

**Entwicklung von  
Störfallszenarien für  
die Betriebsphase von  
Endlagern**

## **Entwicklung von Störfallszenarien für die Betriebsphase von Endlagern**

Stephan Uhlmann

September 2018

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrundeliegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) unter dem Kennzeichen 4715E03230 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH ausgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

**GRS - 515**  
**ISBN 978-3-947685-00-4**

**Deskriptoren:**

Betriebsphase, Endlager, Störfallanalyse, Störfallszenarien, Szenarientwicklung

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>I</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Störfallanalyse für die Betriebsphase von Endlagern in Deutschland.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Vor- und Nachteile der Szenarientwicklungsmethoden .....</b>	<b>9</b>
4.1	Gegenüberstellung der Methoden aus der Nachverschlussphase und der Betriebsphase .....	9
4.2	Grundsätze und Herausforderungen der Szenarientwicklung.....	13
<b>5</b>	<b>Analyse der Szenarientwicklungsmethoden und Übertragung auf die Störfallanalyse der Betriebsphase eines Endlagers .....</b>	<b>17</b>
5.1	Methodik zur Auswertung der Szenarientwicklungsmethoden.....	17
5.1.1	Identifizierung von gemeinsamen Elementen der verschiedenen Szenarientwicklungsmethoden .....	17
5.1.2	Vergleich der Szenarientwicklungsmethoden .....	20
5.2	Darstellung des Konzeptansatzes für betriebliche Sicherheitsanalysen ...	31
5.3	Übertragung des FEP-Katalogs .....	36
5.4	FEP-Benennung und FEP-Kategorien .....	40
<b>6</b>	<b>Methode zur Ableitung von Szenarien für die Betriebsphase .....</b>	<b>43</b>
6.1	Grundlagen .....	43
6.1.1	Erstellung des FEP-Katalogs .....	43
6.1.2	Herleitung von Sicherheitsfunktionen (Top-Down Ansatz).....	45
6.2	Analyse .....	47
<b>7</b>	<b>Beispielhafte Anwendung der Methodik.....</b>	<b>53</b>
7.1	Beschreibung des betrachteten Beispiels .....	53
7.2	Anwendung der Methode auf das Beispiel.....	54

7.2.1	Erstellung des FEP-Katalogs .....	54
7.2.2	Herleitung von Sicherheitsfunktionen (Top-Down Ansatz).....	58
7.2.3	Analyse .....	59
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>61</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>65</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>71</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>73</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>77</b>

# 1 Einleitung

Der vorliegende Bericht enthält die Ergebnisse des Arbeitspaketes 5 des Projekts „Bewertung der Methoden zur Durchführung und Analyse der Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise von Endlagern“.

Um den Schutz von Mensch und Umwelt gegen die Gefahren radioaktiver Abfälle in einem Endlager nachzuweisen, werden Sicherheitsanalysen durchgeführt. Die Gesamtheit aller Sicherheitsanalysen wird als Safety Case bezeichnet /IAEA 12/. Damit enthält ein Safety Case alle wissenschaftlichen, technischen, administrativen und innerbetrieblichen Argumente und Nachweise, die die Sicherheit eines Endlagers belegen und damit die Erbringung eines umfassenden Sicherheitsnachweises ermöglichen. Die Definition des Safety-Case-Begriffs bezieht alle Arten radioaktiver Abfälle und alle Endlagerphasen mit ein. Der Safety Case eines Endlagers umfasst demnach die Standorteignung, die Anlagenauslegung, die Errichtung und den Betrieb der Anlage sowie die Störfallanalyse, die Verschlussphase und die Nachverschlussphase. Dazu gehören alle Arbeiten, die bezüglich der Sicherheit des Endlagers durchgeführt werden /IAEA 12/.

