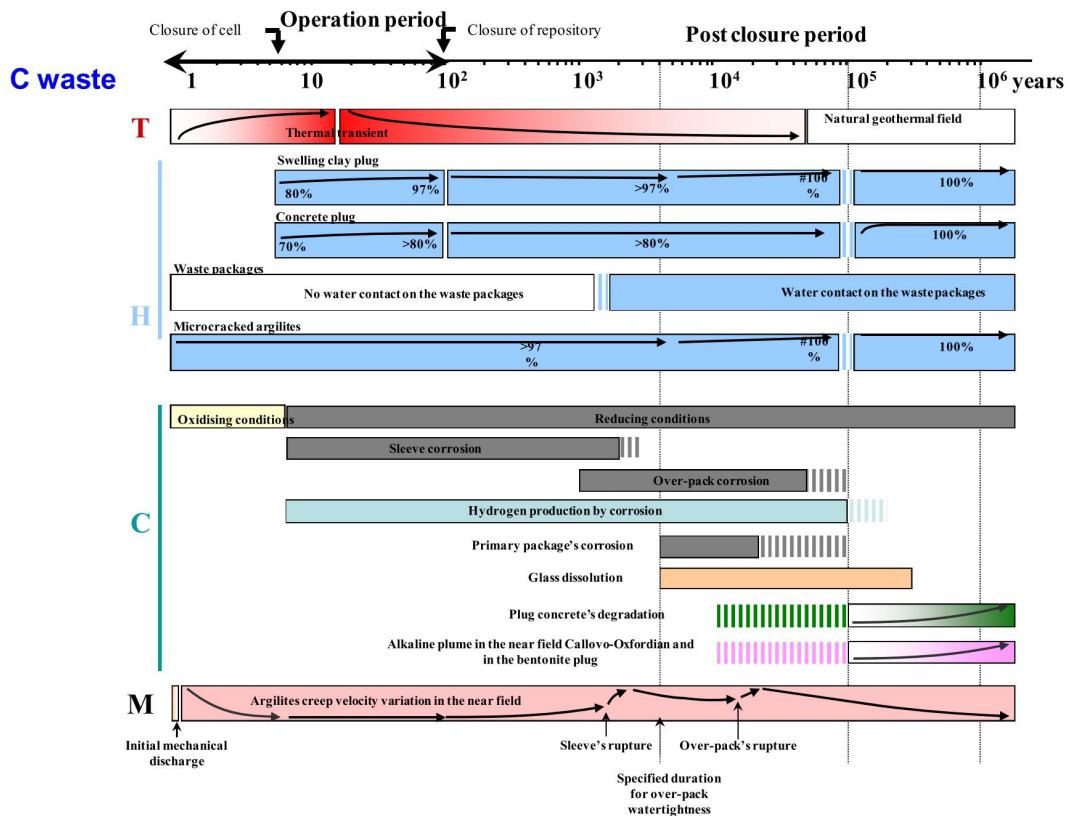


Abb. 2.12 Hochradioaktive, langlebige, verglaste Abfälle – Chronologische Entwicklung von THMC-Prozessen in der Nachverschlussphase /NEA 12/

Es sind die relevanten THMC-Prozesse im Endlager für hochradioaktive, langlebige, verglaste Abfälle über den Zeitraum des Betriebs und des Betrachtungszeitraumes der Nachverschlussphase dargestellt. Abgebildet sind auch die Verläufe der Ausprägungen dieser THMC-Prozesse über die Zeit. Manche Prozesse sind über den gesamten Zeitraum relevant (z. B. Mikrorisse im Ton), Andere hingegen nur ab (z. B. Wasserkontakt mit Abfallgebinde) oder bis (z. B. Wärmeerzeugung durch Abfälle) zu einem gewissen Zeitpunkt.

Ableitung von Szenarien

Durch die Kombination der Ergebnisse der PARS-Methode und der Annahme, dass alle Sicherheitsfunktionen entsprechend ihrer Auslegungsanforderung wirken, kann das „normal evolution scenario (SEN)“ gebildet werden /AND 05/.

Um alternative Szenarien abzuleiten wird die sogenannte „qualitative safety analysis“ (QSA) Methode angewendet. Die QSA bewertet die Ungewissheiten jeder einzelnen Komponente unter Berücksichtigung ihrer zugewiesenen Sicherheitsfunktionen. Es wird untersucht, ob Ungewissheiten bereits in der Auslegung des Endlagers berücksichtigt werden, um die Auswirkungen von Ungewissheiten zu reduzieren und ob sie im SEN berücksichtigt werden. Für die Ungewissheiten die nicht im SEN berücksichtigt werden, muss, z. B. mithilfe von Sensitivitätsanalyse, nachgewiesen werden, dass ihre Auswirkungen vernachlässigbar gering oder ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten hinreichend gering sind. Diese Ungewissheiten bilden die „altered evolution scenarios (SEA)“ /AND 05/.

Die Vollständigkeit der Szenarien und denen zugrundeliegenden Prozessen wird durch den Vergleich mit der internationalen NEA-FEP-Datenbank überprüft /AND 05/.

Außerdem wurden vier SEA entwickelt um ein Verständnis über die potenziellen Auswirkungen von unwahrscheinlichen Szenarien mit spezifischen Systemfehlern zu bekommen (What-If Cases) /NEA 12/. Beispielsweise wurden SEA gebildet in denen die Abfallbehälter als fehlerhaft angenommen wurden, einzelne oder alle Barrieren als defekt angenommen wurden sowie „Human Intrusion“ Szenarien. Mit diesen What-If Case Szenarien kann die Robustheit des gesamten Endlagersystems abgeschätzt werden /AND 05/.

Einteilung von Ungewissheiten

Ungewissheiten werden bei ANDRA abhängig von ihrem Ursprung eingeteilt. Es gibt folgende Kategorien:

- Ungewissheiten in Bezug auf Eingangsdaten, z. B. Abfallcharakterisierung,
- Ungewissheiten in Bezug auf Charakteristika von Komponenten,
- Ungewissheiten in Bezug auf entwicklungsbeeinflussende Prozesse,

- technische Ungewissheiten,
- externe Ereignisse.

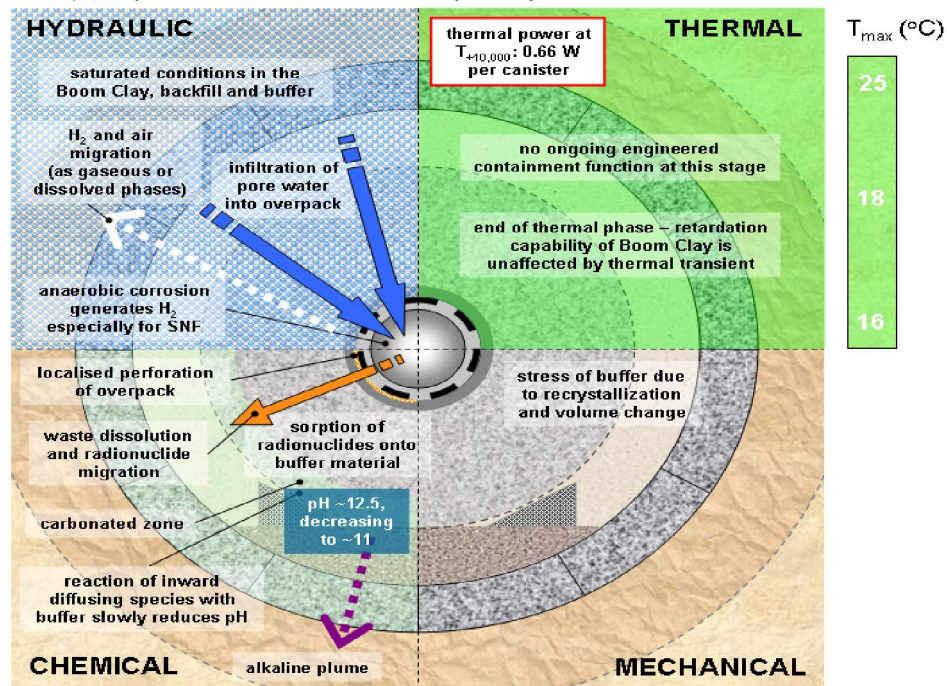
Diese Art der Einteilung von Ungewissheiten lenkt den Blick und damit die Diskussion von Experten auf die Frage: „Wie können Ungewissheiten entstehen?“ Außerdem kann die Gefahr, eine wichtige Ungewissheit zu übersehen, reduziert werden /NEA 12/.

2.5 Szenarientwicklung Belgien

Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung

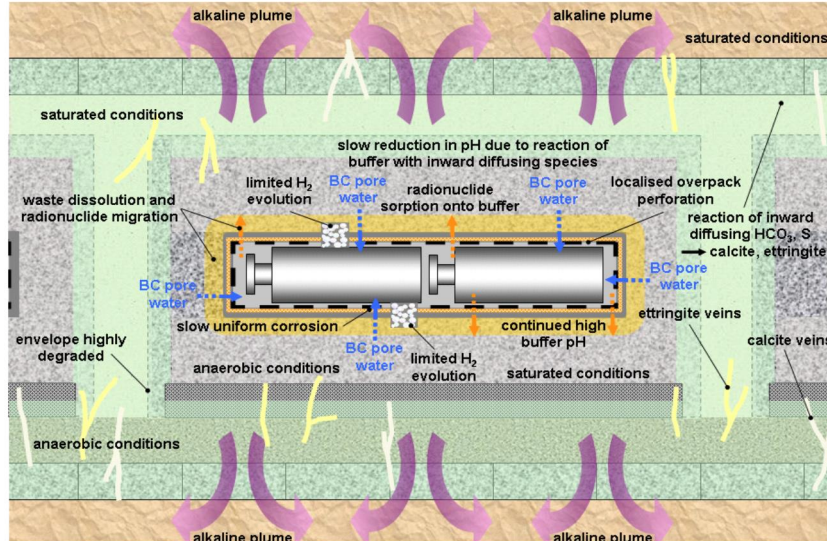
Die Methode, die zur Beschreibung der Entwicklung eines Endlagers von der belgischen ONDRAF/NIRAS angewendet wurde nutzt sogenannte „storyboards“. Um die Vielzahl von stattfindenden Prozessen zu strukturieren, werden die erwarteten Entwicklungen des EBS („Engineered Barrier System“) in zeitliche Abschnitte, mit zugehörigen THMC-Prozessen, aufgeteilt. Jeder zeitliche Abschnitt ist mit Prozessen und Ereignissen verknüpft. Diese aufeinanderfolgenden Entwicklungsetappen werden in Abbildungen dargestellt (siehe als Beispiel Abb. 2.13). Diese Darstellungen werden als „storyboards“ bezeichnet. Ein „storyboard“ bezieht sich auf einen Zeitabschnitt und umfasst zwei Abbildungen. Eine Abbildung stellt den Querschnitt und die andere den Längsschnitt des Einlagerungstunnels mit dem abfallumgebenden EBS dar. Es werden alle THMC-Prozesse für den jeweiligen Zeitabschnitt in den Abbildungen dargestellt /NEA 12/, /SMI 09a/.

T_{+10,000} (Initial failure of overpack)



Transverse cross-section through the disposal tunnel showing key processes occurring approximately 10 000 years after emplacement.

T_{+10,000} (Initial failure of overpack)



Longitudinal cross-section through the disposal tunnel showing key processes occurring approximately 10 000 years after emplacement.

Abb. 2.13 „Storyboards“ stellen Quer- und Längsschnitt des Endlagertunnels mit den auftretenden THMC-Prozessen dar /NEA 12/

Ableitung von Szenarien

Es wird eine hierarchische Darstellung (siehe Abb. 2.14) von Aussagen genutzt, um eine Verbindung von generellen Sicherheitsaussagen aus dem Sicherheitskonzept zu den individuellen Standortfakten und Komponenteneigenschaften herzustellen. Es gibt mehrere Ebenen. Sie werden i. d. R. in verschiedenen Farben dargestellt. Die oberste Ebene stellt die allgemeinen Sicherheitsaussagen aus dem Sicherheitskonzept bzw. belegbare Machbarkeitsaussagen bezüglich des Endlagerdesigns dar. Die nächste Ebene gibt Aussagen über den Mechanismus der Sicherheitsfunktionen (Isolation, Verzögerung, Verdünnung etc.). In der Ebene darunter werden die Sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Komponenten genannt, die zur Erfüllung der Sicherheitsfunktionen benötigt werden. Die unterste Ebene steht für die Standortfakten und die vorliegenden Eigenschaften am Endlagerstandort, die als Bewertungsgrundlage gelten. Jede Aussage aus einer untergeordneten Stufe stützt die Aussage in der darüber liegenden Stufe. Das Referenzszenario wird unter der Annahme gebildet, dass alle Sicherheitsaussagen erfüllt werden. Die in diesem Absatz beschriebene Vorgehensweise ist eine reine Top-Down-Vorgehensweise /NEA 12/, /SMI 09a/, /SMI 09b/.

Jede Aussage wird anhand von systematischen Ungewissheitsanalysen validiert, wobei die Auswirkungen von unvorteilhaften Eigenschaften und identifizierte Ungewissheiten berücksichtigt werden. Begonnen wird die systematische Validierung bei der untersten Ebene. Den Sicherheitsaussagen werden Annahmen aus dem Referenzszenario (siehe *Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung*), welche ebenfalls hierarchisch geordnet sind, zugeordnet. Dann wird untersucht, ob die identifizierten Ungewissheiten Einfluss auf die jeweiligen Annahmen haben. Somit wird für jede Annahme untersucht ob es Alternativen gibt. Wird eine Annahme als hinreichend gerechtfertigt angesehen, werden für die jeweilige Annahme keine alternativen Annahmen getroffen und es wird die nächste Annahme betrachtet. Werden Sicherheitsaussagen aus unteren Ebenen in Frage gestellt, so müssen die davon abhängigen Aussagen aus den darüber angeordneten Ebenen ebenfalls in Frage gestellt werden. Ungewissheiten können sich somit auf höhere Ebenen übertragen. Falls Ungewissheiten bis in die Ebene der Aussagen über die Sicherheitsfunktionen reichen, werden diese durch Alternativszenarien berücksichtigt. Ungewissheiten die sich nicht bis zur Ebene der Aussagen über die Sicherheitsfunktionen fortpflanzen, können trotzdem Prozesse und Parameter in Szenarien beeinflussen. Darum werden diese Ungewissheiten als Parameterunsicherheiten bezeichnet und weiterhin berücksichtigt. Die in diesem

Absatz beschriebene Vorgehensweise ist eine reine Bottom-Up-Vorgehensweise /NEA 12/, /SMI 09a/, /SMI 09b/.

Die Bewertung einzelner Aussagen bezüglich des Standes ihres Nachweises, wird mit Hilfe einer „Ampel“ dargestellt (siehe Abb. 2.14). Rot steht für einen noch zu erbringenden Nachweis, der wahrscheinlich nur mit Änderungen an geplanten Untersuchungen bzw. dem Endlagerdesign geführt werden kann. Gelb steht für einen noch im Rahmen von geplanten Untersuchungen zu erbringenden Nachweis. Grün steht für den vorhandenen Nachweis /SMI 09b/.

Ungewissheiten die sich bis in die obersten Ebenen übertragen sind besonders zu beachten, weil sie die grundsätzlichen Sicherheitsaussagen in Frage stellen. Um diese besonders zu beachtenden Ungewissheiten genauer zu bewerten, können Unsicherheitsberechnungen durchgeführt, qualitative Argumente gesammelt oder Berechnungen von Sicherheitsindikatoren wie Dosis und Risiko durchgeführt werden. Im Rahmen der Sicherheitsbewertung ist es wichtig, passende Berechnungsmethoden, die Aufschluss über eine Übertragung von Ungewissheiten von unteren Ebenen in die obersten Ebenen geben, zu entwickeln. Ungewissheiten die bis in die obersten Ebenen reichen, müssen mit Hilfe von Maßnahmen reduziert (durch Erweiterung der Bewertungsgrundlagen), ihre Auswirkungen minimiert oder gänzlich vermieden (z. B. durch Änderungen im Endlagerdesign) werden /SMI 09b/.

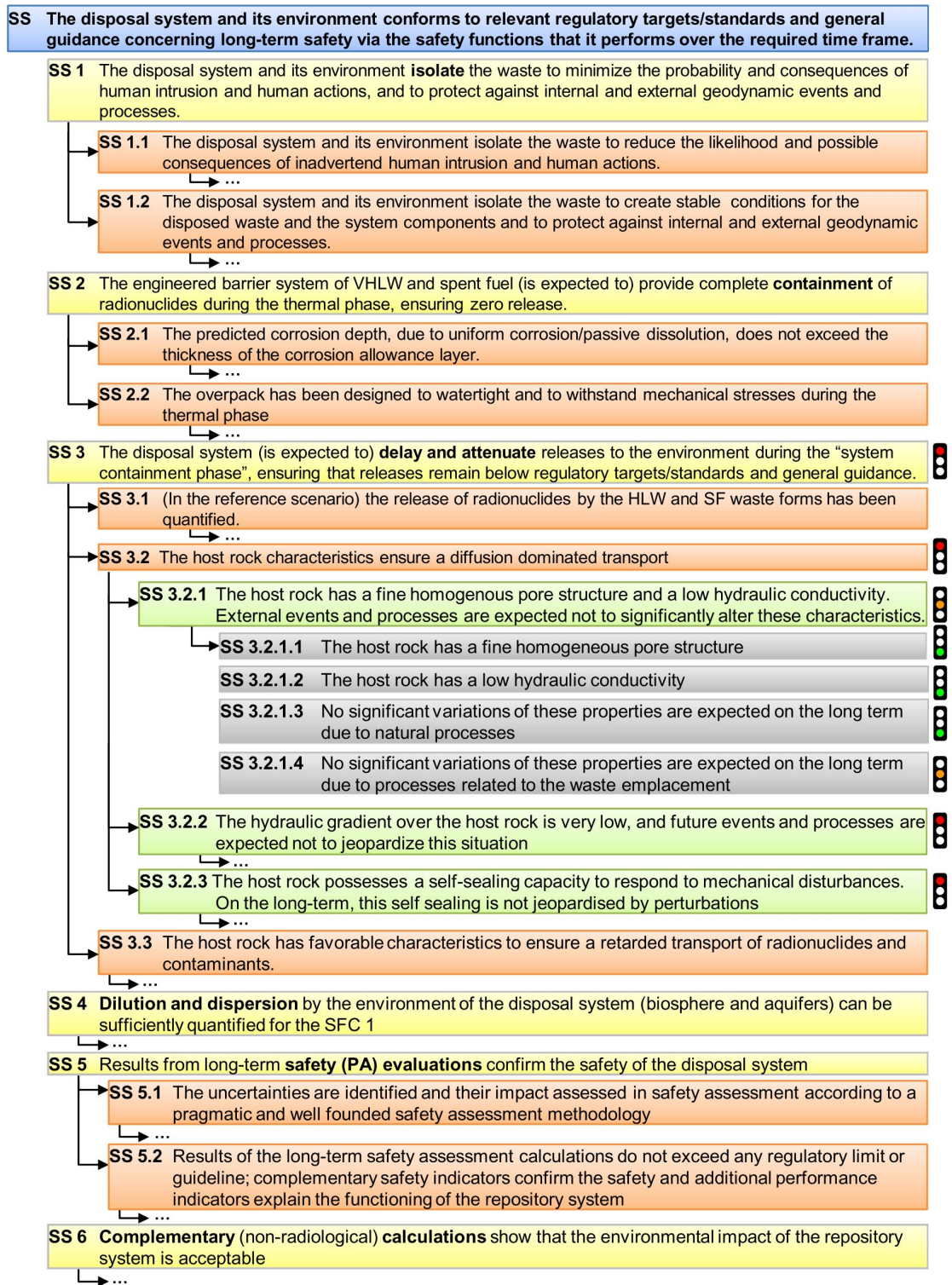


Abb. 2.14 Beispiel für die hierarchische Struktur der ONDRAF/NIRAS Sicherheitsaussagen /SMI 09b/

2.6 Szenarientwicklung Schweden und Finnland

Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung

Bei der Szenarientwicklung der schwedischen SKB wird zunächst der zum Verschlusszeitpunkt erwartete Ausgangszustand des Endlagersystems und des Endlagerstandortes definiert. Weiterführend wird eine Beschreibung der Entwicklung der externen Bedingungen erstellt. Dazu zählen die Klimaentwicklung, größere geologische Prozesse und Effekte, zukünftige menschliche Handlungen und andere (z. B. Meteoriteneinschlag) /SKB 06/.