Im Fokus des Safety Cases stehen besonders potenzielle radiologische Auswirkungen. Ziel bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen ist es, die potenziellen radiologischen Auswirkungen zu ermitteln, die aus verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten folgen. Sind die ermittelten radiologischen Auswirkungen aus den Sicherheitsanalysen signifikant, d. h. liegen sie über den zulässigen Grenzwerten, müssen Änderungen und Anpassungen am Endlagerdesign und der -auslegung zu Gunsten der Sicherheit vorgenommen werden. Ziel dabei ist es neben der Einhaltung der jeweiligen Grenzwerte, die radiologischen Auswirkungen so gering wie möglich zu halten (ALARA-Prinzip, § 6 StrlSchV /SSV 16/). Mit den implementierten Änderungen und Anpassungen werden die Sicherheitsanalysen erneut durchgeführt, um festzustellen, ob das ALARA-Prinzip sowie die radiologischen Grenzwerte eingehalten werden. Diese Vorgehensweise ist als iterativer Prozess zu bezeichnen /UHL 16/.

Störfallanalysen werden im Rahmen der Sicherheitsanalyse für die Betriebsphase durchgeführt und dienen dem Nachweis der Vermeidung bzw. der Beherrschung von Betriebsstörungen und Störfällen. Im Zuge des Genehmigungsverfahrens für das Endlager Konrad in Deutschland wurde eine Vorgehensweise für die Störfallanalyse für Endlager entwickelt /BFS 96/ und kommt seitdem in Deutschland zur Anwendung. Ein Beispiel für diese Anwendung ist die Störfallanalyse, die nach der Wiedervereinigung Deutschlands für das Endlager Morsleben /GRS 91/ durchgeführt wurde. Weiterhin kam die für das Endlager Konrad entwi-

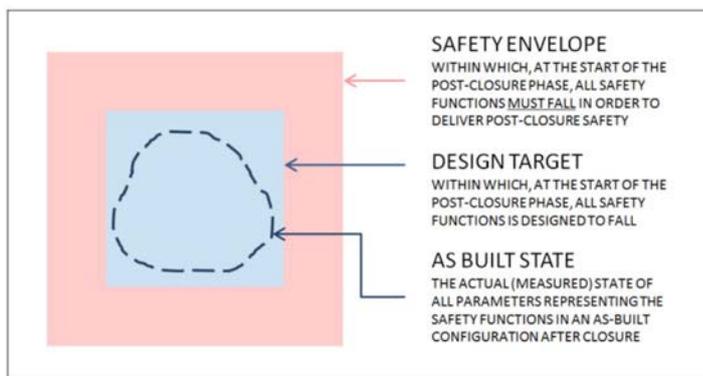
ckelte Methode der Störfallanalyse für die ursprünglich geplante Stilllegung des Versuchsbergwerks Asse II /MAR 08/ zur Anwendung /UHL 16/.

In den letzten Jahren hat im Bereich Endlagerung eine intensive wissenschaftliche, politische und gesellschaftliche Diskussion bezüglich Standortauswahlprozessen und der sicherheitstechnischen Bewertung stattgefunden. Insbesondere bei den Sicherheitsanalysen erfolgte mit der zunehmenden Verbreitung des „Safety-Case-Gedankens“ eine Weiterentwicklung der Methoden /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 Standortauswahl von Endlagern von Bedeutung ist und die meisten geologischen Endlagerprojekte weltweit sich noch in frühen Phasen befinden. Da der Fokus des Safety Cases bislang auf der Sicherheitsanalyse der Nachverschlussphase lag, lag auch der Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung bislang in diesem Bereich. Infolgedessen wurde die Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase in den letzten zwei Jahrzehnten zunehmend systematisiert /UHL 16/.

International wird der Begriff des „Integrated Safety Cases“ zunehmend verlangt. Dies bedeutet, dass nicht wie bisher weitestgehend unabhängige einzelne Sicherheitsanalysen durchgeführt werden. Beispielsweise gibt es Sicherheitsanalysen für die Nachverschluss- und die Betriebsphase, die überwiegend unabhängig voneinander durchgeführt werden. Dabei kann eine potenzielle Beeinflussung zwischen beiden Phasen nicht erkannt werden. Um die Möglichkeit solcher Defizite zu minimieren, sollen Sicherheitsanalysen einen „ganzheitlichen Charakter“ besitzen. D. h. idealerweise gibt es eine Sicherheitsanalyse mit der alle bisherigen einzelnen Sicherheitsanalysen und damit der gesamte Safety Case abgedeckt werden können /IAEA 12/.