Für die Beschreibung der Entwicklung des Endlagersystems sollen möglichst viele Prozesse berücksichtigt werden. Begonnen wird mit einer Zusammenstellung von Prozessen, die in einer vorhergehenden Sicherheitsbewertung berücksichtigt wurden. Zusätzlich wird die internationale NEA-FEP-Datenbank zum Abgleich herangezogen /SKB 06/.

Das Endlagersystem wird in Systemkomponenten eingeteilt. Jeder Komponente werden die Prozesse zugeteilt, die in Verbindung mit der jeweiligen Komponente eintreten können. Dabei werden auch Zeitbereiche angegeben, in denen Prozess in Verbindung mit der jeweiligen Komponente auftreten können /SKB 06/.

Die Prozesse werden anschließend in sogenannten „Prozess-Reports“ umfangreich dokumentiert. Für die Dokumentation werden folgende Hilfsmittel zur Veranschaulichung genutzt:

Prozessdiagramm

Zur Illustration der Verbindungen zwischen Prozessen und Parametern sowie, um festzustellen, ob und wie diese sich gegenseitig beeinflussen, werden sogenannten Prozessdiagramme (siehe Abb. 2.15) dargestellt. Für jede Komponente wird ein Prozessdiagramm erstellt. Es lassen sich so die einzelnen Prozesse in einer Komponente bzw. solche, die eine Komponente beeinflussen, erkennen. Die Art der Beeinflussung ist darüber hinaus dargestellt. Ebenso sind die Einflüsse auf bzw. von den benachbarten Komponenten abgebildet /SKB 06/.

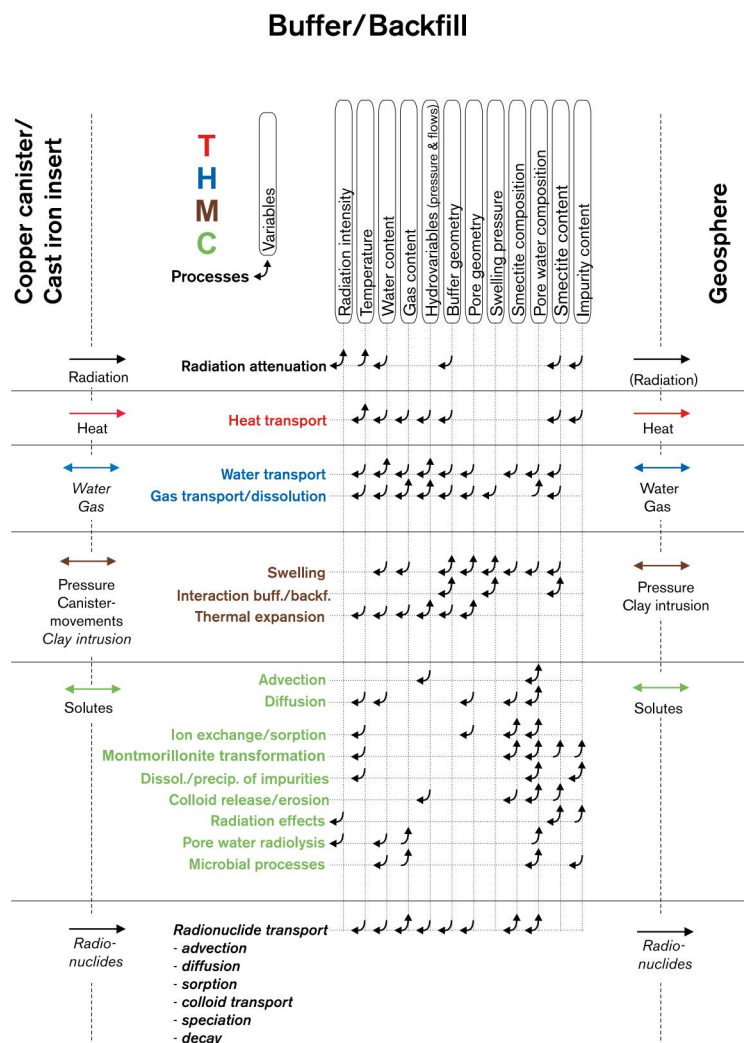


Abb. 2.15 Prozessdiagramm für die Systemkomponente „Buffer/Backfill“

THMC-Prozesse in der linken Spalte und variable Parameter sind in der ersten Zeile. Einflüsse sind mit Pfeilen dargestellt. Schräggedruckte Prozesse und deren Einwirkung entstehen nur bei Versagen des Kupferbehälters /SKB 06/

Interaktionsmatrizen

Für eine strukturierte Beschreibung der Abhängigkeiten werden auch sogenannte Interaktionsmatrizen genutzt (siehe Abb. 2.16). Es werden die Parameter in einer Diagonalen in eine Matrix gesetzt. Damit ist es möglich, potenzielle Verbindungen von jedem Parameter zu alle anderen Parametern darzustellen /SKB 95/.

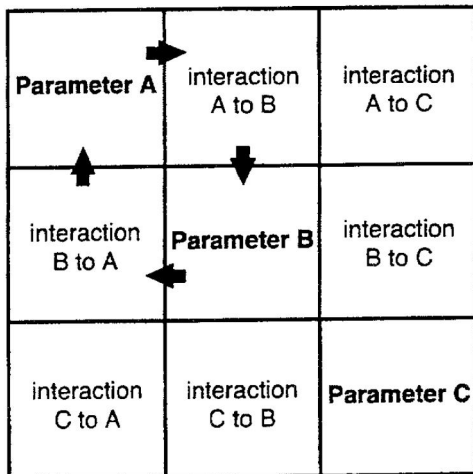


Abb. 2.16 Prinzip einer Interaktionsmatrix /SKB 95/

Prozesstabellen

Für jeden Prozess werden Tabellen erstellt. Diese beschreiben für jede Variable bzw. Parameter einer Systemkomponente, ob und wie diese vom betrachteten Prozess beeinflusst werden. Als Beispiel ist ein Ausschnitt der Prozesstabelle für den Prozess „Wärmetransport“ in der Systemkomponente „Geosphäre“ in Abb. 2.17 dargestellt /SKB 06/.

Variable	Variable influence on process			Process influence on variable		
	Influence present?	Time period	Handling of influence	Influence present?	Time period	Handling of influence
Temperature in bedrock	Yes. Temperature gradients are the driving force for heat transport. Thermal conductivity and heat capacity are temperature dependent.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	Yes.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).
		Temperate	Site-specific temperature and thermal properties. Thermal properties for constant T.		Temperate	Output from calculations.
		Permafrost Glaciation	See Temperate above and Climate report .		Permafrost Glaciation	Output from calculations, see also section 2.2 in Geosphere process report and Climate report .
Groundwater flow	Yes.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	No. But indirectly through temperature.		See section 3.1 Groundwater flow in Geosphere process report .
		Temperate	Influence of convection neglected; little significance.			
		Permafrost Glaciation				
Groundwater pressure	Yes.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	No. But indirectly through temperature.		See section 3.1 Groundwater flow in Geosphere process report .
		Temperate	Influence neglected; little significance.			
		Permafrost Glaciation	See Temperate above and Climate report .			
Gas flow	Yes.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	No.	-	-
		Temperate	Influence neglected; little significance.			
		Permafrost Glaciation	See Temperate above and Climate report .			
Repository geometry	Yes. Affects heat flux from repository. Canister spacing particularly important in the near field.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	No.	-	-
		Temperate	Included in model.			
		Permafrost Glaciation	Included in permafrost model (see Climate report).			
Fracture geometry	Yes.	Excavation/operation	Heat transport neglected (see section 2.1.7 in Geosphere process report).	No. But indirectly through rock stresses and temperature.		See mechanical processes in chapter 4 in Geosphere process report .
		Temperate	Influence neglected; little significance.			
		Permafrost Glaciation	Influence neglected; little significance.			

Abb. 2.17 Beispiel für eine Prozesstabelle für den Prozess "Wärmetransport". Es werden die gegenseitigen Einflüsse von Parametern und einem spezifischen Prozess innerhalb einer Systemkomponente dargestellt. /SKB 06/

Diese drei Darstellungsformen verschaffen zwar einen Eindruck über die Komplexität der Vorgänge, aber es lässt sich davon keine Relevanz eines Prozesses ableiten.

Datenblatt

Für jeden für die Langzeitsicherheit relevanten Prozess wird ein Datenblatt angelegt. Es enthält Angaben zu folgenden Punkten /SKB 06/:

- Allgemeine Beschreibung
- Randbedingungen
- Modellstudien und Experimente
- Beobachtungen in der Natur
- Zeitrahmen
- Handhabung im aktuellen Projekt
- Handhabung von Ungewissheiten im aktuellen Projekt
- Literatur

Tabellen für die Systemkomponenten

Für jede Systemkomponente wird eine Tabelle erstellt, in der alle Prozesse auf Grundlage der „Process-Reports“ zusammengefasst werden, die in der jeweiligen Komponente auftreten können. Jede Zeile der Tabelle steht für einen Prozess. In den Spalten werden die für diese Systemkomponente möglichen Entwicklungen genannt. Damit wird für jede Konstellation von Prozess und Entwicklung der Systemkomponente eine Aussage getroffen, wie diese berücksichtigt wird. Es wird entweder ein Modell genannt, welches als Grundlage für eine quantitative Berechnung genutzt wird oder es erfolgt eine kurze Beschreibung, wie mit dieser Konstellation umgegangen wird. Abb. 2.18 ist ein Auszug aus der zusammenfassenden Tabelle für die Systemkomponente „Abfall“ /SKB 06/. Am Beispiel des ersten Prozesses „radioaktiver Zerfall“ kann der Tabelle entnommen werden, dass dieser Prozess für den intakten Abfallbehälter über ein thermisches Modell berücksichtigt wird. Ab dem Zeitpunkt des Abfallbehälterversagens wird der „radioaktive Zerfall“ im „COMP23“-Modell für den Nuklidtransport berücksichtigt.

	Intact canister	FEP chart item intact can (see section 7.6)	Failed canister	Notes
F1 Radioactive decay	Thermal model	Decay, heat generation	COMP23	In thermal calculation, see section 9.3.4, in nuclide transport calculations section 10.4.1.
F2 Radiation attenuation/heat generation	Thermal model	Decay, heat generation	Neglected as long-term releases occur after period of elevated temperatures	In thermal calculation, see section 9.3.4.
F3 <i>Induced fission (criticality)</i>	Neglected since there will be insufficient amounts of moderator inside the canister prior to failure	–	Neglected since the probability is negligibly small if credit is taken for the burn-up of the fuel	See further section 10.3.
F4. Heat transport	Thermal model	Heat conduction	Neglected as long-term releases occur after period of elevated temperatures	In thermal calculation, see section 9.3.4.
F5 <i>Water and gas transport in canister cavity, boiling/condensation</i>	Not relevant	–	Description in Main report, integrated with other relevant processes	Section 10.5.2.
F6 Cladding failure	Not relevant	–	Pessimistic assumption	
F7 Structural evolution of fuel matrix	Not relevant	–	Neglected, since burn-up sufficiently low	
F8 <i>Advection and diffusion</i>	Not relevant	–	Description in Main report, integrated with other relevant processes	Refers to diffusion and advection in the canister interior, see section 10.5.2. See also process F16.
F9 Residual gas radiolysis/acid formation	Neglected since negligible amounts of corrodants are produced	–	Not relevant	See Fuel and canister process report , section 2.5.2.

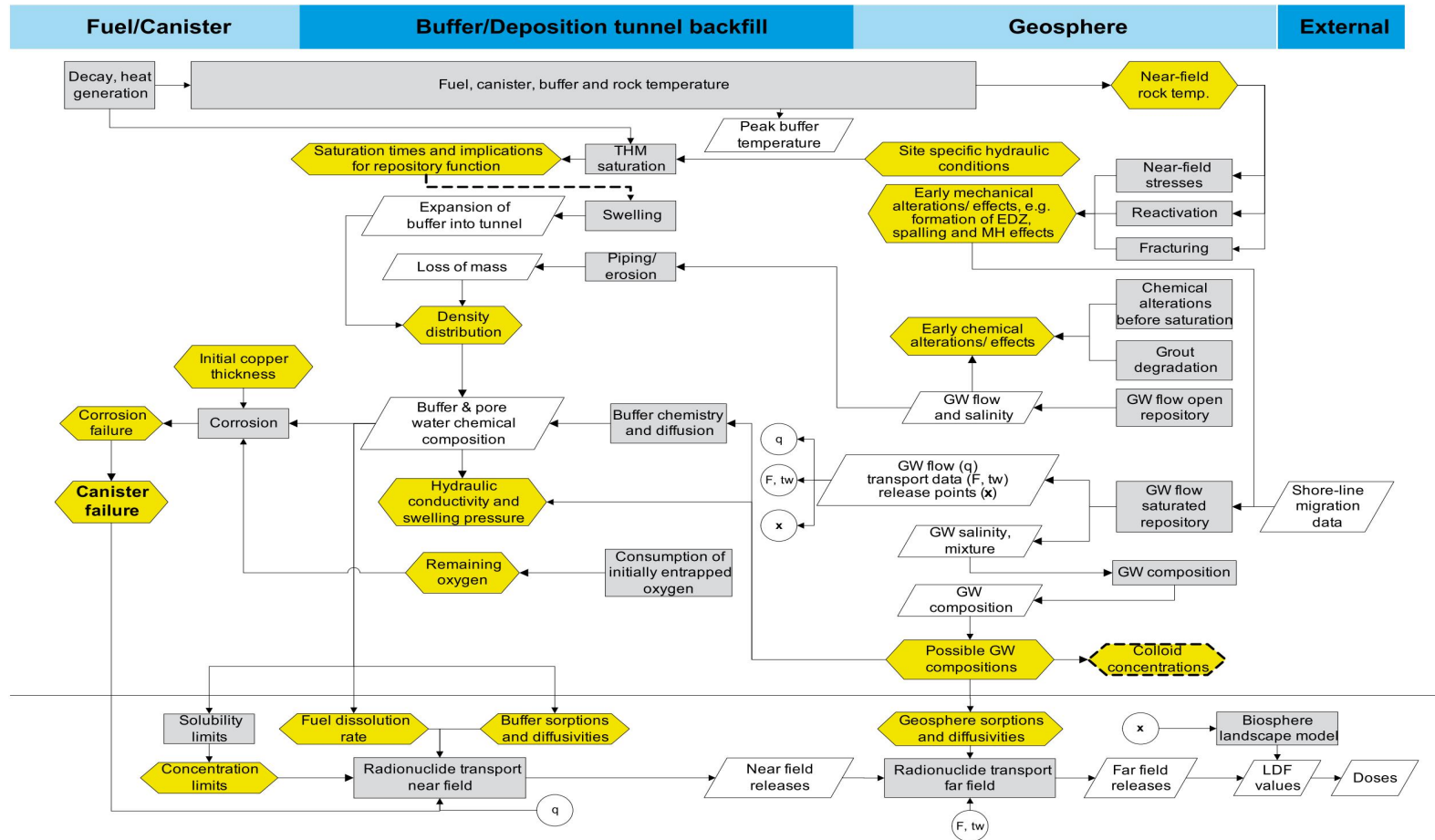
Abb. 2.18 Zusammenfassung (Auszug) der Prozess-Entwicklungskonstellation am Beispiel der Systemkomponente "Abfall" /SKB 06/

Bewertungsmodell-Flussdiagramm

Um einen Überblick über die zur Bewertung genutzten Modelle und deren Querverbindungen zu bekommen, wird ein Flussdiagramm für die Bewertungsmodelle erstellt. In Abb. 2.19 ist ein beispielhaftes Bewertungsmodell-Flussdiagramm abgebildet. Die grauen Rechtecke stellen die Bewertungsmodelle, die Parallelogramme die Eingangsdaten bzw. Ergebnisse eines Modells und die gelben Sechsecke die Eingangsdaten für Modelle aus anderen Modellen und weiteren Informationen wie z. B. Randbedingungen dar (dabei werden die Ergebnisse eines Modells nicht direkt als Eingangsdaten für ein anderes Modell genutzt, sondern die Ergebnisse werden zunächst interpretiert) /SKB 06/.

AMF for excavation/operation and temperate periods

Legend:



50

Abb. 2.19 Beispiel für ein Bewertungsmodell-Flussdiagramm /SKB 06/

FEP-Chart

Die Entwicklung des Endlagersystems bzw. die Entwicklung der Sicherheitsfunktionen geht zunächst von einem definierten Ausgangszustand aus und wird beeinflusst von einigen gekoppelten internen Prozessen und von externen Einflüssen auf das Gesamtsystem. Alle diese Komponenten und ihre Verbindungen werden übersichtlich in einem FEP-Chart (siehe Abb. 2.20) dargestellt. Die normalen Linien symbolisieren normale Abhängigkeiten. Die gestrichelten Linien stellen die Abhängigkeiten bei dem, nach anzeigen eines Indikators, Versagen einer Sicherheitsfunktion dar /SKB 06/.

Festlegung von Sicherheitsfunktionen

Es werden grundlegende Sicherheitsfunktionen für das Sicherheitskonzept definiert. Die grundlegenden Sicherheitsfunktionen im schwedischen Sicherheitskonzept sind der Einschluss der Radionuklide in den Kupfer-ummantelten Endlagerbehältern sowie die Verzögerung der Ausbreitung von Radionukliden.

Diese beiden grundlegenden Sicherheitsfunktionen werden durch verschiedene untergeordnete Sicherheitsfunktionen gestützt. Die Einschlusswirkung der Behälter kann durch drei Prozesse, übermäßige mikrobiell gesteuerte Korrosion, übermäßige isostatische Last und übermäßige Scherbeanspruchung gefährdet werden. Es leiten sich daher Sicherheitsfunktionen ab, die darauf abzielen, entweder die Behälter vor den o.g. Lastfällen zu schützen (z. B. Eliminierungspotenzial von Mikroben im Bentonit) oder, falls die Einschlusswirkung der Behälter nicht mehr unterstellt werden kann, eine Verzögerung der Ausbreitung der Radionuklide zu bewirken (z. B. Dichtheit der Kupferhülle).