Durch den Fortschritt der weltweiten Endlagerprojekte rückt auch die Sicherheitsanalyse für die Betriebsphase zunehmend in den Fokus. 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*) /IAEA 17/ eine Arbeitsgruppe für die betriebliche Sicherheit in geologischen Endlagern gründete. Der Fokus der Arbeitsgruppe lag auf der Identifizierung von möglichen Störfällen in der Betriebsphase eines geologischen Endlagers und die dazu genutzten methodischen Vorgehensweisen für die Bewertung der Sicherheit. Ein Ergebnis der Arbeitsgruppe war, dass die methodische Vorgehensweise für die Störfallanalyse in normalen kerntechnischen Anlagen grundsätzlich auch für die Betriebsphase geologischer Endlager zweckmäßig ist /GEO 11/.

Das GEOSAF Projekt wird in mehreren Teilen fortgeführt und läuft noch immer im nunmehr dritten Teil. Darin wird weiterhin der Ansatz des „Safety Envelopes“ diskutiert. Dabei sind drei verschiedene Zustände im Rahmen der Planung und Errichtung eines tiefengeologischen Endlagers möglich – der Safety Envelope, das Design Target und der As-Built State. Die Definitionen dieser Begriffe befinden sich noch in der Diskussion und sind noch nicht abschließend festgelegt. Daher können im Folgenden nur vorläufige Definitionen gegeben werden. Der Safety Envelope beschreibt die Grenzen, in denen sich das Endlager während seiner gesamten Lebenszeit bewegen darf. Damit leitet sich der Safety Envelope aus den regulatorischen Anforderungen ab. Das Design Target umfasst die Auslegung des Endlagers, welches im Rahmen der Planung festgelegt wird. Die Auslegung sollte dabei in Bezug auf den Safety Envelope eine Sicherheitsmarge berücksichtigen. Die Auslegung darf die Grenzen des Safety Envelopes nicht überschreiten. Der As-Built State ist der tatsächliche Zustand, den das Endlager nach Errichtung erreicht. Dieser Zustand kann sich über die Betriebs- und die Nachverschlussphase verändern. Der As-Built State sollte dabei stets innerhalb der Grenzen des Design Targets liegen, darf aber unter keinen Umständen die Grenzen des Safety Envelopes überschreiten. Abb. 1.1 soll der visuellen Veranschaulichung der Beziehungen zwischen den Begriffen dienen /IAEA 13/.



**Abb. 1.1** Beziehungen zwischen den Begriffen Safety Envelope, Design Target und As-Built State /IAEA 13/



## 2 Zielsetzung und Vorgehensweise

In dieser Arbeit wird aufbauend auf den Ergebnissen in /UHL 16/ die bisherige Vorgehensweise in der Störfallanalyse weiterentwickelt. Dazu werden die Szenarientwicklungsmethoden, die in /UHL 16/ beschrieben wurden, analysiert, in Einzelschritte zerlegt und gegenübergestellt. Einzelschritte, die sich in der Gegenüberstellung als vorteilhaft erwiesen haben, fließen in die Weiterentwicklung der folgenden beiden Hauptschritte der Störfallanalyse ein /UHL 16/:

- **Störfallauswahl (Ereignisanalyse)**

Das Ziel für die Weiterentwicklung der Störfallauswahl ist es, die Vorgehensweise der Szenarientwicklung aus der Bewertung der Sicherheit der Nachverschlussphase zu analysieren, um die Möglichkeit der Übertragung dieser Methode in die Störfallauswahl (Ereignisanalyse) zu überprüfen und ggf. umzusetzen.

- **Störfallbewertung**

Das Ziel für die Weiterentwicklung der Störfallbewertung ist es, die Vorgehensweisen von Bewertungsprozessen aus der Störfallanalyse für Kernkraftwerke sowie aus der Szenaribewertung für Endlager (Nachverschlussphase) zu betrachten, um die Möglichkeit der Übertragung dieser Methoden in die Störfallbewertung zu überprüfen und ggf. umzusetzen.

In diesem Bericht wird sich auf die Weiterentwicklung der Vorgehensweise der Störfallauswahl (Ereignisanalyse) beschränkt. Mit der Weiterentwicklung soll die Ableitung von Störfallszenarien systematischer durchgeführt werden können, was den Vergleich unterschiedlicher Endlagerkonzepte für die Betriebsphase von Endlagern vereinfachen soll. Darüber hinaus wird ein höheres Maß an Vereinheitlichung zwischen der Szenarientwicklung in der Nachverschlussphase und der Ereignisanalyse in der Betriebsphase angestrebt. Zusätzlich sollen die Weiterentwicklungen zu einer verbesserten Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Störfallanalyse führen, speziell bei der Zusammenstellung der Störfallliste<sup>1</sup> in der Ereignisanalyse /UHL 16/.