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften von Komponenten können komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen identifiziert werden, die den grundlegenden Sicherheitsfunktionen untergeordnet sind. Beispielsweise stellt die „Dichtheit der Kupferhülle“ eine wesentliche Sicherheitsfunktion dar. Ab einem bestimmten Druck im Bentonit-Versatz wandeln sulfatreduzierende Mikroben aus dem Bentonit-Versatz Sulfate in Sulfide um, die wiederum zu einer Korrosion von Kupfer führen. Daher stellt die Eigenschaft des Bentonit-Versatzes, „Mikroben zu eliminieren“, eine der „Dichtheit der Kupferhülle“ untergeordnete Sicherheitsfunktion dar, die damit auch indirekt die grundlegende Sicherheitsfunktion „Einschlusswirkung der Behälter“ stützt. Ein weiteres Beispiel für eine untergeordnete Sicherheitsfunktion ist die Dichte der Bentonit-Barriere. Bei einem Anstieg der Dichte des Bentonit in Folge des Aufquellens wird ab einer bestimmten Dichte die Barriere „Bentonit“ als dicht angenommen und damit die Sicherheitsfunktion der Bentonit-Barriere erfüllt /SKB 06/.

Zusätzlich wurde überprüft ob Sicherheitsfunktionen in Verbindung mit Prozessen aus dem Prozessbericht formuliert werden können. Idealerweise mit Angabe von Indikatoren und Kriterien /SKB 06/.

Bewertungsgrundlage

SKB und Posiva haben Indikatoren definiert, die die Erfüllung von Sicherheitsfunktionen belegen sollen. SKB nennt diese Indikatoren „safety function indicators“ und Posiva nennt sie „performance targets and target properties“. Es handelt sich bei den Indikatoren um quantitative Angaben (z. B. die Dichte einer Bentonit-Barriere). Die Indikatoren stellen eine Alternative zum Sicherheitsindikator der radiologischen Dosis dar. Dabei wird ein Wertebereich definiert, in dem eine Barriere seine Sicherheitsfunktion erfüllt (Safety function indicator criteria). Für den Bentonit-Versatz wird beispielsweise festgelegt, dass ab einem Druck von 2 MPa ein Überleben von Mikroben, die zu Korrosion führen, ausgeschlossen werden kann, da diese dadurch von ihrer Nährstoffzufuhr isoliert werden. Sollten Ereignisse und Prozesse zu Werten außerhalb des definierten Wertebereichs führen können, müssen diese Prozesse und Ereignisse weiter in der Szenarienentwicklung und Analyse in Form von Alternativszenarien betrachtet werden, um die Einhaltung der radiologischen Grenzwerte, welches das übergeordnete Kriterium zur Bewertung der Sicherheit eines Endlagers darstellt, zu überprüfen /NEA 12/, /SKB 06/.

Eingangsdaten und Ungewissheiten

Eingangsdaten für Wahrscheinlichkeitsberechnungen sowie zeitliche und örtliche Angaben sind immer mit Ungewissheiten behaftet. Ungewissheiten werden in drei Kategorien eingeteilt. Es gibt Systemungewissheiten, Konzept/Modell-Ungewissheiten und Datenunsicherheiten. Es gibt für alle drei Kategorien einzelne Berichte, in denen u. a. die Ungewissheiten behandelt werden. Es wird festgelegt, welche Ungewissheiten im Referenzszenario berücksichtigt werden. Alle übrigen Ungewissheiten werden in den alternativen Szenarien betrachtet /SKB 06/.

Die Ungewissheiten können vereinzelt nur bedingt reduziert werden. Demzufolge müssen die Unsicherheiten zu allen quantifizierten Daten angegeben werden. Die Angabe von Unsicherheiten erfolgt in unterschiedlicher Form. Es werden Angaben in Form von Möglichkeitsbereichen, subjektiven Prozentwerten oder Verteilungsfunktionen gemacht, wobei die letztere Form zu bevorzugen ist. Zusätzlich sind eventuelle Beziehungen zwischen den Unsicherheiten anzugeben /SKB 06/.

Ableitung von Szenarien

Als Grundlage für das Referenzszenario wird die erwartete Entwicklung des Endlagersystems genutzt. Hierbei wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Eine Variante legt die sich wiederholende Folge von Warm- und Kaltzeiten der Vergangenheit als klimatische Entwicklung zugrunde. Die andere Variante legt eine klimatische Entwicklung zugrunde, die vom Treibhausgaseffekt bestimmt wird. Beide Varianten werden zum Referenzszenario gezählt /SKB 06/.

Um alle möglichen Entwicklungspfade die zu Defiziten in der Sicherheit führen können zu berücksichtigen wird das FEP-Chart (siehe Abb. 2.20) zur Hilfestellung genutzt. Das FEP-Chart bietet eine Übersicht über den Ausgangszustand, die ablaufenden Prozesse und die externen Randbedingungen sowie deren Beziehungen untereinander. Es lassen sich die gekoppelten FEP und die Ungewissheiten des Referenzszenarios identifizieren, die einen wichtigen Ausgangspunkt für die Formulierung von alternativen Szenarien darstellen. Ungewissheiten können zu einem Teil- oder Vollversagen von Sicherheitsfunktionen führen. Die daraus folgenden Entwicklungen werden in Form von Alternativszenarien beschrieben. Zusätzlich werden alternative Szenarien für die „zukünftigen menschlichen Handlungen“ aufgestellt. Dazu zählt z. B. Human Intrusion sowie ein verlassenes, nicht verschlossenes und nicht überwachtes Endlager. Falls es weitere denkbare alternative Szenarien gibt, können diese definiert werden /SKB 06/.

Kombinationen von verschiedenen Szenarien werden erstellt. Das gestaltet sich schwierig, da es eine hohe Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten gibt, auch wenn sich gegenseitig ausschließende Szenarien nicht kombiniert werden. Der Schwerpunkt liegt daher auf der Kombination von Szenarien, die in unterschiedlichen zeitlichen Phasen der Entwicklung stattfinden /SKB 06/.

Eine grafische Zusammenfassung der Vorgehensweise bei der Szenarientwicklung der SKB ist in Abb. 2.21 dargestellt.

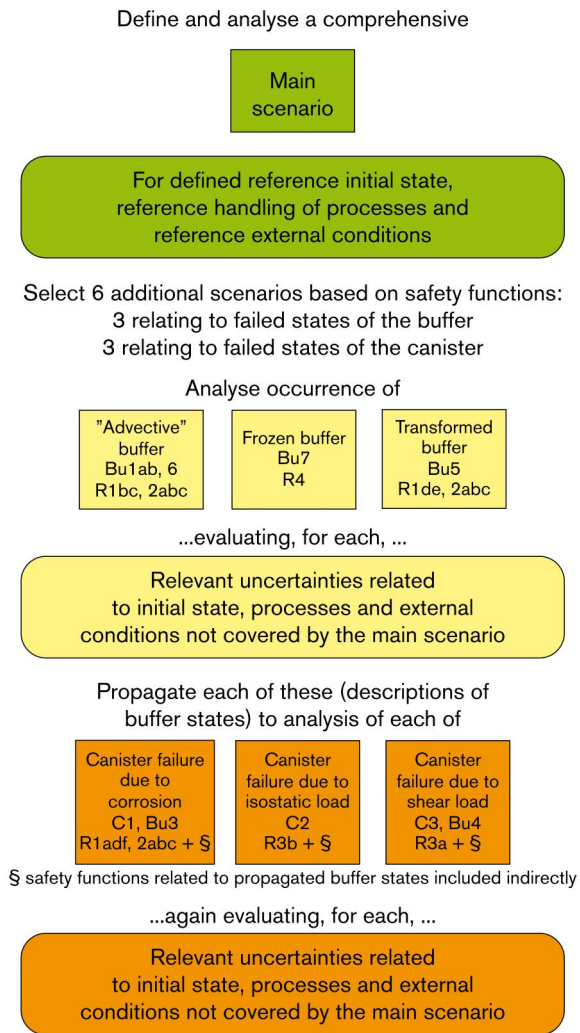


Abb. 2.21 Hauptbestandteile der Szenarientwicklung. Ableitung von zusätzlichen Szenarien durch Betrachtung der Sicherheitsfunktionen des Behälters und des Bentonit-Versatzes (gelb und orange) /SKB 06/

Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien

Nach der Aufstellung der alternativen Szenarien werden diese in die Wahrscheinlichkeitsklassen „weniger wahrscheinlich“ und „verbleibend“ einsortiert. Für Szenarien, die als „weniger wahrscheinlich“ eingestuft werden, werden, soweit möglich, weitere Bewertungen der Wahrscheinlichkeit durchgeführt /SKB 06/.

SKB nutzt beispielsweise die Kombination mehrerer Einzeleintrittswahrscheinlichkeiten. Als Beispiel wird folgendes Szenario betrachtet: der Endlagerbehälter versagt aufgrund einer von einem Erdbeben ausgelösten Scherbewegung entlang einer dem Einlagerungsbohrloch durchquerenden Störung im Wirtsgestein. Um die Eintrittswahr-

scheinlichkeit für dieses Szenario zu ermitteln, werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Erdbeben, die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von nicht erkannten Störungen im Wirtsgestein und die Eintrittswahrscheinlichkeit dafür, dass eine Störung im Wirtsgestein das Einlagerungsbohrloch durchquert als Basis genutzt /NEA 12/.

Nutzung von FEP

Am Beispiel des SR-Can Projektes von SKB /SKB 06/ soll die Nutzung von FEP beschrieben werden (siehe auch Abb. 2.22). Als Grundlage zur Zusammenstellung einer projektspezifischen FEP-Datenbank wurde die von SKB entwickelte Interaktionsmatrix, der Prozessreport und die NEA-FEP-Datenbank, die mit weiteren nationalen FEP-Datenbanken verlinkt ist, genutzt. Die aus dieser Basis abgeleiteten bzw. übernommenen FEP wurden in Kategorien eingeteilt. Diese Kategorien lauten: Ausgangszustands-FEP, Prozess-FEP, Externe FEP, Methodische FEP, und irrelevante FEP /NEA 12/.

Prozess-FEP werden genutzt, um die Darstellungen von Prozessen und Ungewissheiten aus dem Prozessreport zu dokumentieren. Die Prozess-FEP bilden die erwartete Entwicklung des Endlagersystems und die dabei möglichen THMC-Prozesse ab und stellen damit, neben den Ausgangszustands-FEP und der Referenzentwicklung für die Umgebung des Endlagersystems, die Grundlage für das Referenzszenario dar. Alternativszenarien werden durch Abweichungen vom Ausgangszustand und von der Referenzentwicklung gebildet. Zukünftige menschliche Einflüsse werden betrachtet und können ebenfalls zu Alternativszenarien führen. Damit wird die erstellte projektspezifische FEP-Datenbank hauptsächlich zur Ableitung des Referenzszenarios genutzt. Ungewissheiten und Abweichungen vom Referenzszenario bilden dann Alternativszenarien /NEA 12/.

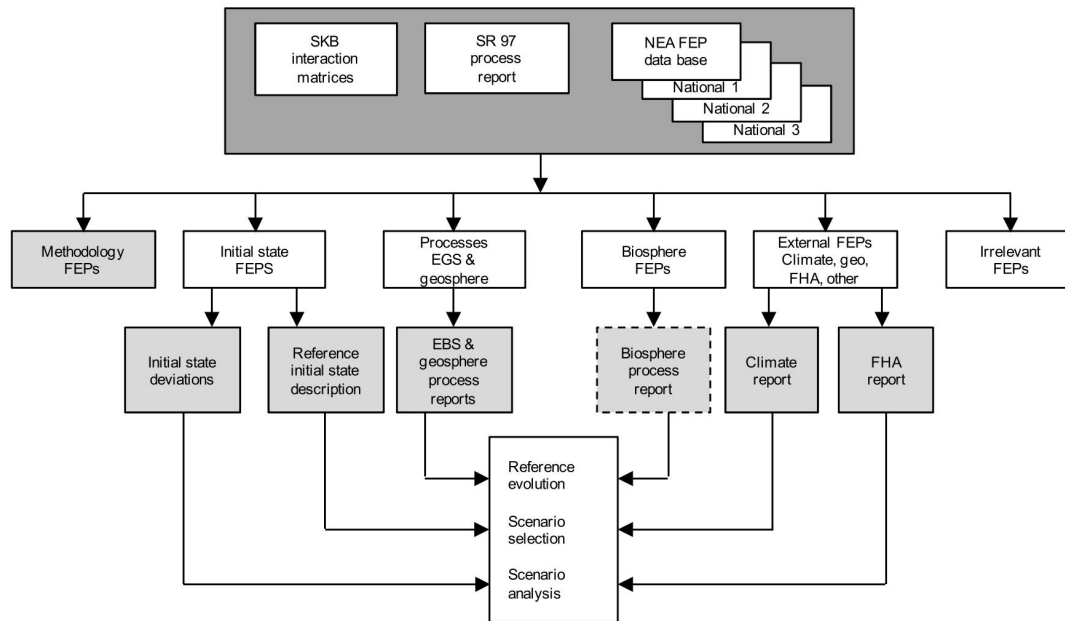


Abb. 2.22 Handhabung von FEP im SR-Can Projekt von SKB /NEA 12/

2.7 Szenarientwicklung Schweiz

Die Methode, die von der schweizerischen Nagra angewendet wird, folgt vorrangig dem Top-Down-Ansatz. Es wird zunächst eine Systembeschreibung des Endlagersystems erstellt. Die möglichen Endlagerkonzepte werden beschrieben sowie deren Sicherheitskonzepte bzw. Sicherheitsfunktionen dargelegt. Zudem wird die erwartete Entwicklung des Endlagersystems beschrieben dazu gehört z. B. auch die Klimaentwicklung und die Neotektonik. Diese Beschreibung beinhaltet auch Ungewissheiten bezüglich der Entwicklung. Sie dient als Grundlage für das Referenzszenario. Die erwartete Entwicklung und die berücksichtigten Erscheinungen werden mit Hilfe einer separat erstellten systemspezifischen FEP-Liste auf Vollständigkeit überprüft. Die NEA-FEP-Datenbank dient wiederum zur Überprüfung der Vollständigkeit der systemspezifischen FEP-Liste /JOH 02/, /NEA 12/.

Es gibt sogenannte Reserve-FEP. Das sind FEP die als wahrscheinlich angesehen werden und die zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen, die allerdings noch nicht modelliert oder quantitativ berechnet werden können. Die Reserve-FEP werden in der ersten Sicherheitsbewertung nicht berücksichtigt, sondern werden als Sicherheitsreserve angesehen /JOH 02/. Spätestens in der finalen Sicherheitsbewertung werden auch die Reserve-FEP berücksichtigt.

Die Einflüsse von Erscheinungen auf die Sicherheitsfunktionen werden mithilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse geben Hilfestellung bei der Identifizierung der „wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen“ auf die sich bei der Erstellung von Bewertungsfällen (Szenarien) bezogen wird. Mit den Ergebnissen kann außerdem beurteilt werden, wie robust das Sicherheitskonzept in Bezug auf eine Parametervariation ist. Durch die Sensitivitätsanalyse wird zusätzlich ein Systemverständnis erlangt, welches als Grundlage für die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der Bewertungsfälle benötigt wird /JOH 02/.

Die „wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen“ werden in einer Tabelle zusammengefasst (siehe Tab. 2.1). Diese „wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen“, die störende Ereignisse und Prozesse sowie Ungewissheiten enthalten, dienen als Grundlage zur Ableitung von Alternativszenarien /JOH 02/.

In Abb. 2.23 sind die Schritte des Konzeptes der Nagra für die Erstellung des Safety Cases grafisch dargestellt.

Tab. 2.1 Ausschnitt aus der Tabelle für die wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen /JOH 02/

Sicherheitsrelevante Eigenschaften, Erscheinungen und Entwicklungen			
Systemkomponente	Haupterscheinung	erwartete Entwicklung	Ungewissheiten und mögliche Abweichungen
Endlager	Endlageraufbau, Abfallinventar und -Zustand	Referenzszenario Parameter, Abfallinventar von 60 Jahren Betrieb von KKW	größeres Abfallinventar
	Endlagerkonzept	Referenzszenario Konzept	alternative Endlagerkonzepte
Abgebrannte Brennelemente	Radioaktives Inventar und Zerfallsprozesse	Radionuklidinventar, Halbwertszeit und Zerfallswärme, drei verschiedene Behälterinventare (UO ₂ -BE aus DWR, SWR und MOX/UO ₂ -BE aus DWR), Durchschnittlicher Abbrand von 48 GWd/t _{SM}	Abweichende Behälterkonstruktionen und abweichende Abbrände haben Einfluss auf den Quellterm bei Behälterversagen. Erhöhter Abbrand von bis zu 75 GWd/t _{SM}
...