In diesem Bericht wird in Kapitel 3 die Vorgehensweise in der Störfallanalyse beschrieben. Kapitel 4 stellt die Störfallanalyse und die Szenarientwicklung gegenüber um die Kompati-

---

<sup>1</sup> Die Störfallliste ist das Ergebnis der Störfallauswahl (Ereignisanalyse) und beinhaltet alle Ereignisse, die in der Störfallbewertung berücksichtigt werden müssen.

bilität der Methoden festzustellen. Des Weiteren werden die Vorteile und Herausforderungen der Szenarientwicklung dargelegt. Kapitel 5 umfasst die Analyse und Auswertung der Szenarientwicklungsmethoden und beschreibt die Vorgehensweise der Übertragung. Anschließend wird die weiterentwickelte Methodik in Kapitel 6 dargestellt und in Kapitel 7 an einem ausgewählten Beispiel angewendet. Kapitel 8 enthält eine Zusammenfassung und einen Ausblick dieses Berichts.

### 3 Störfallanalyse für die Betriebsphase von Endlagern in Deutschland

Wie in der Einleitung dieses Berichts bereits erwähnt, hat sich die Störfallanalyse für das Endlager Konrad als Grundlage für die Vorgehensweise bei Störfallanalysen für Endlager in Deutschland allgemein etabliert. Die Vorgehensweise basiert auf den Störfalleitlinien des Bundesministeriums des Inneren (BMI) /BFS 83/.

Die Störfallanalyse Konrad gliedert sich in zwei Hauptschritte, die Ereignisanalyse und die Ereignisbewertung. Die Ereignisbewertung lässt sich dabei in die drei Arbeitsschritte Störfallgruppenbildung, Störfallgruppenbewertung und Nachweis der Einhaltung des Störfallplanungswertes einteilen /HAR 15/:

1. Ereignisanalyse
2. Ereignisbewertung
  - a) Störfallgruppenbildung
  - b) Störfallgruppenbewertung
  - c) Nachweis der Einhaltung des Störfallplanungswertes

Der erste Schritt, die **Ereignisanalyse**, dient der Identifizierung aller Ereignisse, die zu einem Störfall führen könnten. Diese Aufstellung wird als Störfallliste bezeichnet. Um die Störfallliste aufstellen zu können, werden die Betriebsabläufe in den einzelnen Betriebsbereichen sowie die technischen Einrichtungen und deren Auslegung betrachtet und systematisch nach potenziellen sicherheitsrelevanten Ereignissen (mechanische und thermische Störfälle) untersucht. Dabei werden sowohl Einwirkungen von innen (EVI) also auch Einwirkungen von außen (EVA) berücksichtigt /HAR 15/.

In der **Ereignisbewertung** ist das Ziel, die Ereignisse aus der Störfallliste zu identifizieren, für deren Auswirkungen die Anlage auszulegen ist. Dementsprechend werden die Ereignisse aus der Störfallliste zunächst bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet. Die Ereignisse, deren Eintrittswahrscheinlichkeit so gering ist, dass sie unter Berücksichtigung der Auslegung der Anlage und nach dem Maßstab der praktischen Vernunft ausgeschlossen werden können /BVG 09/, werden dem Restrisiko zugeordnet. D. h. die entsprechenden Auswirkungen müssen nicht weiter betrachtet werden (Klasse 2 – Vermeidung des Ereignisses durch die Auslegung der Anlage). Alle Ereignisse, die nicht vermieden und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht als gering eingeschätzt werden können, müssen hinsichtlich

ihrer Auswirkungen analysiert werden (Klasse 1 – Begrenzung der Auswirkungen durch die Auslegung der Anlage). Für Ereignisse der Klasse 1 muss nachgewiesen werden, dass ihre Auswirkungen die geltenden Grenzwerte nicht überschreiten. In Deutschland wird dieser Grenzwert als Störfallplanungswert bezeichnet. Er ist im § 49 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) /SSV 16/ verankert und beträgt 50 mSv. Demzufolge müssen die Auswirkungen für die Ereignisse der Klasse 1 ermittelt werden, um sie anschließend mit dem Störfallplanungswert vergleichen zu können. Außerdem dürfen Ereignisse der Klasse 1 nicht häufiger als einmal während der gesamten Betriebszeit eintreten /NMU 02/, /HAR 15/.

Damit nicht für jedes Ereignis die Auswirkungen einzeln ermittelt werden müssen, werden gleichartige Ereignisse **Störfallgruppen** zugeordnet. Die Gruppierung erfolgt auf Grundlage gleicher Ereignisabläufe bzw. Belastungen. Die Gruppierung wird für jeden Betriebsbereich separat durchgeführt /BFS 96/.

Anschließend erfolgt die **Störfallgruppenbewertung**, in der für jede Störfallgruppe das Ereignis identifiziert wird, welches die höchsten Aktivitätsfreisetzungen zur Folge hat. Bei der Analyse werden Betriebsbereiche, Störfallabläufe, Beaufschlagung der Abfallgebinde und Lastannahmen berücksichtigt /NMU 02/. Diese identifizierten Ereignisse werden als repräsentative Störfälle bezeichnet und stellen die abdeckenden potenziellen Ereignisse dar /HAR 15/.

Für die repräsentativen Störfälle muss der **Nachweis der Einhaltung des Störfallplanungswertes** erbracht werden. Dies erfolgt durch radiologische Berechnungen. Dazu wird für jeden repräsentativen Störfall ein Quellterm ermittelt. Dieser beschreibt zunächst nur die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem Abfallgebinde infolge mechanischer bzw. thermischer Einwirkungen. Anschließend werden weitere Berechnungen für die Ausbreitung der radioaktiven Stoffe in der Anlage, bis hin zur Grenze der Anlage, durchgeführt um letztendlich eine Strahlendosis am Aufpunkt (ungünstigste Einwirkungsstelle über Tage) zu bestimmen. Der ermittelte Wert darf den Störfallplanungswert nicht überschreiten /HAR 15/.

## **4 Vor- und Nachteile der Szenarientwicklungsmethoden**

### **4.1 Gegenüberstellung der Methoden aus der Nachverschlussphase und der Betriebsphase**

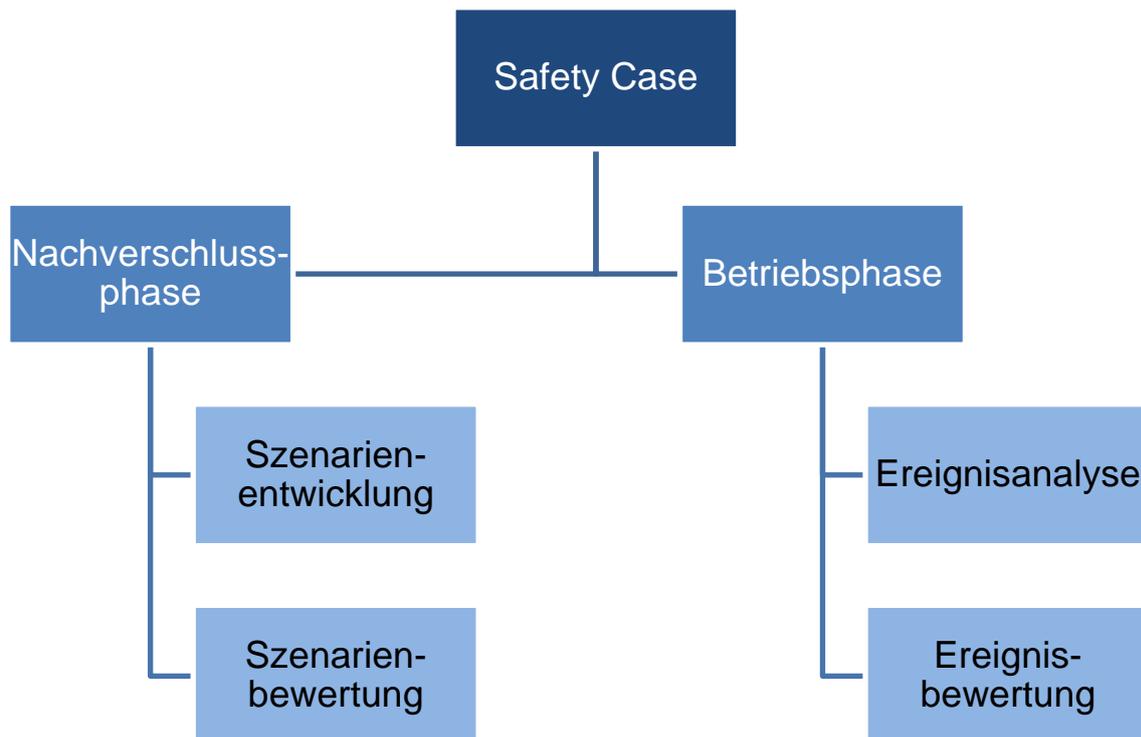
In diesem Kapitel erfolgt eine Gegenüberstellung der Szenarientwicklungsmethoden für die Nachverschlussphase von Endlagern, die in /UHL 16/ betrachtet wurden, und der Ereignisanalyse für die Betriebsphase von Endlagern (siehe Kapitel 3). In Tab. 1 ist die Gegenüberstellung tabellarisch zusammengefasst. Anschließend erfolgt eine Beschreibung, wie die Ereignisanalyse mit Elementen aus der Szenarientwicklung ergänzt und weiterentwickelt werden kann. In Kapitel 4.2 wird auf bekannte Herausforderungen in der Methode der Szenarientwicklung eingegangen.