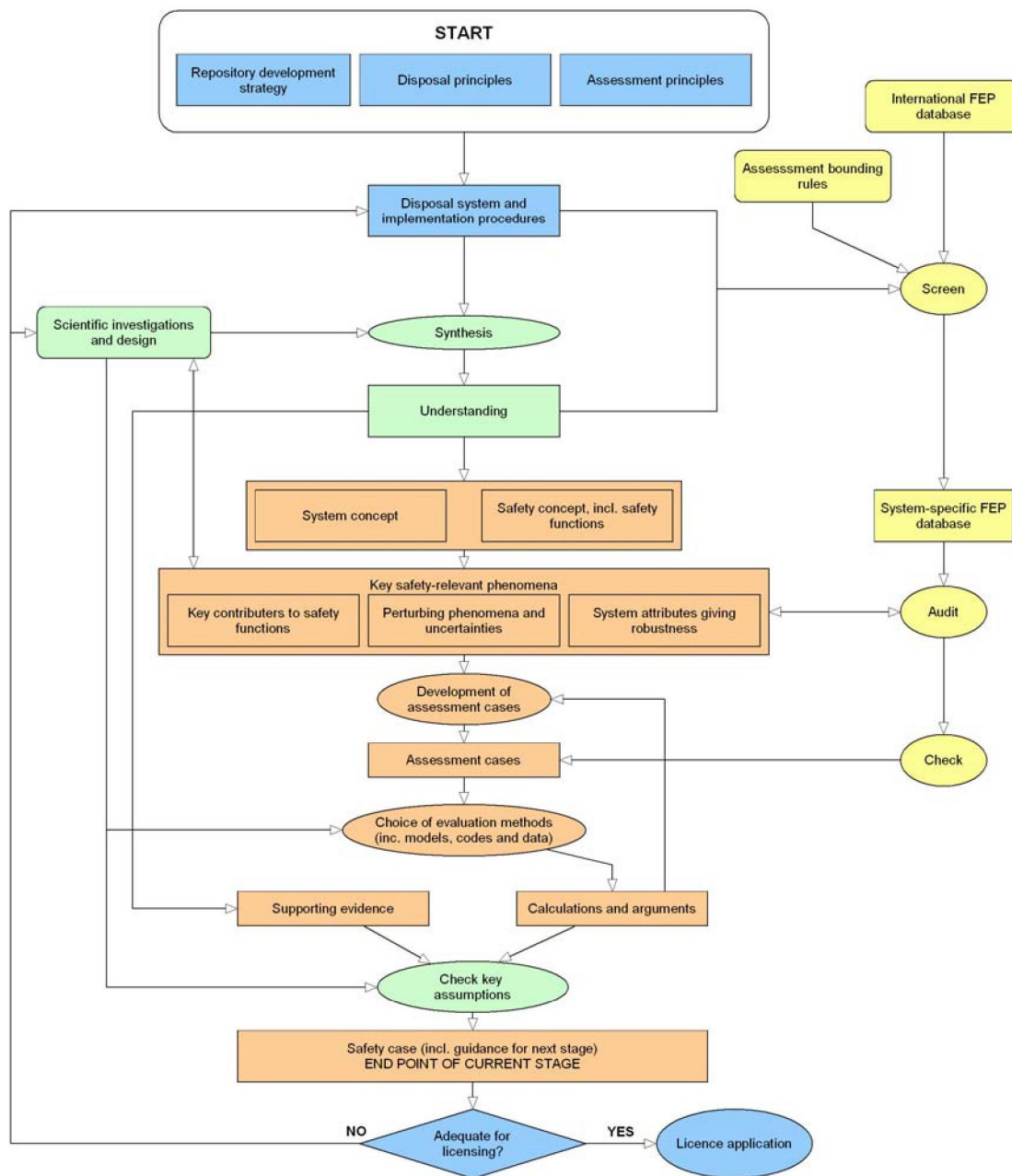


Abb. 2.23 Die Schritte im Nagra-Konzept bei der Erstellung eines Safety Case /NEA 12/

2.8 Zusammenfassung der Entwicklung

Die Szenarientwicklung für den Langzeitsicherheitsnachweis bei Endlagern hat sich über die letzten Jahrzehnte entwickelt. Ein erster systematischer Ansatz erfolgte mit der einzelnen Betrachtung von ablaufenden Prozessen. Diese Prozesse wurden nach ihrem Einfluss auf das Endlager beurteilt. Es wurde mit logischen Überlegungen und

verbalen argumentierten Plausibilitätsbetrachtungen sowie *Expert Judgement* gearbeitet (siehe Kapitel 2.2.1). Dies war ein reiner Bottom-Up Ansatz.

Im PROSA-Projekt (siehe Kapitel 2.2.2) wurde der Ansatz weiterentwickelt, indem das Endlagersystem das erste Mal in Bereiche unterteilt wurde. Den Bereichen wurden „Funktionen“ gegeben, die erfüllt oder nicht erfüllt werden können. Eine weitere Aufteilung der Bereiche in einzelne Barrieren erfolgte später, womit sich ebenfalls die Anzahl von Funktionen erhöhte und die Funktionsbeschreibungen genauer wurden.

In einer nächsten Entwicklungsstufe erfolgte die Definition von Sicherheitsfunktionen (siehe Szenarientwicklung in Frankreich, Belgien, Schweden, Schweiz und im Projekt VerSi) ausgehend vom Sicherheitskonzept (Top-Down Ansatz), welches sich aus den Schutzziele ergibt. Ausgehend von allgemeinen Sicherheitsaussagen (Schutzziele) werden weitere untergeordnete Aussagen formuliert, die angeben wie eine übergeordnete allgemeine Aussage erfüllt werden kann (siehe dazu Abb. 2.14).

Da beide Ansätze (Bottom-Up und Top-Down) Vor- und Nachteile besitzen, werden sie in jüngeren Projekten (siehe Szenarientwicklung in Frankreich, Belgien, Schweden, Schweiz und im Projekt VerSi) in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase i. d. R. kombiniert. In den jüngeren, im Kapitel 2 betrachteten Projekten wird dem Top-Down Ansatz eine stärkere Bedeutung gegeben. Bottom-Up und Top-Down Ansatz schließen sich nicht aus, sondern ergänzen sich gegenseitig.

Die Entwicklung der Szenarientwicklung ist in Tab. 2.2 und Tab. 2.3 anhand der chronologischen Abfolge der in Kapitel 2 beschriebenen, internationalen Projekte aufgelistet. Dazu werden die Änderungen/ Neuerungen/ Besonderheiten des jeweiligen Projektes angegeben.

Tab. 2.2 Chronologische Auflistung der in Kapitel 2 beschriebenen Projekte mit Erläuterung der Besonderheiten in der Entwicklung in Bezug auf die Szenarientwicklung

Beschreibung	Besonderheiten
Independent Initiating Events (IIE) (Kapitel 2.2.1)	
Einflüsse auf ein Endlager und die darin enthaltenen Abfälle werden anhand einer mit Hilfe von verbal argumentierten Plausibilitätsbetrachtungen aufgestellten Ereignisliste untersucht.	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Überlegungen wie Szenarien gebildet werden können

Beschreibung	Besonderheiten
Probabilistic Safety Assessment (PROSA) (Kapitel 2.2.2)	
Einflüsse auf die drei Bereiche eines Endlagers und die darin enthaltenen Abfälle werden anhand einer mit Hilfe von verbal argumentierten Plausibilitätsbetrachtungen aufgestellten FEP-Liste untersucht.	<ul style="list-style-type: none"> • Erstmals Nutzung eines FEP-Kataloges • Erstmals Einteilung des Endlagers in Bereiche • Binäre Darstellung der Funktionserfüllung der Bereiche • Schlussfolgerung in Anlagenzustände
Transport Mechanism Methodology (T.M.M) (Kapitel 2.2.3)	
Grundgedanke: Radiologische Auswirkung immer mit Transportprozess verbunden. Focus liegt auf Transportprozessen, die durch FEP beeinflusst oder ermöglicht werden können.	<ul style="list-style-type: none"> • Im Mittelpunkt der Betrachtung liegen die Transportprozesse.
ISIBEL (Kapitel 2.3.1)	
Erstellung des FEP-Kataloges mit 2 Fragestellungen: „Welche FEP haben einen Einfluss auf geologische Entwicklungen oder auf die Mobilisierung von Radionukliden?“ (Bottom-Up) und „Wie können Lösungen mit dem Abfall in Kontakt treten?“ (Top-Down). Weitere Aufteilung des Endlagers und Zuweisung von Funktionen zu einzelnen einschlusswirksamen Barrieren. Detaillierte Beschreibung jedes einzelnen FEP.	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung des Konzeptes „Sicherer Einschluss“ • Kombination von Bottom-Up und Top-Down Ansatz zur Erstellung des FEP-Kataloges • Anstatt Bereiche mit Funktionen zu definieren, werden Funktionen einschlusswirksamen Barrieren zugewiesen. • FEP werden wesentlich umfangreicher beschrieben. Alle relevanten Informationen zu einem FEP sollen direkt im FEP-Datenblatt verfügbar bzw. ein Verweis auf die Information sollte vorhanden sein.
Vergleichende Sicherheitsanalyse (VerSi) (Kapitel 2.3.2)	
Zuweisung von Sicherheitsfunktionen zu einzelnen Systemkomponenten (Teilsysteme und Komponenten). Bewertung der Einflussnahme von FEP zu Systemkomponenten mit den Attributen: „direkt“, „indirekt/nachrangig“ oder „nicht erkennbar aber nicht ausschließbar“. Einfluss von FEP auf Sicherheitsfunktionen über die Systemkomponenten ableitbar. Einflüsse und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Systemkomponenten werden betrachtet.	<ul style="list-style-type: none"> • Erstmals Einteilung des Endlagers in Teilsysteme und Komponenten. • Erstmals Benutzung von Sicherheitsfunktionen, die abhängig von sicherheitsgerichteten Eigenschaften einer Komponente sind. • Erstmals Bewertung der Einflüsse zwischen FEP und Systemkomponenten • Erstmals Berücksichtigung von Abhängigkeiten der Systemkomponenten untereinander • Erste Methode, die einen Vergleich von verschiedenen Standorten und damit Wirtsgesteinen ermöglichen sollte

Beschreibung	Besonderheiten
Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) (Kapitel 2.3.3)	
FEP werden Eintrittswahrscheinlichkeiten zugeordnet. Zusätzlich werden verschiedene Auswirkungen von FEP definiert, denen ebenfalls eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Auf Grundlage eines FEP-Kataloges werden wahrscheinliche FEP identifiziert, die Funktionen von Barrieren direkt beeinflussen. Abhängigkeiten der FEP untereinander werden bewertet (auslösend, beeinflussend, resultierend, beeinflusste).	<ul style="list-style-type: none"> • Bislang umfangreichste Informationen auf dem FEP-Datenblatt • Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit für jedes FEP und nicht für das Szenario

Tab. 2.3 Chronologische Auflistung der in Kapitel 2 beschriebenen Projekte aus den Ländern mit Erläuterung der Besonderheiten in der Entwicklung in Bezug auf die Szenarienentwicklung

Beschreibung	Besonderheiten
Frankreich (Kapitel 2.4)	
Zuordnung von Sicherheitsfunktionen zu relevanten Komponenten des Endlagers. Abhängigkeiten von THMCR-Prozessen zu den Komponenten werden analysiert. Definition von Situationen (örtliche und zeitliche Diskretisierung der Entwicklung). Ungewissheiten bei der Entwicklung werden gezielt ausgearbeitet und definiert.	<ul style="list-style-type: none"> • Mit den „Situationen“ wurde der Focus auf die Kombination von örtlicher und zeitlicher Diskretisierung gerichtet. • Erstmals gezielte Ausarbeitung von Ungewissheiten als Grundlage für alternative Szenarien
Belgien (Kapitel 2.5)	
Beschreibung der Entwicklung des Endlagers anhand von „storyboards.“ Verbindung von generellen Sicherheitsaussagen aus dem Sicherheitskonzept über Sicherheitsfunktionen mit den Standortfakten und Eigenschaften. Analyse von Ungewissheiten, welche bei Erreichen der Ebene der Sicherheitsfunktionen ein alternatives Szenario darstellen.	<ul style="list-style-type: none"> • Erstmalige Nutzung von „storyboards“ für Beschreibung der Entwicklung (grafische Darstellung von THMC-Prozessen und deren Einwirkung auf das Barrierensystem) • Erstmals Nutzung einer hierarchischen Darstellung von generellen Sicherheitsaussagen (Schutzziele) und individuellen Standortfakten und Eigenschaften

Beschreibung	Besonderheiten
Schweden (Kapitel 2.6)	
<p>Einteilung des Endlagersystems in Systemkomponenten. Zuordnung von Sicherheitsfunktionen zu den Systemkomponenten. Zuordnung von Prozessen zu den jeweiligen Systemkomponenten bzw. Sicherheitsfunktionen. Veranschaulichung der erwarteten Entwicklung/Referenzszenario (Prozesse, Systemkomponenten und Abhängigkeiten) durch Grafiken (Prozessdiagramme, Interaktionsmatrizen, Prozesstabellen, FEP-Chart). Alternative Szenarien durch Ungewissheiten, Teil- und Vollversagen von Sicherheitsfunktionen, sowie „zukünftige menschliche Handlungen“.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung verschiedener Tools zur Veranschaulichung von Prozessen und deren Verbindungen zu Komponenten (bzw. deren Parameter) des Endlagers sowie deren Sicherheitsfunktionen. • Abhängigkeiten von Parametern untereinander werden mit Interaktionsmatrizen dargestellt. • Alle Abhängigkeiten zwischen Endlagersystem bzw. Sicherheitsfunktionen und die einflussnehmenden Prozesse und Einflüsse werden in einem FEP-Chart dargestellt, welches sehr komplex und demzufolge unübersichtlich ist. • Erstmals Formulierung von Indikatoren, die die Erfüllung von Sicherheitsfunktionen belegen. • Es wurde versucht verschiedene Szenarien miteinander zu kombinieren, was sich als sehr umfangreich herausstellte.
Schweiz (Kapitel 2.7)	
<p>Prozesse und Events werden hier als Erscheinungen bezeichnet. Von denen werden mithilfe einer Sensitivitätsanalyse die „wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen“ identifiziert.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung des Begriffs „Erscheinungen“ für Prozesse und Events.

3 Strukturen von FEP-Datenbanken

In diesem Kapitel werden die Strukturen von FEP-Katalogen und –Datenbanken ausgewertet. In den Kapiteln 3.1 bis 3.5 werden die Strukturen von FEP-Datenbanken aus verschiedenen internationalen Projekten beschrieben. Kapitel 3.6 gibt eine Zusammenfassung.

Unterschieden werden muss zwischen den Begriffen FEP-Liste, -Katalog und –Datenbank. I. d. R. bezeichnet eine FEP-Liste allgemein die Aufführung von FEP, standortunabhängig und ohne genauer auf deren einzelnen Eigenschaften einzugehen. Ein FEP-Katalog bezieht sich i. A. meist auf ein spezifisches Projekt und einen Standort und beinhaltet dementsprechend detaillierte Eigenschaften zu den einzelnen FEP am Standort. Eine FEP-Datenbank bezeichnet hingegen die digitale Form eines FEP-Kataloges. Eine FEP-Datenbank kann mit umfangreichen Bearbeitungstools sowie Verknüpfungen ausgestattet sein.

3.1 NEA-FEP-Datenbank

Die NEA FEP-Datenbank besteht aus zwei Teilen (/NEA 06/):

- die internationale FEP-Liste und
- die Projekt Datenbanken

Die internationale FEP-Liste umfasst 150 FEP. Jedes FEP enthält eine Definition und weiter Bemerkungen. Einen Screenshot eines beispielhaften FEP der internationalen FEP-Datenbank ist in Abb. 3.2 abgebildet. Die FEP sind weder standort-, wirtsgestein- noch konzeptspezifisch sondern generischer Form und bilden eine FEP-Liste mit orientierender Funktion für standortspezifische FEP-Kataloge. Die internationale FEP-Liste ist unterteilt in 4 Ebenen, wobei die unteren drei Ebenen nochmals in Kategorien aufgeteilt sind (siehe Abb. 3.1) /NEA 06/.

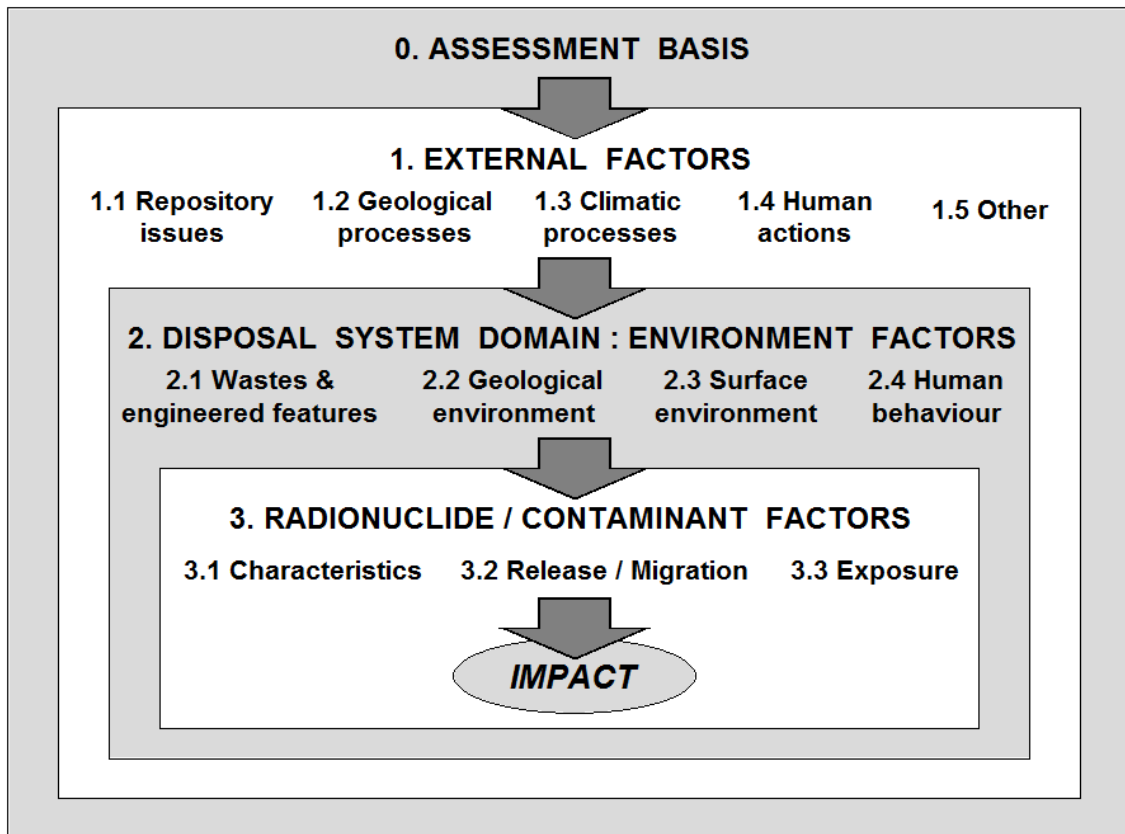


Abb. 3.1 Unterteilung der FEP in der internationalen FEP-Liste /NEA 06/

Die erste Ebene „Bewertungsbasis“ enthält Angaben zu den grundsätzlichen Faktoren die in die Sicherheitsbewertung eingehen. Dazu zählen: regulatorische Anforderungen, Festlegung von Berechnungswerten für die Bewertung und Anforderungen an die einzelnen Phasen der Sicherheitsbewertung /NEA 06/.

Die nächste Ebene „Externe Faktoren“ beinhaltet FEP, die von außerhalb des Endlagersystems ausgelöst werden oder die außerhalb des Endlagersystems stattfinden. Diese Ebene ist in folgende Kategorien unterteilt: „Eigenschaften des Endlagers“, „Geologische Prozesse und Effekte“, „Klimatische Prozesse und Effekte“, „Zukünftige menschliche Handlungen“ und „Weitere“ /NEA 06/.

Die dritte Ebene „Endlagersystem: Umweltfaktoren“ beinhaltet FEP, die im räumlichen Bereich des Endlagers in der Nachverschlussphase auftreten und dessen Auswirkungen die physikalische, chemische, biologische und menschliche Faktoren beeinflussen. Diese Faktoren sind für die Bestimmung von Freisetzung und Ausbreitung und damit für die radiologischen Konsequenzen für den Menschen relevant. Die Ebene ist in fol-

gende Kategorien unterteilt: „Abfall und technische Eigenschaften“, „geologische Umgebung“, „Umweltbedingungen über Tage“ und „menschliches Verhalten“ /NEA 06/.

Die letzte Ebene „Endlagersystem: Radionuklid- und Schadstofffaktoren“ beinhaltet FEP, welche die Freisetzung und Ausbreitung von Radionukliden in der Umgebung des Endlagersystems direkt beeinflussen oder welche die Dosis für den Menschen für eine bestimmte Konzentration von Radionukliden in der Umwelt direkt beeinflussen. Diese Ebene ist in folgenden Kategorien unterteilt: „Charakteristiken von Schadstoffen“, „Freisetzungs- und Ausbreitungsfaktoren“ und „Aussetzung von Strahlung“ /NEA 06/.