Die Ziele der Ereignisanalyse für die Betriebsphase und der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase sind vergleichbar. Bei beiden Methoden sollen möglichst umfassende Spektren von Szenarien bzw. potenziellen Störfällen aufgestellt werden.

Die Vorgehensweise der Störfallanalyse zeigt Parallelen zur Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase auf. So lässt sich die Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase in die groben Schritte Szenarientwicklung und Szenarienbewertung einteilen. Die Störfallanalyse lässt sich in ähnlicher Weise in die beiden Schritte Ereignisanalyse und Ereignisbewertung einteilen (siehe Abb. 4.1).

**Tab. 1** Gegenüberstellung der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase und der Ereignisanalyse für die Betriebsphase

	<b>Szenarientwicklung Nachverschlussphase</b>	<b>Ereignisanalyse Betriebsphase</b>
<b>Zielsetzung</b>	Umfassende Aufstellung von Szenarien, die mögliche Entwicklungen des Endlagersystems in der Zukunft beschreiben	Umfassende Aufstellung potenzieller Störfälle (Ereignisse)
<b>Schutzziele</b>	Radiologische Auswirkungen für Mensch und Umwelt sind zu vermeiden bzw. zu minimieren /BMU 10/ <ul style="list-style-type: none"> <li>• wahrscheinliche Entwicklungen: max. 0,01 mSv/a</li> <li>• weniger wahrscheinliche Entwicklungen: max. 0,1 mSv/a</li> </ul>	Radiologische Auswirkungen für Mensch und Umwelt sind zu vermeiden bzw. zu minimieren /SSV 16/ <ul style="list-style-type: none"> <li>• bestimmungsgemäßer Betrieb: max. 1 mSv/a</li> <li>• Störfall: max. 50 mSv</li> </ul>
<b>Ablauf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle Grundlagen werden im FEP-Katalog festgehalten <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Endlagerkonzept</li> <li>○ Abfalldaten</li> <li>○ Grundlegende Annahmen</li> <li>○ Standortbeschreibung</li> </ul> </li> <li>• Systematische Bewertung und Analyse von FEP</li> <li>• Bildung von Szenarien auf Grundlage der bewerteten FEP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung relevanter Betriebsabläufe</li> <li>• Beschränkung auf mechanische und thermische Einwirkungen</li> <li>• Systematische Analyse der relevanten Betriebsabläufe</li> <li>• Bestimmung unerwünschter Ereignisse (potenzielle Störfälle)</li> </ul>
<b>Werkzeuge</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FEP-Listen, FEP-Katalog, FEP-Datenbanken</li> <li>• Sicherheitsfunktionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>
<b>Bewertung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einteilung nach Eintrittshäufigkeit</li> <li>• Betrachtung der Auswirkungen von wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erst Vermeidung (Eintrittshäufigkeit und Restrisiko)</li> <li>• Auswirkungen werden nur bei nicht Vermeidung betrachtet</li> </ul>