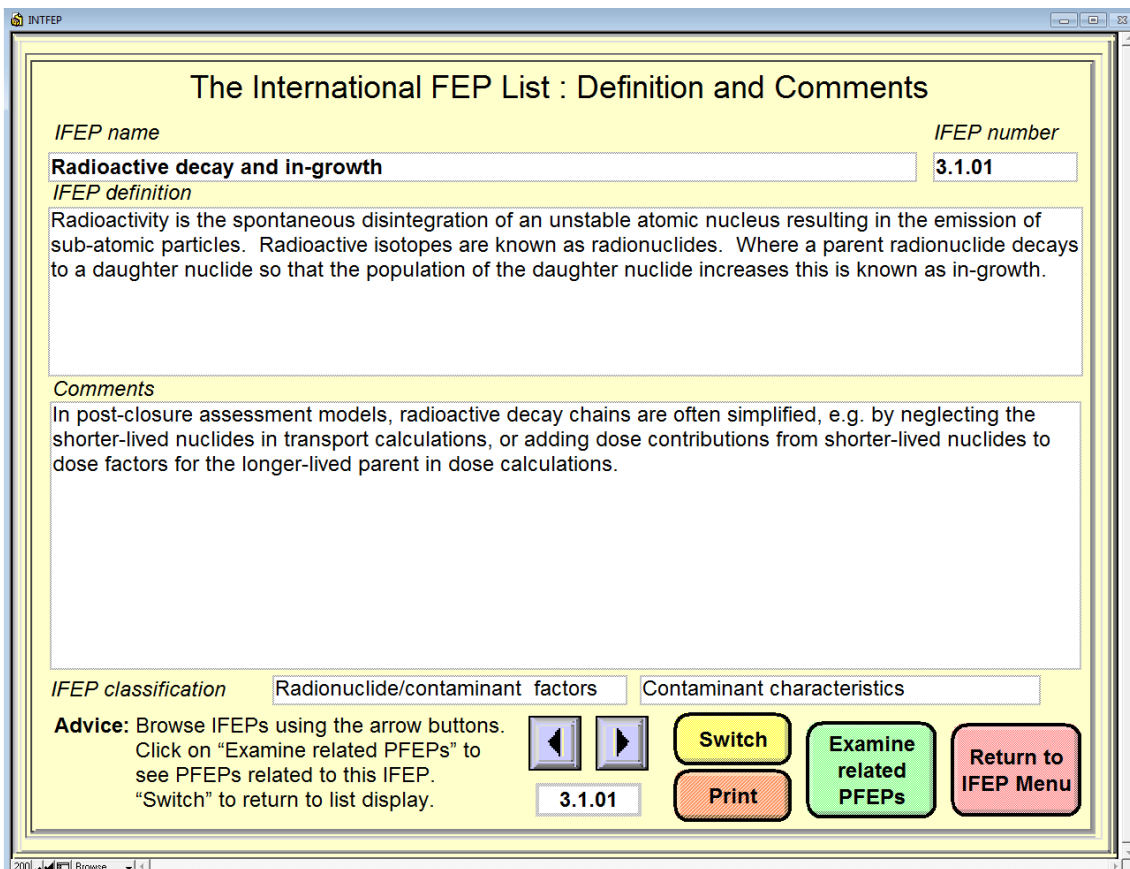


Abb. 3.2 Screenshot eines beispielhaften FEP aus der internationalen FEP-Datenbank /NEA 06/

Von den FEP in den Projekt Datenbanken wird zu den entsprechenden FEP aus der internationalen FEP-Liste verwiesen. D. h. für FEP aus der internationalen FEP-Liste können Beispiele aus den Projekt-Datenbanken zugeordnet werden /NEA 06/.

3.2 ISIBEL-Projekt FEP-Katalog

Im Rahmen des ISIBEL-Projekts wurde erstmals in Deutschland ein umfangreicher FEP-Katalog für einen Endlagerstandort für Brennelemente und hochradioaktive Abfälle in der norddeutschen Tiefebene am Beispiel des Standortes Gorleben erstellt. Für die Struktur des FEP-Kataloges wurde sich an der internationalen NEA-FEP-Datenbank orientiert /BUH 10/.

Weil der FEP-Katalog im ISIBEL-Projekt mit mehr als 100 FEP sehr umfangreich ist, wurde er in eine Datenbank überführt. Damit lassen sich verschiedene Funktionen wie Erstellung, Löschung, Kopie und Drucken von Datensätzen ermöglichen. Außerdem gibt es eine Suchfunktion und es können verschiedene Datenlisten erstellt sowie Konsistenzchecks zwischen Abhängigkeiten der FEP durchgeführt werden /BUH 10/.

Der FEP-Katalog wurde einem nationalen Peer Review unterzogen. Dabei wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen Anregungen geliefert, die einer weiteren Verbesserung des FEP-Kataloges dienen. Z. B. wurde angeregt, Gründe für getroffene Festlegungen, für eine bessere Transparenz und Nachvollziehbarkeit, detaillierter darzustellen und zu dokumentieren /BUH 10/.

Die Datenbank für die FEP im ISIBEL Projekt hatte eine Struktur die im Folgenden beschrieben wird. Genauer werden die einzelnen Attribute, die für die Beschreibung der FEP genutzt werden, aufgezählt und beschrieben. Als Orientierungshilfe dient dabei Abb. 3.3.

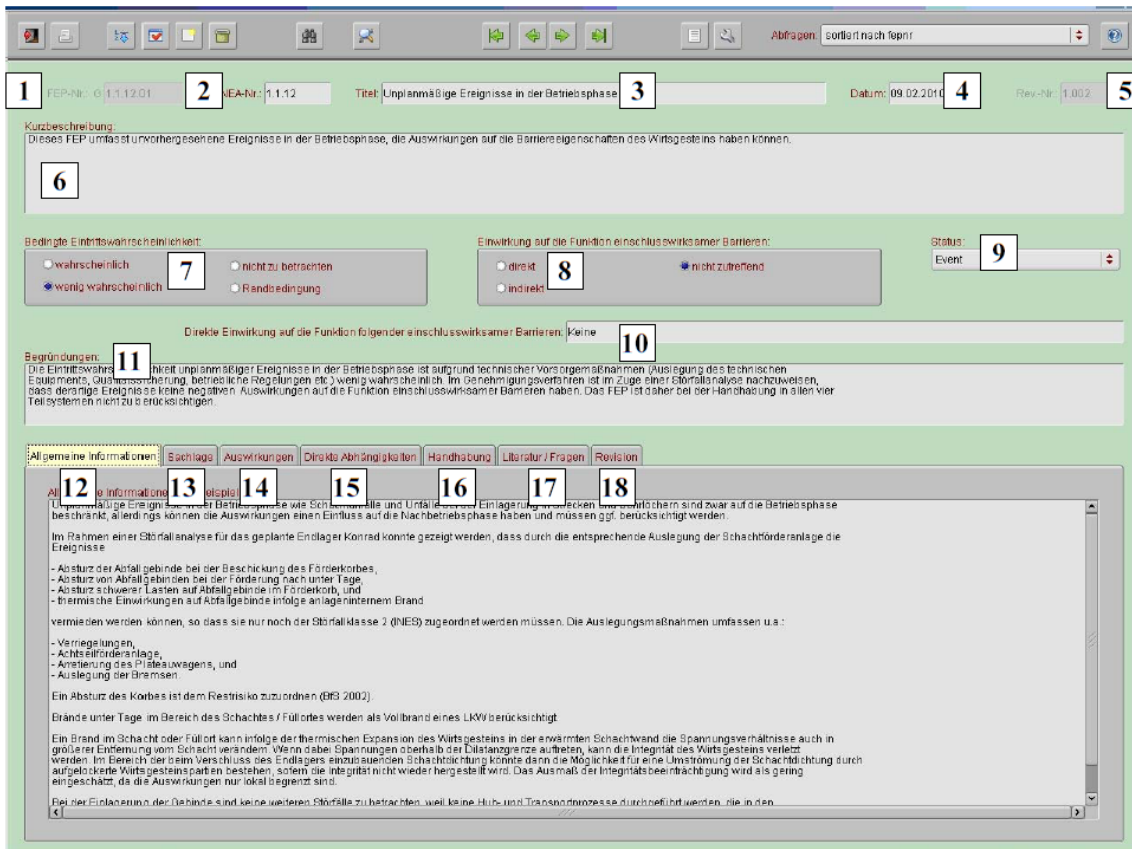


Abb. 3.3 Screenshot der ISIBEL-FEP-Datenbank /BUH 10/

Es gibt 18 Attribute (/BUH 10/):

1. FEP-Nr.

Dies ist eine eindeutige Kennzeichnung der FEP. Die FEP-Nr. ist, nach dem Vorbild der NEA-FEP-Datenbank, in vier Ebenen („a“ bis „d“) eingeteilt und orientiert sich an folgendem Nummernschema: „a.b.cc.dd“. Jede Ebene bezeichnet eine bestimmte Zuordnung der FEP. Die erste Ebene („a“) bezeichnet den Katalogabschnitt, die zweite Ebene („b“) bezeichnet die FEP-Kategorie, die dritte Ebene („cc“) bezeichnet den FEP-Typ und die vierte Ebene („dd“) bezeichnet den Untertyp. Zusätzlich beginnt die FEP-Nr. immer mit einem „G“ wie „Germany“, um die FEP in den internationalen NEA-FEP-Katalog integrieren zu können.

2. NEA-Nr.

Um eine nachvollziehbare Verbindung zum NEA-FEP-Katalog zu erreichen, wird hier die dreigliedrige FEP-Nr. der passenden FEP aus dem NEA-FEP-Katalog angegeben.

3. Titel
Ein möglichst aussagekräftiger Titel dient ebenfalls zur Identifikation der FEP.
4. Datum
Das Datum der letzten Änderung der FEP-Eigenschaften.
5. Revisionsnummer
Für eine transparente Dokumentation werden alle Revisionen (Zahl vor dem Punkt: 1.001) und alle Arbeitsversionen (Zahl nach dem Punkt: 1.001) in der Datenbank gespeichert. Dadurch ist ein Studium der Änderungen, die sich während der Entwicklung ergeben haben, möglich und somit eine Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses.
6. Kurzbeschreibung
Darstellung der Bedeutung einer FEP für des FEP-Katalog.
7. Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit
Es handelt sich hier um ein Auswahlfeld. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird in drei qualitative Gruppen eingeteilt – **wahrscheinlich**, **weniger wahrscheinlich** und **nicht zu betrachten**. Es gibt eine weitere Gruppe die als „**Randbedingung**“ bezeichnet wird. Hier werden als gesichert vorliegende Merkmale eines Standortes eingeordnet.
8. Einfluss auf die Funktion einschlusswirksamer Barrieren
Es handelt sich um ein Auswahlfeld. Es wird festgelegt, ob diese FEP einen **direkten**, einen **indirekten** oder keinen (**nicht zutreffend**) Einfluss auf die Funktion einer Barriere besitzt. Dabei werden nur negative Einflüsse berücksichtigt. Eine direkte Einflussnahme ist gegeben, wenn das FEP eine Funktion einer Barriere als unmittelbare Konsequenz der FEP vermindert bzw. vollständig außer Kraft setzt. Ein indirekter Einfluss ergibt sich, wenn eine von dieser FEP beeinflusste oder ausgelöste FEP einen direkten Einfluss auf eine Funktion einer Barriere besitzt.
9. Status
Es wird angegeben, ob es sich um ein Merkmal (Feature), Ereignis (Event) oder einen Prozess (Process) handelt.
10. Direkte Einwirkung auf die Funktion folgender einschlusswirksamer Barrieren:
Hier werden die betroffenen einschlusswirksamen Barrieren benannt, wenn als Attribut 8 ein direkter Einfluss angegeben wurde.

11. Begründung

Hier werden die getroffenen Entscheidungen für die Eingruppierung in die Wahrscheinlichkeitsgruppe der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit (Attribut 7), die Eingruppierung des Einflusses auf die Funktion von Barrieren (Attribute 8 und 10) und die Handhabung (Attribut 16) mit Informationen und Argumenten gerechtfertigt. Das gilt insbesondere wenn die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit „weniger wahrscheinlich“ oder „nicht zu betrachten“ lautet.

12. Allgemeine Informationen und Beispiel

Die Kurzbezeichnung (Attribut 6) kann hier weiter ausgeführt und an einem Beispiel gezeigt werden.

13. Sachlage im betrachteten Endlagersystem

Beschreibung des Eintretens und der Ausprägung am Standort in der Vergangenheit und in der Zukunft.

14. Auswirkungen

Nennung und Beschreibung der durch diese FEP ausgelösten/resultierenden Veränderungen gegenüber dem Ist-Zustand.

15. Direkte Abhängigkeiten

Direkte Abhängigkeiten werden in vier Kategorien eingeteilt. Deswegen gibt es unter diesem Attribut auch vier Felder (auslösenden und beeinflussende sowie resultierende und beeinflussende FEP)

16. Handhabung

Hier wird die Bedeutung des FEP für jedes Teilsystem (Nahfeld, Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge) beschrieben. Dabei wird zusätzlich auf eventuelle zeitliche Beschränkungen eingegangen. Zudem werden Angaben darüber gemacht, ob und wo diese FEP bei der Szenarienentwicklung aufgrund der standortspezifischen Ausprägung berücksichtigt werden muss.

17. Literatur / Fragen

Hier werden verwendete Literaturzitate und ergänzende Literatur angegeben. In einem weiteren Feld können offene Fragen formuliert und Forschungsbedarf definiert werden.

18. Revision

Die durchgeführten Änderungen der FEP-Eigenschaften werden in Form von Revisionsversionen und Arbeitsversionen chronologisch aufgelistet. Dabei sollte eine

kurze und prägnante Beschreibung die Änderungen / Neuerungen jeder Version kurz darstellen.

3.3 VerSi-Projekt FEP-Katalog

Die FEP-Datengrundlage im VerSi-Projekt wurde aus verschiedenen anderen FEP-Katalogen zusammengestellt. Es wurden folgende FEP-Kataloge genutzt (/BEU 10/):

- NEA (2006) International NEAFEP Database V2.1
- NAGRA (2007) Opalinuston FEP-Screening
- ISIBEL (2008) Salzstock FEP-Katalog
- GSF (2004) ASSE FEP-Datenbasis
- BGR (2001) Gorleben FEP-Zusammenstellung

Die letztendliche FEP-Datenbasis (FEP-Katalog) für das VerSi Projekt werden in drei Hauptgruppen eingeteilt (/BEU 10/):

- Natürliche Phänomene,
- Anthropogen induzierte Phänomene und
- Abfall- und Endlager-induzierte Phänomene.

Die Hauptgruppen werden weiter in Untergruppen aufgeteilt (siehe Abb. 3.4). Die FEP-Datenbasis besitzt folgende Datenfelder für jedes FEP:

- Strukturfelder
 - Hauptgruppe (Nr. und Name),
 - Untergruppe (Nr. und Name) und
 - FEP (Nr. und Name)
- Eigenschaftsfelder
 - FEP-Art (ob es sich bei dem FEP um ein Feature oder Event oder Process handelt),
 - Bezug (ob das FEP sich auf Salz oder Ton oder auf beide bezieht) und

- Bemerkungsfeld (enthält einen entsprechenden Vermerk, wenn das FEP neu aufgenommen wurde) /BEU 10/

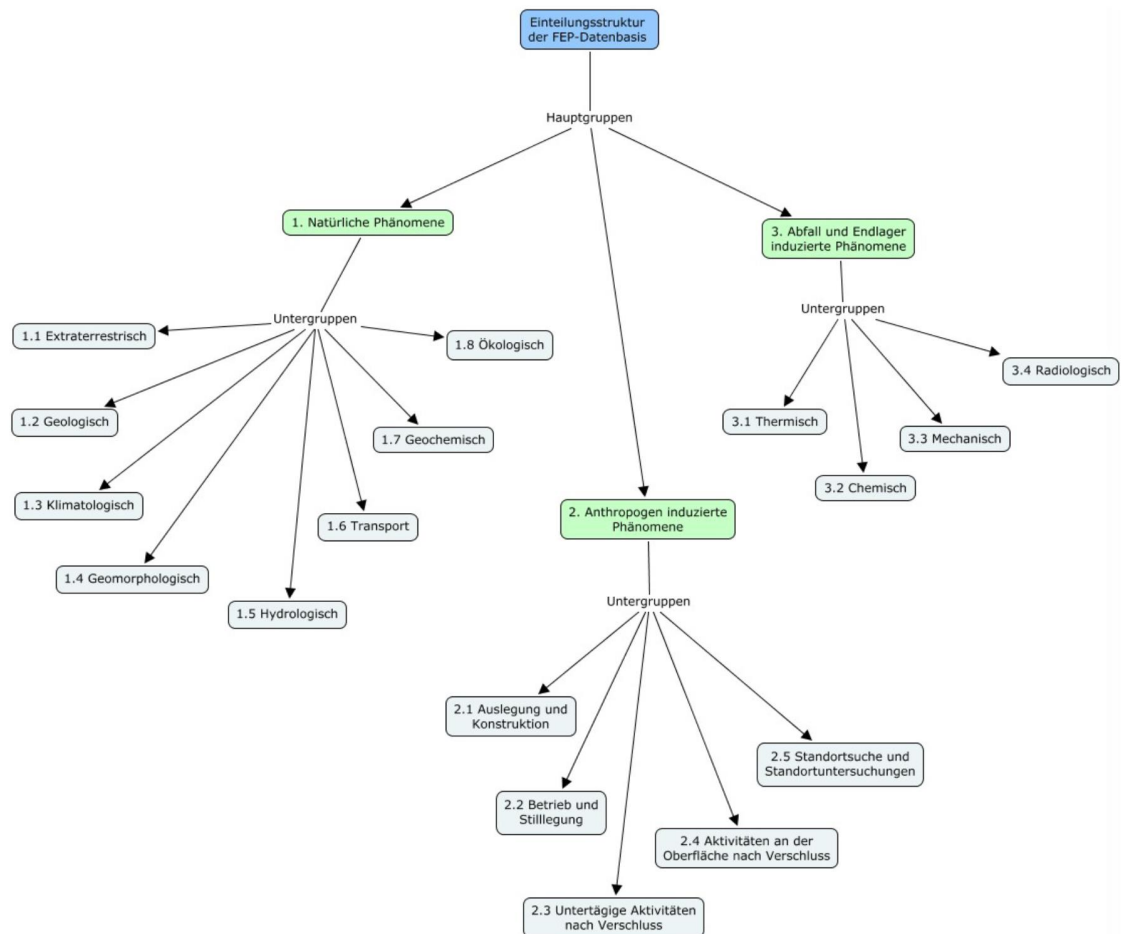


Abb. 3.4 Darstellung der Einteilungsstruktur von FEP in Haupt- und Untergruppen im VerSi-Projekt /BEU 10/

Im VerSi-Projekt wurden die FEP in drei Haupt- und mehrere Untergruppen aufgeteilt. Die drei Hauptgruppen sind in grünen Kästchen dargestellt und lauten „Natürliche Phänomene“, „Anthropogen induzierte Phänomene“ und „Abfall und Endlager induzierte Phänomene“. Die Untergruppen sind in hellblauen Kästchen dargestellt.

3.4 VSG-Projekt FEP-Katalog

Als Grundlage für den FEP-Katalog im VSG-Projekt wurde der FEP-Katalog aus dem ISIBEL-Projekt genutzt. Dieser wurde noch während der Laufzeit des Vorhabens einem externen Review unterzogen und überarbeitet. Obwohl sich der ISIBEL-FEP-Katalog auf den Standort Gorleben bezieht wurden die Struktur und die Inhalte der FEP systematisch hinterfragt. Die anschließenden Änderungen und Ergänzungen berücksichtig-

ten auch Anmerkungen aus dem Review, die noch nicht umgesetzt wurden. Anpassungen mussten vor allem in Bezug auf folgende Punkte gemacht werden:

- Im Gegensatz zum ISIBEL-Projekt wurden im VSG-Projekt spezifische Endlagerkonzepte zu Grunde gelegt.
- Im VSG-Projekt wurden zusätzlich zu den im Projekt ISIBEL betrachteten Abfallspektren auch Brennelemente aus Forschungsreaktoren und vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle wie z.B. Urantails berücksichtigt.
- Im VSG-Projekt wurde erstmalig die Rückholbarkeit in ein Endlagerkonzept integriert.
- Geologische Aspekte wurden detaillierter in mehreren FEP dargestellt.

Der FEP-Katalog aus dem VSG-Projekt wurde in einer Datenbank organisiert. Ein Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche ist in Abb. 3.5 dargestellt. Es werden folgende Angaben zu jedem FEP gemacht (/WOL 12b/):

- eine Definition bzw. Kurzbeschreibung,
- allgemeine Informationen und Beispiele,
- die Sachlage am Standort Gorleben,
- die Auswirkungen des FEP im Endlagersystem,
- mögliche zeitliche Beschränkungen des FEP,
- die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit,
- die Wirkung in den Teilsystemen,
- die Beeinträchtigung der Funktion der Initial-Barrieren,
- Begründungen zu den o. g. Aspekten,
- die direkten Abhängigkeiten zu anderen FEP,
- offene Fragen und
- Literaturquellen.

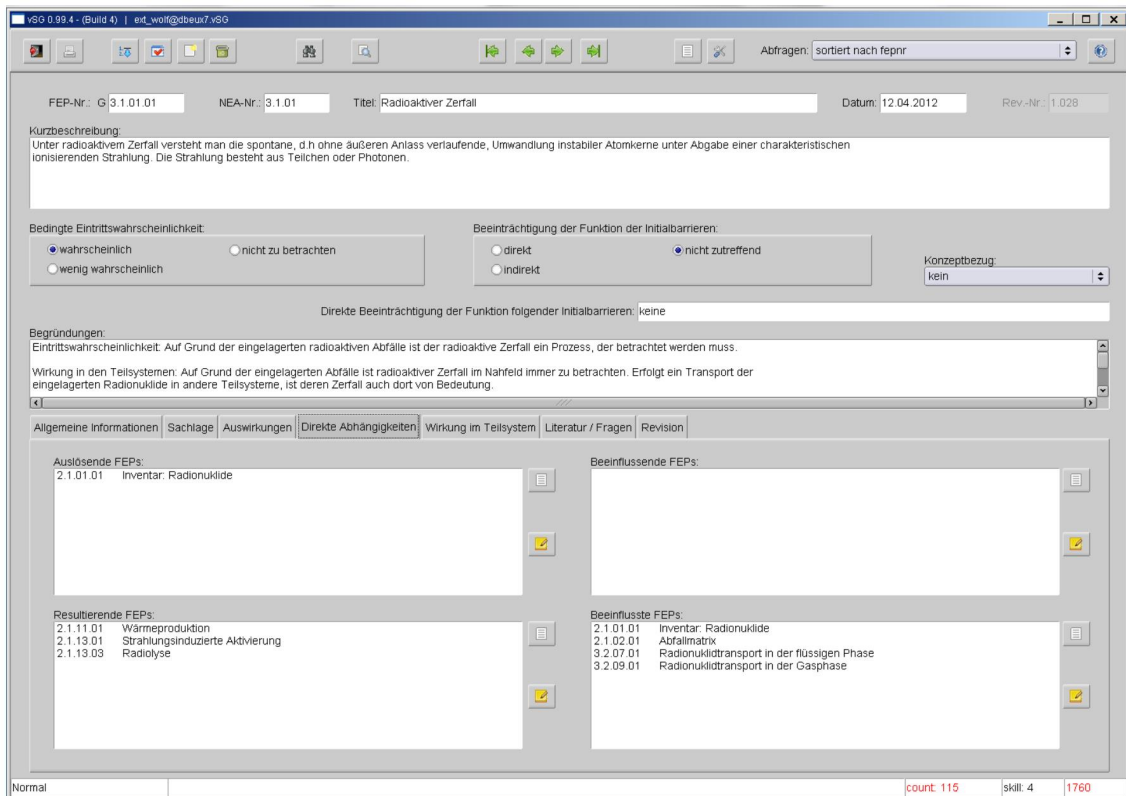


Abb. 3.5 Grafische Benutzeroberfläche der VSG-FEP-Datenbank am Beispiel des FEP "Radioaktiver Zerfall" /WOL 12b/

Die Benutzeroberfläche der Datenbank ist in einen Kopfteil und einen Registerkartenteil gegliedert. Der VSG-FEP-Katalog enthält 18 Datenfelder, die jedes FEP beschreiben. Die Datenfelder werden im Folgenden genannt und kurz erläutert:

1. FEP-Nr.
Ermöglicht eine eindeutige Kennzeichnung des FEP, beginnt immer mit dem Buchstaben „G“ für Gorleben und ist eine vierstufige Nummer, wobei die ersten drei Stufen der entsprechenden FEP-Nr. aus der NEA-FEP-Datenbank entsprechen. Die vierte Stelle wird genutzt, falls ein NEA-FEP in mehrere FEP für den VSG-FEP-Katalog aufgeteilt wurde.
2. NEA-Nr.
Die FEP-Nummer des entsprechenden FEP aus der NEA-FEP-Datenbank.
3. FEP-Titel
aussagekräftiger Titel

4. Datum
Für jede Revision wird das zugehörige Datum angegeben. Alle vorangegangenen Revisionen sind gespeichert.
5. Kurzbeschreibung
Kurze Beschreibung des FEP
6. Bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit
Einteilung in eine der drei Wahrscheinlichkeitsklassen (wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich und nicht zu betrachten).
7. Beeinträchtigung der Funktion folgender Initial-Barrieren
Direkte Beeinträchtigungen liegen vor, wenn das FEP die Ursache für einen negativen Einfluss auf die Funktion einer Initialen-Barriere ist. Indirekte Beeinträchtigungen liegen vor, wenn das FEP eine andere FEP beeinflusst oder auslöst, das eine direkte Beeinträchtigung auf eine Initial-Barriere aufweist.
8. Konzeptbezug
Angabe auf welche(s) Konzept(e) sich das FEP bezieht.
9. Begründungen
Dokumentation der Begründungen für die Datenfelder: bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit, Wirkung in den Teilsystemen und Beeinträchtigung der Funktion einer Initial-Barriere.
10. Allgemeine Informationen und Beispiele
Auf Grundlage der Kurzbeschreibung können hier weitere Informationen und Beispiele angegeben werden.
11. Sachlage
Darstellung des derzeitigen oder früheren Eintretens bzw. der Ausprägung des FEP am betrachteten Standort.
12. Auswirkungen
Angabe von dem FEP hervorgerufenen möglichen Veränderungen am Standort gegenüber dem Ausgangszustand.
13. Zeitliche Beschränkung
Falls ein FEP nur in einem bestimmten Zeitraum auftreten kann bzw. wirksam werden kann, wird dies hier angegeben.

14. Direkte Abhängigkeiten

Direkte Abhängigkeiten werden in vier verschiedenen Kategorien angegeben: Auslösendes FEP, beeinflussendes FEP, resultierendes FEP und beeinflusstes FEP (siehe dazu auch

15. Abb. 2.10).

16. Wirkung im Teilsystem

Angabe der Teilsysteme in denen das FEP stattfindet oder vorhanden ist.

17. Offene Fragen

Aspekte in Bezug auf das FEP die noch bearbeitet werden müssen bzw. Fragen für deren Beantwortung noch weitere Arbeiten durchgeführt werden müssen. Die hier genannten Aspekte stellen keinen FuE-Bedarf im eigentlichen Sinne dar.

18. Literatur / Fragen

Angabe von Literaturzitaten, die in dieser FEP-Beschreibung genutzt werden.

19. Revision

Neben der Revisionsnummer werden auch Arbeitsversionen nummeriert und gespeichert. Zusätzlich werden alle vorgenommenen Änderungen chronologisch gespeichert.

3.5 SR-Site-FEP-Katalog (SKB)

Als Grundlage für den SR-Site-FEP-Katalog wurde der FEP-Katalog aus dem vorangegangenen Projekt „SR-Can“ genutzt. Der SR-Can-FEP-Katalog wurde überarbeitet. In beide FEP-Kataloge wurden alle FEP aus der, zum jeweiligen Zeitpunkt aktuellen Version der NEA-FEP-Datenbank integriert. Der SR-Site-FEP-Katalog hat 407 Einträge, die in folgende sechs Kategorien eingeteilt werden (/SVE 10/):

- Ausgangszustands-FEP
- Prozesse im Abfall, im Abfallgebände, im Bentonit-Versatz, im Versatz, im Tunnelverschluss, im Zentralteil, in der oberen Abdichtung, in der Grundplatte im Bohrloch, im Bohrlochverschluss und in der Geosphäre.
- Variablen im Abfall, im Abfallgebände, im Bentonit-Versatz, im Versatz, im Tunnelverschluss, im Zentralteil, in der oberen Abdichtung, in der Grundplatte im Bohrloch, im Bohrlochverschluss und in der Geosphäre.


- Biosphären-FEP
- Externe FEP
- Methodische Aspekte (z. B. „Bewertungsgrundlage“ und „Methodische Aspekte“)

Zu jedem dieser Kategorien gibt es i. d. R. mindestens einen eigenständigen Bericht, auf den, von dem entsprechenden FEP, aus dem FEP-Katalog auf die entsprechende Stelle im Bericht verwiesen wird /SVE 10/.

Im SR-Site-FEP-Katalog gibt es für jeden FEP-Eintrag folgende 5 Datenfelder:

1. SR-Site-FEP-ID
2. FEP Name
3. Kurzbeschreibung/Definition
4. Angaben zu dem Umgang mit dem FEP im SR-Site-Projekt
5. Verweise auf tiefergehende Berichte /SVE 10/

FEP, für die eine Verbindung zu FEP aus der NEA-FEP-Datenbank besteht, ist eine entsprechende Verlinkung zur NEA-FEP-Datenbank angegeben. Eine weitere Verlinkung zu entsprechenden Interaktionsmatrizen für eine FEP wird hinterlegt. Prozessdiagramme (siehe Abb. 3.7), die automatisch ausgehend von den Interaktionsmatrizen generiert werden, sind ebenfalls verlinkt. Die FEP-Einträge haben eine Verlinkung zu den Prozesstabellen. Außerdem sind die FEP der Kategorie „Variablen“ verlinkt mit den zugehörigen „Ausgangszustands FEP“ bzw. „Prozess-FEP“ sowie den Variablen tabellen, in denen die verschiedenen Zustände der Variable beschrieben werden /SVE 10/.



FEP catalogue
Version: SR-Site

SR-Site FEP record

Start menu
FEP database

Internal process

Fuel/cavity in canister

Radioactive decay

F01

Description/Definition

Transformation of radionuclides in the fuel due to radioactive decay.

Handling in SR-Site

Intact canister. Thermal model.
Failed canister. COMP23

References:

SR-Site Fuel and canister process report, TR-10-46

Section number

1.6, 2.1.1

Linked NEA FEPs

Process diagram

List Internal processes

Linked Matrix interactions

Content categories

Return to List Found records

Abb. 3.6 Grundsätzliche Informationen in einem FEP-Eintrag im SR-Site-FEP-Katalog /SVE 10/

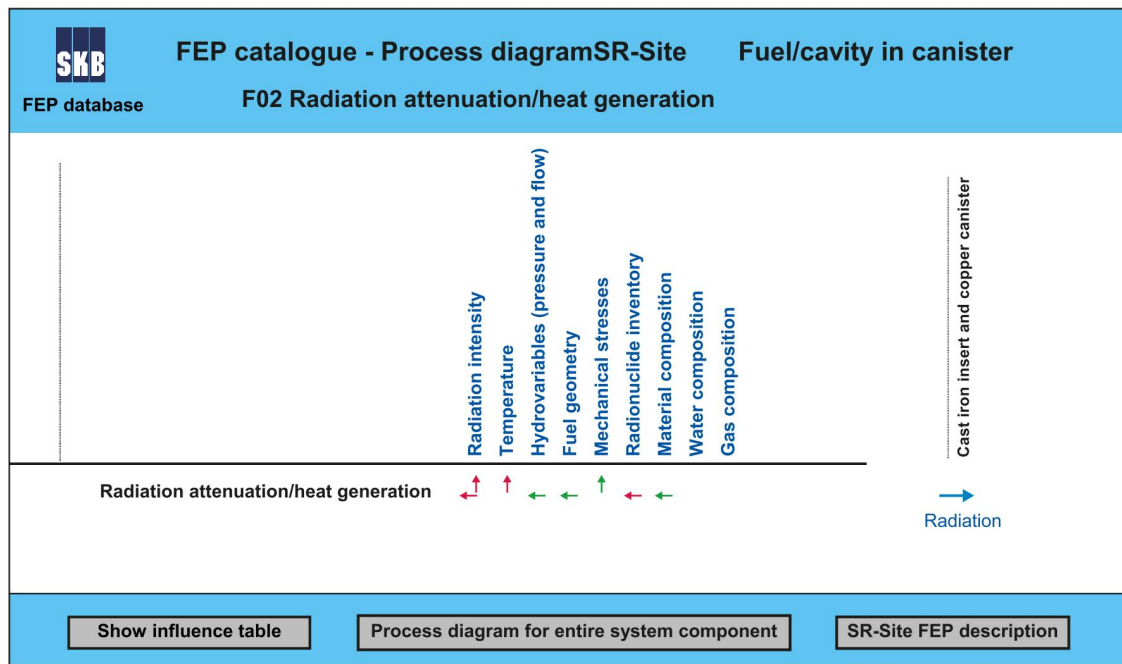


Abb. 3.7 Beispiel für ein automatisch aus den Interaktionsmatrizen generiertes Prozessdiagramm aus dem SR-Site-FEP-Katalog. Interaktionen zwischen Prozessen und Systemkomponenten werden mit roten Pfeilen dargestellt, wenn sie in der Bewertung behandelt werden. Grüne Pfeile stehen für nicht berücksichtigte Interaktionen /SVE 10/

3.6 Zusammenfassung

Die FEP-Kataloge aus Endlagerprojekten dienen i. d. R. der Sammlung von Erscheinungen (Phänomenen; Merkmale, Ereignisse und Prozesse). Dabei wird für jedes Element im FEP-Katalog eine Art Steckbrief erstellt, in dem alle zu diesem Element wichtigen Informationen enthalten sind. Der „Steckbrief“ kann auch nur Verweise auf Berichte enthalten, die die wichtigen Informationen beinhalten. FEP-Kataloge beinhalten Merkmale, Ereignisse und Prozesse mit denen Szenarien gebildet werden können und sind nach Wirtsgestein, Einlagerungskonzept und damit nach Standort zu differenzieren. Außerdem lässt sich anhand der FEP-Listen ein einfacher Abgleich mit anderen Listen/Datenbanken durchführen, was die Überprüfung der Vollständigkeit erleichtert.

Aus den Ausführungen in den Kapiteln 3.1 bis 3.5 kann eine gewisse Grundstruktur für die FEP-Kataloge abgeleitet werden. Beispielsweise beinhaltet jede FEP immer mindestens folgende Informationen:

- eine eindeutige Bezeichnung für jede FEP (FEP-Nummer/-ID),

- eine treffende Kurzbezeichnung,
- eine Kurzbeschreibung,

Der VSG-FEP-Katalog stellt eine Weiterentwicklung der FEP-Kataloge aus den Projekten ISIBEL und VerSi dar, deswegen wird der VSG-FEP-Katalog stellvertretend für die ISIBEL- und VerSi-FEP-Kataloge betrachtet. Die NEA-FEP-Datenbank ist eine universelle FEP-Datenbank und damit am wenigsten detailliert. Deswegen wird die NEA-FEP-Datenbank nicht näher betrachtet. Bei der Erstellung der FEP-Kataloge wurde sich am Aufbau der NEA-FEP-Datenbank orientiert. Aus diesen Gründen wird im Folgenden nur auf den VSG-FEP-Katalog und den SR-Site-FEP-Katalog eingegangen.

Der FEP-Katalog des VSG-Projektes /WOL 12a/ unterscheidet sich vom FEP-Katalog des SR-Site Projektes /SVE 10/ darin, dass im VSG-FEP-Katalog alle Informationen im FEP-Katalog direkt zu finden sind. Deshalb ist der VSG-FEP-Katalog auch sehr umfangreich. Der SR-Site-FEP-Katalog hat lediglich die wichtigsten Informationen im Katalog selbst stehen und verweist für detailliertere sowie zusätzliche Informationen auf andere Berichte. Der Vorteil des VSG-FEP-Kataloges liegt dagegen in der Übersichtlichkeit, da die wichtigsten Aussagen aus den Berichten im FEP-Katalog zusammengefasst angegeben sind. Durch die umfangreichen Angaben in den FEP-Katalogen kann einfacher nachvollzogen werden, wie mit jedem einzelnen FEP in der Bewertung der Sicherheit für die Nachverschlussphase umgegangen wird.

Für die Szenarientwicklung der Nachverschlussphase werden die Begriffe Feature, Event und Process in /FIS 13/ folgendermaßen definiert:

Ein **Feature (Merkmal)** ist eine Bedingung oder eine Gegebenheit, welches ein bestimmtes System oder Teilsystem zum Zeitpunkt des Ausgangszustandes beschreibt, wie z. B. das Radionuklidinventar oder die Porosität des Versatzes.

Ein **Event (Ereignis)** ist ein Vorgang oder eine Veränderung, die über einen sehr kurzen Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum abläuft. Dazu zählen beispielsweise Erdbeben oder menschliche Eingriffe im Bereich des Endlagers. Events beziehen sich i. A. auf die Entwicklung des Endlagersystems.

Ein **Process (Prozess)** ist ein Vorgang und eine Veränderung, der über einen länger andauernden Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum abläuft. Dazu zählen bei-

spielsweise Konvergenz, Diapirismus oder der Zerfall langlebiger Radionuklide (über mehrere 100.000 Jahre). Prozesse beziehen sich i. A. auf die Entwicklung des Endlagersystems.

4 **Ansatz für Übertragung von Vorgehensweisen**

In diesem Kapitel wird ein Ansatz für eine Übertragung der Vorgehensweise in der Szenarienentwicklung auf die Ereignisanalyse beschrieben. Dazu wird in Kapitel 4.1 auf die Übernahme eines FEP-Kataloges in die Betriebsphase eingegangen. Kapitel 4.2 befasst sich mit der Herleitung von Sicherheitsfunktionen für die Betriebsphase.

In der Ereignisanalyse (Störfallauswahl) werden Störfälle bzw. Ereignisse in der Betriebsphase bisher durch Analyse der relevanten Betriebsabläufe per *Expert Judgment* abgeleitet /BFS 96/. Dieses Vorgehen ist mit der Vorgehensweise in den ersten Entwicklungsphasen der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase vergleichbar.

Die Szenarienentwicklung nutzt zwei Ansätze zur Ableitung von Szenarien: den Bottom-Up und den Top-Down Ansatz. Beide Ansätze könnten in die Ereignisanalyse übertragen werden und in Kombination zum Einsatz kommen.

4.1 **Struktureller Aufbau (FEP)**

FEP in der Szenarienentwicklung dienen der systematischen Ableitung von Szenarien der Nachverschlussphase. Eine genaue Unterscheidung zwischen Features, Events und Processes gestaltet sich in der Praxis zwar schwierig, ist aber auch für die Szenarienentwicklung nicht zwingend erforderlich. Wesentlich ist nur, dass möglichst alle Erscheinungen (Phänomene), die sich auf die Sicherheit in der Nachverschlussphase auswirken könnten, im FEP-Katalog berücksichtigt sind. Der FEP-Katalog dient daher nur als Ausgangspunkt der Untersuchung etwaiger Auswirkungen jedes enthaltenen Elements (Phänomens), egal ob Feature, Event oder Process, auf die Sicherheit. Es können dabei auch Abhängigkeiten zwischen einzelnen FEP berücksichtigt werden.

Die Einhaltung der Sicherheit wird in der Nachverschlussphase durch verschiedene Funktionen (Sicherheitsfunktionen) beschrieben. Beispielsweise stellt die Dichtheit einer technischen oder geologischen Barriere eine Sicherheitsfunktion dar. Die Eigenschaft Dichtheit bezieht sich dabei auf die Permeabilität des Barrierenmaterials. Die Permeabilität des Barrierenmaterials trägt damit zur Sicherheit des Endlagers bei. Die Permeabilität kann somit als sicherheitsfunktionsbedingende Eigenschaft bezeichnet werden.

Das Ziel bei der Szenarienentwicklung ist es, die FEP zu identifizieren, die einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktionen bzw. sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften haben und damit die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen.

Diese Vorgehensweise kann grundsätzlich „eins-zu-eins“ auf die Betriebsphase übertragen werden. Eine „eins-zu-eins“ Übertragung der grundsätzlichen Vorgehensweise ist die naheliegende Möglichkeit der Übertragung. Die einzelnen FEP, die für die Nachverschlussphase relevant sind, unterscheiden sich hingegen teilweise von denen die für die Betriebsphase bedeutsam sind. Grund dafür ist der unterschiedliche Betrachtungszeitraum der Nachverschlussphase (eine Million Jahre) gegenüber dem der Betriebsphase (einige zehner bis hundert Jahre).

Um nah bei der Definition der FEP für die Nachverschlussphase zu bleiben, könnten die FEP für die Betriebsphase von Endlagern wie folgt definiert werden:

Features sind statische Merkmal die einen Zustand beschreiben.

Events sind spontane Ereignisse.

Processes sind ablaufende Prozesse während der Betriebsphase.

Die FEP der Betriebsphase sollen im Gegensatz zu den FEP der Nachverschlussphase eindeutig deren Kategorien zugeordnet werden können.

Angedacht ist es, unter Features die Eigenschaften von Komponenten zu betrachten, z. B. die Festigkeit einer Schraube. In Events werden spontane Ereignisse wie Einwirkungen von innen (EVI) und Einwirkungen von außen (EVA) betrachtet. Eine EVI wäre beispielsweise eine menschliche Fehlhandlung. Ein Erdbeben z. B. wäre eine EVA. Zu Processes zählen hingegen Alterungsprozesse wie Korrosion und Verschleißprozesse wie Abnutzung u. Ä.

Ein Unterschied der Betriebsphase gegenüber der Nachverschlussphase ist, dass in der Nachverschlussphase die Sicherheit nur von Features bzw. deren sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften abhängig ist. Beeinflusst werden können die sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften durch natürlich ablaufende Prozesse im Endlagersystem (Processes), Ereignisse im Endlagersystem (Events) bzw. durch statische unentdeckte Fehler bezüglich der sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften

(Features). Menschliche Handlungen spielen in der Nachverschlussphase nur in Ausnahmefällen (Human Intrusion Szenarien) eine Rolle.

Im Gegensatz dazu beeinflusst der Mensch und seine Handlungen die Sicherheit in der Betriebsphase, weil er in der Betriebsphase eine aktive Rolle einnimmt. Dieser Einfluss kann sowohl negativ (Fehlhandlungen) also auch positiv (organisatorische Maßnahmen, Gegenmaßnahmen bei Störfällen) in Bezug auf die Sicherheit sein.

Die Sicherheit in der Betriebsphase wird neben Eigenschaften sicherheitsrelevanter Komponenten (sicherheitsfunktionsbedingende Eigenschaften) auch durch organisatorische Maßnahmen (sicherheitsfunktionsbedingende Maßnahmen) gewährleistet.

Im klassischen FEP-Katalog werden die sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften in Form von Features berücksichtigt. Die sicherheitsfunktionsbedingenden Maßnahmen werden hingegen nicht berücksichtigt, weil es diese in der Nachverschlussphase nicht gibt. Eine Lösung für die Berücksichtigung von sicherheitsfunktionsbedingenden Maßnahmen muss gefunden werden.

Streng betrachtet, könnten nach der Definition von Processes die Betriebsabläufe auch unter Processes gefasst werden.

Die Kategorie Features können unterschiedlich detailliert ausgeführt werden. Ziel ist es hier die sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften übersichtlich darzustellen. Aus diesem Grund würde sich eine hierarchische Darstellung wie in Abb. 4.1 anbieten.

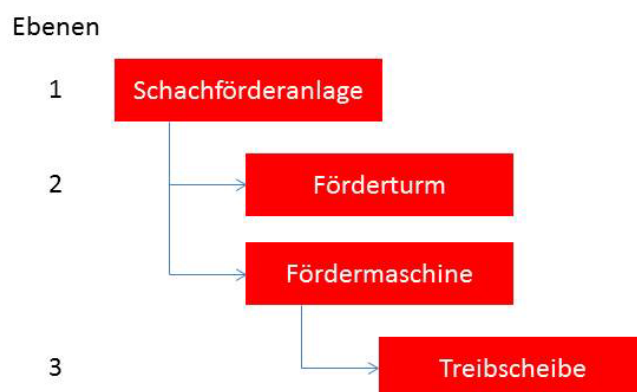


Abb. 4.1 Beispieldarstellung der hierarchischen Struktur von Komponenten in der Kategorie „Features“ in drei Ebenen

Diese hierarchische Aufschlüsselung von Komponenten ist nur für diejenigen Komponenten erforderlich, die sicherheitsrelevant sind. Denn für die sicherheitsrelevanten Komponenten ist die Darstellung der sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften erforderlich.

Die hierarchische Darstellung von Komponenten ist außerdem erforderlich, um das Ziel der Strukturierung bzw. Modularisierung der Störfallanalyse zu erreichen.

Beispielsweise gibt es die Komponente „Schachtförderanlage“, diese besteht aus weiteren Komponenten wie z. B. dem „Förderkorb“ und der „Fördermaschine“. Diese bestehen wiederum aus Einzelkomponenten (z. B. „Treibscheibe“). Diese Aufschlüsselung muss nur für sicherheitsrelevante Komponenten erfolgen. Für diese jedoch bis hin zu sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften. Siehe dazu auch Abb. 2.14.

Trotz der „eins-zu-eins“ Übernahme der FEP aus der Nachverschlussphase in die Betriebsphase und damit der Übernahme der Bezeichnung (FEP) wäre eine abweichende Bezeichnung sinnvoll. Das hätte eine Abgrenzung gegenüber der Nachverschlussphase und damit eine Vermeidung von Missverständnissen zur Folge.

Mit einer internationalen Nutzung eines FEP-Kataloges für die Betriebsphase, sind Vergleiche mit anderen Endlagerprojekten auf mehreren Ebenen möglich. Nicht nur die Liste der potenziellen Störfälle (Incident List) kann abgeglichen werden, auch die Listen der Komponenten (Features), der EVI und EVA (Events) sowie der Prozesse (Processes) könnten leichter abgeglichen werden. Damit könnte ein wichtiger Beitrag zum Erreichen der Vollständigkeit der Störfallliste geleistet werden.

Um ein FEP für die Betriebsphase zu beschreiben, sollte es mindestens folgende Informationen enthalten:

- eine eindeutige Bezeichnung für jede FEP (FEP-Nummer/-ID),
- eine treffende Kurzbezeichnung,
- eine Beschreibung,
- die FEP-Art (Feature, Event oder Process)
- Eintrittswahrscheinlichkeit/Häufigkeit
- Relevanz für welchen Anlagenbereich (über Tage, Schachtanlage, unter Tage)

- Direkte Abhängigkeiten zwischen den FEP
- Begründungen
- Literatur

Diese Informationen sind zu meist endlagerspezifisch und können nur nach Durchführung einer Störfallanalyse gegeben werden. Im Anhang A werden für die drei Kategorien (Features, Events und Processes) Beispiele für betriebliche FEP gegeben. Als Grundlage für diese Beispiele wurde die Störfallanalyse Konrad herangezogen.

Das Ergebnis der Ereignisanalyse ist die Störfallliste (Incident List). Diese beinhaltet potenzielle Störfälle in einem Endlager. Störfalllisten existieren bereits in den unterschiedlichen nationalen und internationalen Endlagerprojekten (z. B. „General Hazards Matrix“ aus GEOSAF I /GEO 11a/ oder die „RWMD List of Faults“ /NDA 15/ von Großbritannien). Sie entsprechen dem Stand des jeweiligen Projektes und werden bereits zum Abgleich genutzt. Mit einer FEP-Liste für die Betriebsphase soll eine strukturierte Grundlage zur Ableitung von Störfällen geliefert werden. Damit ist eine FEP-Liste für die Betriebsphase chronologisch gesehen vor der Störfallliste einzuordnen. Die Störfallliste kann, wenn nötig, in weitere Untergruppen aufgeteilt werden und soll den Vergleich mit anderen Störfalllisten aus anderen Endlagerprojekten, ggf. anderen kerntechnischen Anlagen und vergleichbaren konventionellen Anlagen erleichtern.

4.2 Herleitung von Sicherheitsfunktionen

Die Sicherheitsfunktionen sollten nach dem Vorbild der Vorgehensweise in der Szenarientwicklung in Belgien (siehe Abb. 2.14) hierarchisch abgeleitet werden. Das bedeutet es würden zunächst grundsätzliche Schutzziele ausgehend von regulatorischen Anforderungen definiert werden.

In Deutschland sind regulatorische Anforderungen für Endlager im AtG /BUN 15/ (§ 1 Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen) und in der StrlSchV /BUN 16/ festgelegt (§ 6 Vermeidungs- und Minimierungsgebot von Strahlenexpositionen) beschrieben.

Diese regulatorischen Anforderungen bilden die Grundlage für Sicherheitsfunktionen in Bezug auf ein Endlager für radioaktive Abfälle und stehen in der obersten Ebene der

Hierarchie für die Sicherheitsfunktionen (siehe blaue Ebene in Abb. 4.2). Ausgehend von diesen werden die grundlegenden Sicherheitsfunktionen (Ebene 2; graue Ebene in Abb. 4.2) gebildet und können weiter aufgeschlüsselt werden (tiefere Ebenen).

Am Ende steht in der untersten Ebene immer eine Eigenschaft einer Komponente, bzw. eine organisatorische Maßnahme, die die Erfüllung der übergeordneten Sicherheitsfunktionen bedingt. Damit sind Sicherheitsfunktionen an eine oder mehrere Komponenten bzw. an organisatorische Maßnahmen gebunden. Diese abgeleiteten Komponenteneigenschaften bzw. organisatorischen Maßnahmen werden als sicherheitsfunktionsbedingenden Eigenschaften bzw. Maßnahmen bezeichnet. Siehe dazu Abb. 4.2.

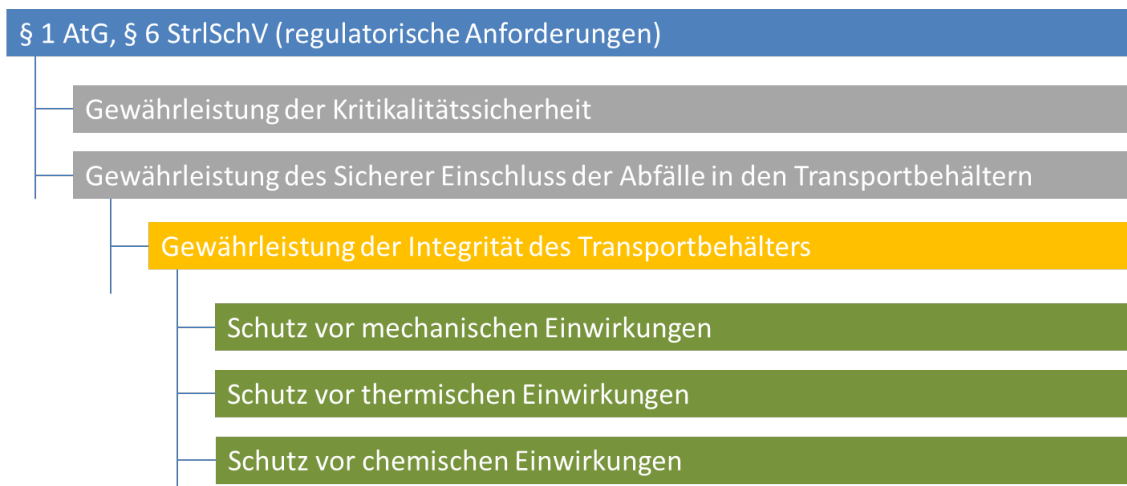


Abb. 4.2 Beispiel für eine hierarchische Ableitung von Sicherheitsfunktionen

5 Zusammenfassung

In diesem Bericht erfolgt eine Darstellung der Entwicklung des internationalen und nationalen Standes von Wissenschaft und Technik im Bereich der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase von Endlagern. Dazu wurden verschiedene Szenarientwicklungsmethoden aus unterschiedlichen internationalen und nationalen Endlagerprojekten beschrieben und verglichen (Kapitel 2). Die betrachteten Endlagerprojekte wurden chronologisch aufgelistet und spiegeln den Entwicklungsstand zum jeweiligen Zeitpunkt wieder. Somit wurde die Veränderung und damit Entwicklung von einem zum nächsten Projekt erkennbar.

Die ersten Methoden zur Szenarientwicklung nutzten einen Bottom-Up Ansatz. Dazu wurden alle bekannten Prozesse und Ereignisse sowie deren Ausprägungen an einem Standort analysiert und untersucht, in wie weit diese Prozesse Einfluss auf das Endlager-System haben können. Später kam ein Top-Down Ansatz hinzu. Dazu wurden Sicherheitsfunktionen für einzelne Bereiche bzw. Komponenten im Endlager definiert. Sicherheitsfunktionen definieren die Erfüllung von sicherheitsrelevanten Anforderungen. Es wurde untersucht, in wie weit die Sicherheitsfunktionen durch ablaufende Prozesse oder Ereignisse beeinflusst werden können.

Der Szenarientwicklung liegen FEP-Datenbanken bzw. FEP-Kataloge zu Grunde. Die Strukturen dieser FEP-Datenbanken bzw. FEP-Kataloge wurden anhand von vier Beispielprojekten (Kapitel 3.2 - 3.5) sowie der internationalen NEA-FEP-Datenbank (Kapitel 3.1) dargestellt.

Die Struktur von FEP-Datenbanken bzw. FEP-Katalogen wurde mit Hinblick auf die Erstellung eines ähnlichen Kataloges für die Betriebsphase ausgewertet (Kapitel 4.1). Es wurde angemerkt, welche Parallelen in beiden Bereichen (Betriebsphase und Nachverschlussphase) vorhanden sind und welche Einzelpunkte für die Betriebsphase weiterentwickelt werden sollten. Attribute, die als Mindestangaben für jedes FEP für die Betriebsphase angegeben werden sollten, wurden vorgegeben.

Ein Ansatz für die Herleitung von Sicherheitsfunktionen für die Betriebsphase wurde gegeben (Kapitel 4.2). Dabei wurde sich an der Vorgehensweise in der Szenarientwicklung orientiert.

Insgesamt werden mit diesem Bericht die Grundlagen zur Ableitung einer Methode zur Ergänzung der Störfallanalyse gegeben. Die Ergebnisse in diesem Bericht werden im AP5 des Projektes 3615E03230 (Bewertung der Methoden zur Durchführung und Analyse der Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise von Endlagern) weiter genutzt.

Glossar

Die in diesem Bericht benutzten Begriffe und Abkürzungen werden im Folgenden kurz erklärt. Zusätzlich werden Verweise auf ausführlichere Erläuterungen im Bericht gegeben. Wenn die englischen Begriffe eine gängige Bezeichnung darstellen, werden diese in Klammern dahinter genannt. Falls keine Quellen angegeben werden, handelt es sich um das Verständnis des Autors für den entsprechenden Begriff in diesem Bericht.

ALARA

“As Low As Reasonable Achievable” – „so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar“. Das ist ein Grundsatz aus dem Bereich des Strahlenschutzes, der fordert, dass eine Dosis auch unterhalb regulatorisch festgelegter Grenzwerte so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar sein muss. In der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /BUN 16/ wird dieser Grundsatz in §6 angegeben.

Bottom-Up

Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien ausgehend von FEP bzw. THMC-Prozessen oder Erscheinungen /NEA 12/. Siehe auch 2.1.2.

Endlagersystem

Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam und damit im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind /BMU 10/.

Ereignisse (Events)

Ereignisse sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen im Vergleich zum Nachweiszeitraum sehr kurzen Zeitraum ablaufen. Z. B. Erdbeben oder menschliche Eingriffe im Bereich des Endlagers /FIS 13/. Ereignisse beziehen sich i. A. auf die Entwicklung des Endlagersystems.

Ereignisanalyse

Die Ereignisanalyse ist der erste Schritt in der Störfallanalyse für Endlager. In der Ereignisanalyse wird das gesamte Endlagersystem auf potenzielle Störfälle hin untersucht. Der Hauptaugenmerk bei der Ereignisanalyse liegt auf dem Transportpfad der Abfallgebinde während des Einlagerungsbetriebs.

Erscheinungen (Phenomena)

Erscheinungen ist der Überbegriff für jegliche Prozesse, Eigenschaften und Ereignisse, die im Rahmen der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern betrachtet werden. Der Begriff wird vor allem in der schweizerischen und in der französischen Szenarienentwicklung verwendet.

Expert Judgement

Einschätzungen und Entscheidungen, die auf Grundlage von subjektiven Meinungen von Spezialisten gebildet werden /JOH 02/. Siehe auch Kapitel 2.1.5. Bei Expert Judgement handelt es sich um eine verbal argumentierte Plausibilitätsbetrachtung.

FEP

FEP steht für Features, Events und Processes, die im Rahmen der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern betrachtet werden. Das Äquivalent sind Erscheinungen (Phänomene).

Merkmale (Features)

Merkmale sind Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System oder Teilsystem zu einem Zeitpunkt (i. d. R. Ausgangszustand einer betrachteten Entwicklung) charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar oder die Porosität des Versatzes /FIS 13/.

Prozesse (Processes)

Prozesse sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen im Vergleich zum Nachweiszeitraum länger andauernden Zeitraum ablaufen, wie z. B. Konvergenz, Diapirismus oder der Zerfall langlebiger Radionuklide (über mehrere 100.000 Jahre) /FIS 13/. Prozesse beziehen sich i. A. auf die Entwicklung des Endlagersystems.

Referenzszenario (main-, base-, reference-scenario oder normal evolution)

Die, nach aktuellem Verständnis, mutmaßliche zukünftige Entwicklung des Endlagersystems /JOH 02/.

Sicherheitsfunktionen (Safety Functions)

Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet /BMU 10/.

Sicherheitsanalyse (Safety analysis)

Sicherheitsanalysen sind Teile der Sicherheitsbewertung. Sicherheitsanalysen dienen zum Nachweis der Sicherheit für bestimmte Teilaspekte. Dazu gehören z. B. die Betrachtung der Eignung des Standortes, der Errichtung und des Betriebs des Endlagers und die Bewertung radiologischer Risiken. Hervorzuheben sind die Sicherheitsanalysen für die Bewertung der Sicherheit für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase eines Endlagers /BMU 10/, /IAEA 12/.

Sicherheitsbewertung (Safety assessment)

Die Sicherheitsbewertung umfasst die Gesamtheit aller Sicherheitsanalysen und darüber hinaus nötige wissenschaftlichen, technischen, administrativen und innerbetrieblichen Argumente und Nachweise die die Sicherheit eines Endlagers belegen (die Sicherheitsanforderungen erfüllen) /BMU 10/, /IAEA 12/.

Sicherheitsnachweis (Safety Case)

Der Sicherheitsnachweis wird auf Grundlage einer umfangreichen Sicherheitsbewertung erbracht.

Störfall (Hazard)

Ein Störfall ist ein Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb der Anlage oder die Tätigkeit aus sicherheitstechnischen Gründen nicht fortgeführt werden kann und für den die Anlage auszulegen ist oder für den bei der Tätigkeit vorsorglich Schutzvorkehrungen vorzusehen sind /BUN 16/.

Störfallanalyse (Hazard assessment)

Die Störfallanalyse umfasst die Sicherheitsanalysen zur Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen /HAR 15/.

Szenario (Scenario)

Im Allgemeinen sind Szenarien, Zukunftsbilder die einen potenziellen Einfluss auf ein betrachtetes Objekt oder eine betrachtete Eigenschaft besitzen. Sie beschreiben mögliche Entwicklungen unter Einbeziehung von Erfahrungen und Kenntnissen. Diese Zukunftsbilder werden in der Szenarienentwicklung wissenschaftlich begründet hergeleitet. Siehe auch Seite 14.

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

THMC(RB)-Prozesse

THMC(RB)-Prozesse sind **T**hermische, **H**ydraulische, **M**echanische und **C**hemische Prozesse. Teilweise werden diese Prozesse mit **R**adiologischen und **B**iologischen Prozessen ergänzt. Diese Prozesse werden im Rahmen der Sicherheitsbewertung der Nachverschlussphase von Endlagern betrachtet.

Top-Down

Vorgehensweise zur Ableitung von Szenarien ausgehend von Sicherheitsfunktionen /NEA 12/. Siehe auch 2.1.2.

VSG

Mit VSG wird das Projekt UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ abgekürzt. Dabei wurde zum ersten Mal in Deutschland eine umfangreiche Sicherheitsbewertung für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle durchgeführt /FIS 13/.

What-If Cases

Ist ein fingiertes Szenario, welches die Robustheit eines Endlagersystems testen soll. Ein What-If Case liegt außerhalb der wissenschaftlichen nachgewiesenen Möglichkeiten /JOH 02/.

Literaturverzeichnis

- /AND 05/ 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.
- /BEC 97/ Becker, A., Fischer, H., Hofer, E., Kloos, M., Krzykacz, B., Martens, K.-H., Röhlig, K.-J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste (EVEREST project). Volume 3a: Salt formation, site in Germany, Nuclear Science and Technology, EUR 17449/3a EN, European Commission (EC), 429 S., ISBN 92-828-0531-x, EUR-OP: Luxembourg, 1997.
- /BEI 91/ Beise, E., Biesold, H., Gründler, D., Handge, P., Lange, F., Larue, J., Mielke, H., Müller, W., Peiffer, F., Pfeffer, W., Wurtinger, W., Jaritz, W., Meister, D., Schnier, H.: Sicherheitsanalyse des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), GRS-A-1817, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 1991.
- /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 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarientwicklung. Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC); Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 239 S., ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /BFS 16/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Vorhabensbeschreibung - Überprüfung der sicherheitstechnischen Anforderungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Endlager Konrad, 30 S.: Salzgitter, 15. April 2016.
- /BFS 96/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Systemanalyse Konrad, Teil 3. Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen. Genehmigungsunterlage EU 228, 135 S., 15. Januar 1996.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 21 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BUH 08/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J.R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M.: Zusammenfassender Abschlussbericht. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), TEC-09-2008-AB, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Braunschweig, April 2008.
- /BUH 10/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J.R., Krone, J., Lommerzheim, A.: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR); DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 1. April 2010.
- /BUN 15/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). AtG. 20.11.2015.
- /BUN 16/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt Artikel 5 der Verordnung vom 27. April 2016 (BGBl. I S. 980). StrlSchV. 27.04.2016.

- /CAD 96/ Cadelli, N., Des Escalier Orres, P., Marivoet, J., Martens, K.-H., Prij, J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste. Everest project. Summary Report, Nuclear Science and Technology, EUR 17122 EN, European Commission (EC), 296 S., ISBN 92-827-8621-8, Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 1996.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-66-3: Köln, 2013.
- /GEO 11a/ GEOSAF Working Group on Operational Safety: GEOSAF companion report on operational safety, 34 S., International Atomic Energy Agency (IAEA): Vienna, 2011, zitiert am 31. März 2016.
- /GEO 11b/ GEOSAF Working Group on Operational Safety: GEOSAF Position paper on operational safety. Main outcomes, 3 S., International Atomic Energy Agency (IAEA): Vienna, 2011, erreichbar unter <https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/geosaf/position-paper.pdf>, zitiert am 31. März 2016.
- /GRÜ 86/ Gründler, D., Kofahl, A., Mielke, H., Wurtinger, W.: Systemanalyse Konrad, Teil 3. Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen, GRS-A-1216, Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, April 1986.
- /HAR 15/ Hartwig-Thurat, E., Uhlmann, S.: Untersuchung und Entwicklung von sicherheitstechnischen Bewertungen für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und Bereitstellung des notwendigen Instrumentariums am Beispiel des Endlagers Konrad. AP 1 Weiterentwicklung der Methodik für die Durchführung von Sicherheitsanalysen zur Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen, GRS-383, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-64-8: Köln, 2015.
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Guide (SSG-

23), IAEA Safety Standards Series, SSG-23, International Atomic Energy Agency (IAEA), ISBN 978-92-0-128310-8: Vienna, 2012.

- /JOH 02/ Johnsins, 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, 360 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, 1. Dezember 2002.
- /KER 11/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 1: Grundsätze, KTA 2201.1, 8 S., 2011.
- /MAR 08/ Marić, D., Müller, W.: Storfalleanalyse für die Schließung der Schachanlage Asse II, 70 S., Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH: Köln, Mai 2008.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 169 S., ISBN 978-3-939355-51-9: Köln, 2011.
- /NDA 15/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO), Radioactive Waste Management Department (RWMD): Response to Appendix 2 Questions – NDA RWMD, Hrsg.: Implementing Geological Disposal, 2015.
- /NEA 06/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): NEA International FEP Database. User Notes, Version 2.1, https://www.oecd-nea.org/rwm/igsc_coprojectactivities.html, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 2006.
- /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 91/ Review of safety assessment methods. Disposal of radioactive waste : a report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD, Nuclear Energy Agency. Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 77 s, ISBN 92-64-13493-X, Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co- operation and Development: Paris, 1991.
- /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. 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, Radioactive Waste Management, Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), 76 S., ISBN 9264136053, Nuclear Energy Agency: Paris, 1992.
- /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 95/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): The use of interaction matrices for identification, structuring and ranking of FEPs in a repository system. application on the far-field of a deep geological repository for spent fuel, SKB Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-95-22, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Sweden, 1995.
- /SMI 09a/ Smith, P., Cornélis, B., Capoulet, M., Van Geet, M.: The Long-Term Safety Assessment Methodology for the Geological Disposal of Radioactive Waste. SFC1 level 4 report: second full draft, NIROND-TR 2009-14 E, ONDRAF/NIRAS, 80 S., 2009.
- /SMI 09b/ Smith, P., Dierckx, A., Capouet, M., Van Geet, M.: Safety Statements as a Tool to Incorporate Geoscience in the Safety and Feasibility Case, AMIGO-3: Paris.

- /SVE 10/ Svensk Kärnbränslehantering AB: FEP report for the safety assessment SR-Site, TR-10-45, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), 270 S., ISBN 1404-0344: Stockholm, Schweden, 2010.
- /TÜV 97/ TÜV Hannover / Sachsen-Anhalt e. V.: Endlager für radioaktive Abfälle Schachtanlage Konrad. Gutachten im Planfeststellungsverfahren, GK-SBA 07/97: (unveröffentlicht), 1997.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, 864 S., 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Berichte zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, 2012.

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Ausschnitt aus der Tabelle für die wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen /JOH 02/.....	59
Tab. 2.2	Chronologische Auflistung der in Kapitel 2 beschriebenen Projekte mit Erläuterung der Besonderheiten in der Entwicklung in Bezug auf die Szenarientwicklung	61
Tab. 2.3	Chronologische Auflistung der in Kapitel 2 beschriebenen Projekte aus den Ländern mit Erläuterung der Besonderheiten in der Entwicklung in Bezug auf die Szenarientwicklung.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Allgemeines Ablaufdiagramm zur Darstellung der Elemente und Verbindungen bei der Erstellung einer Sicherheitsbewertung /NEA 12/	7
Abb. 2.2	Allgemeines Ablaufdiagramm zur Darstellung der Elemente und Verbindungen bei der Erstellung eines Safety Case /NEA 12/	8
Abb. 2.3	Grafische Darstellung des Top-Down und des Bottom-Up Ansatzes zur Ableitung von Szenarien	11
Abb. 2.4	Beispiele für Hilfsmittel, die bei der Identifizierung sicherheitsrelevanter Prozesse und Ungewissheiten in den verschiedenen Ländern zum Einsatz kommen /NEA 12/.....	15
Abb. 2.5	Übersicht der Möglichen Zustände des Endlagersystems nach der PROSA Methode /CAD 96/	23
Abb. 2.6	Komponenten und Teilsysteme eines tiefen geologischen Endlagers mit Multibarrierenprinzip /BEU 10/	27
Abb. 2.7	Darstellung der Einteilung der Sicherheitsfunktionen in Primär- und Sekundärgruppen	28
Abb. 2.8	Matrix zur Darstellung der Abhängigkeiten zwischen FEP und Sicherheitsfunktion /BEU 10/	29
Abb. 2.9	Systematische Darstellung der Szenarientwicklung im VSG-Projekt /BEU 12/	31
Abb. 2.10	Darstellung der direkten Abhängigkeiten von FEP	33
Abb. 2.11	Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsklasse von Szenarien /BEU 12/	34

Abb. 2.12	Hochradioaktive, langlebige, verglaste Abfälle – Chronologische Entwicklung von THMC-Prozessen in der Nachverschlussphase /NEA 12/	36
Abb. 2.13	„Storyboards“ stellen Quer- und Längsschnitt des Endlagertunnels mit den auftretenden THMC-Prozessen dar /NEA 12/	39
Abb. 2.14	Beispiel für die hierarchische Struktur der ONDRAF/NIRAS Sicherheitsaussagen /SMI 09b/	42
Abb. 2.15	Prozessdiagramm für die Systemkomponente „Buffer/Backfill“	44
Abb. 2.16	Prinzip einer Interaktionsmatrix /SKB 95/	45
Abb. 2.17	Beispiel für eine Prozesstabelle für den Prozess "Wärmetransport". Es werden die gegenseitigen Einflüsse von Parametern und einem spezifischen Prozess innerhalb einer Systemkomponente dargestellt. /SKB 06/	46
Abb. 2.18	Zusammenfassung (Auszug) der Prozess-Entwicklungskonstellation am Beispiel der Systemkomponente "Abfall" /SKB 06/.....	48
Abb. 2.19	Beispiel für ein Bewertungsmodell-Flussdiagramm /SKB 06/	50
Abb. 2.20	FEP-Chart eines schwedischen Endlagerprojektes. Grün: Ausgangsfaktoren, Gelb: Variablen, Grau: Prozesse, Rot: Indikatoren für Sicherheitsfunktionen, normale Linien: Permanente Einwirkungen, gestrichelte Linien: Einwirkungen falls Sicherheitsfunktionen nach Indikatoren nicht erfüllt werden, Kreise: Unterbrochene Einwirkungslinie (zur Steigerung der Übersichtlichkeit) /SKB 06/	52
Abb. 2.21	Hauptbestandteile der Szenarientwicklung. Ableitung von zusätzlichen Szenarien durch Betrachtung der Sicherheitsfunktionen des Behälters und des Bentonit-Versatzes (gelb und orange) /SKB 06/	56

Abb. 2.22	Handhabung von FEP im SR-Can Projekt von SKB /NEA 12/	58
Abb. 2.23	Die Schritte im Nagra-Konzept bei der Erstellung eines Safety Case /NEA 12/	60
Abb. 3.1	Unterteilung der FEP in der internationalen FEP-Liste /NEA 06/.....	66
Abb. 3.2	Screenshot eines beispielhaften FEP aus der internationalen FEP- Datenbank /NEA 06/	67
Abb. 3.3	Screenshot der ISIBEL-FEP-Datenbank /BUH 10/.....	69
Abb. 3.4	Darstellung der Einteilungsstruktur von FEP in Haupt- und Untergruppen im VerSi-Projekt /BEU 10/	73
Abb. 3.5	Grafische Benutzeroberfläche der VSG-FEP-Datenbank am Beispiel des FEP "Radioaktiver Zerfall" /WOL 12b/	75
Abb. 3.6	Grundsätzliche Informationen in einem FEP-Eintrag im SR-Site-FEP- Katalog /SVE 10/	79
Abb. 3.7	Beispiel für ein automatisch aus den Interaktionsmatrizen generiertes Prozessdiagramm aus dem SR-Site-FEP-Katalog. Interaktionen zwischen Prozessen und Systemkomponenten werden mit roten Pfeilen dargestellt, wenn sie in der Bewertung behandelt werden. Grüne Pfeile stehen für nicht berücksichtigte Interaktionen /SVE 10/.....	80
Abb. 4.1	Beispieldarstellung der hierarchischen Struktur von Komponenten in der Kategorie „Features“ in drei Ebenen.....	85
Abb. 4.2	Beispiel für eine hierarchische Ableitung von Sicherheitsfunktionen.....	88

Anhang A – Beispiele für FEP der Betriebsphase

FEP „Förderturm“

FEP-Nummer/-ID:

F-001

Kurzbezeichnung:

Der Förderturm ist ein Teil der Schachtförderanlage und dient damit indirekt zum Transport der Abfallgebinde von über Tage nach Unter Tage.

Beschreibung:

Der Förderturm befindet sich über Tage in der Schachthalle und ist in mehrere Ebenen unterteilt. Auf den Ebenen befinden sich die Achtseilförderanlage und alle dazu notwendigen Nebengeräte. Für die genauen Komponentenspezifikationen siehe [DEU 97].

FEP-Art:

Feature

Eintrittswahrscheinlichkeit/Häufigkeit

-

Relevanz für welchen Anlagenbereich:

Schachtförderhalle (Rasenhängebank), Schacht(-förderanlage)

Direkte Abhängigkeiten zwischen den FEP:

„Transport der Abfallgebinde von über Tage nach unter Tage mit der Schachtförderanlage“ (Process),

Begründungen:

-

Literatur:

[DEU 97] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Komponentenspezifikation Hauptseilfahrtanlage der Schachtförderanlage Konrad 2, Informationssystem Konrad, Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), EU 409, 122 S., 20. Februar 1997.

FEP „Erdbeben“

FEP-Nummer/-ID:

E-001

Kurzbezeichnung:

Einwirkungen von außen (EVA) auf die Anlage. Einwirkungen in Form von horizontalen und vertikalen Beschleunigungen.

Beschreibung:

Zu Grunde gelegt wird ein Bemessungserdbeben nach KTA-Regel 2201.1 (Fassung vom Juni 1975) /KER 11/.

FEP-Art:

Event

Eintrittswahrscheinlichkeit/Häufigkeit:

$I_0 = V$; $a_h = 33 \text{ cm/s}^2$; $a_v = 20 \text{ cm/s}^2$; $\rightarrow P = 10^{-3} \text{ a}^{-1}$

$I_0 = VII$; $a_h = 120 \text{ cm/s}^2$; $a_v = 60 \text{ cm/s}^2$; $\rightarrow P = 4 \times 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ /TÜV 97/

Relevanz für welchen Anlagenbereich:

gesamtes Endlagersystem (übertägiger Anlagenbereich, Schachtanlage, untertägiger Anlagenbereich)

Direkte Abhängigkeiten zwischen den FEP:

alle Features

Begründungen:

Alle Komponenten des Endlagersystems werden von einem Erdbeben erreicht, weil die Intensität eines Erdbebens nur mit der Entfernung vom Hypozentrum abnimmt. Festinstallierte, sicherheitsrelevante Komponenten müssen nach KTA 2201.1 [KER 11] ausgelegt sein.

Literatur

[KER 11] Kerntechnischer Ausschuss (KTA): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 1: Grundsätze, KTA 2201.1, 8 S., 2011.

[TÜV 97] TÜV Hannover / Sachsen-Anhalt e. V.: Endlager für radioaktive Abfälle
Schachtanlage Konrad. Gutachten im Planfeststellungsverfahren, GK-SBA
07/97: (unveröffentlicht), 1997.

FEP „Transport der Abfallgebinde von über Tage nach unter Tage“

FEP-Nummer/-ID:

P-001

Kurzbezeichnung:

Transport der Abfallgebinde von über Tage nach unter Tage.

Beschreibung:

Transport der Abfallgebinde im Förderkorb der Schachtförderanlage von der Rasen-
hängebank bis zum Füllort. Genaue Beschreibung siehe [DEU 97].

FEP-Art:

Process

Eintrittswahrscheinlichkeit/Häufigkeit:

17 Treiben pro Schicht

Relevanz für welchen Anlagenbereich:

Schachtanlage

Direkte Abhängigkeiten zwischen den FEP:

„Schachtförderanlage“

Begründungen:

-

Literatur

[DEU 97] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe
mbH (DBE): Systembeschreibung Einlagerungssystem, EU 208, Hrsg.:
Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), 244 S., 1997.

**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