**Abb. 4.1** Gegenüberstellung der grundlegenden Schritte der Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase

Durch die schrittweise Weiterentwicklung der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase in den letzten Jahren, wurde die Vorgehensweise durch den Einsatz verschiedener Werkzeuge wie dem FEP-Katalog oder Sicherheitsfunktionen zunehmend systematisiert. Besonders bei einer abstrakten und komplexen Aufgabe wie der Szenarientwicklung bzw. der Ereignisanalyse ist eine strukturierte und systematische Vorgehensweise von Vorteil. Die Methode der Szenarientwicklung bietet eine Möglichkeit, systematisch und transparent alle bekannten Elemente, Prozesse und Randbedingungen eines Endlagers mit Hinsicht auf die Beeinflussung der Sicherheit (Sicherheitsfunktionen) zu untersuchen.

Eine detaillierte Betrachtung der Abläufe in Tab. 1 zeigt Unterschiede zwischen beiden Methoden auf. In der Ereignisanalyse werden keine Angaben dazu gemacht, wie die Schritte, die den Ablauf der Analyse beschreiben, konkret durchzuführen sind. Das führt dazu, dass aufgestellte Spektren von potenziellen Störfällen nicht zielsicher reproduzierbar sind. Im Gegensatz dazu sind in der Szenarientwicklung bestimmte Werkzeuge vorgesehen, mit denen die einzelnen Schritte umzusetzen sind. Der Ablauf der Szenarientwicklung ist daher gegenüber dem Ablauf der Ereignisanalyse konkreter, strukturierter und enthält keine Limitierung auf bestimmte Einwirkungen (thermische und mechanische). Mit Ausnahme dieser Limitierung sind beide Abläufe kompatibel, wobei der Ablauf der Szenarientwicklung als eine

Konkretisierung des Ablaufs der Ereignisanalyse gesehen werden kann. Daher führt eine Übertragung des Ablaufs der Szenarienentwicklung auf die Ereignisanalyse zu einer Präzisierung der Vorgehensweise.

Die Bewertung von Szenarien in der Nachverschlussphase bzw. von unerwünschten Ereignissen (potenziellen Störfällen) in der Betriebsphase wird in beiden Fällen auf Grundlage der Eintrittshäufigkeit und der radiologischen Auswirkungen durchgeführt und ist somit im Wesentlichen gleichartig.

Sowohl in der Szenarienentwicklung als auch in der Ereignisanalyse werden Entscheidungen auf Basis von Expert Judgement getroffen. Die Dokumentation derartiger Entscheidungen und ihrer Randbedingungen sind von großer Bedeutung für die Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Im Rahmen der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase trägt der Einsatz eines FEP-Katalogs entscheidend zur besseren Transparenz und dementsprechend auch einer besseren Nachvollziehbarkeit bei. In der Ereignisanalyse im Rahmen der Störfallanalyse für die Betriebsphase gibt es keine Werkzeuge, wie sie in der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase genutzt werden. D. h. Entscheidungen in der Ereignisanalyse sind, wenn sie nicht hinreichend dokumentiert wurden, nicht zweifelsfrei nachvollziehbar. Der Einsatz eines FEP-Katalogs als Dokumentationstool in der Ereignisanalyse kann diese Nachvollziehbarkeit verbessern.

Ein weiterer Punkt, der für eine Einführung der Szenarienentwicklungsmethodik in die Ereignisanalyse für die Betriebsphase spricht, ist, dass eine Angleichung der Vorgehensweisen für die Störfallanalyse der Betriebsphase und der Sicherheitsanalyse der Nachverschlussphase eine stärkere Verzahnung beider Sicherheitsanalysen ermöglicht. Diese Harmonisierung der verschiedenen Sicherheitsanalysen für die unterschiedlichen Endlagerphasen lässt eine ganzheitlichere Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Betriebsphase und Nachverschlussphase zu. Somit können bspw. geologische Prozesse identifiziert werden, die einen Einfluss auf die Sicherheit in der Betriebsphase haben, sowie Auslegungen für die Betriebsphase, die einen Einfluss auf die Sicherheit der Nachverschlussphase haben. Dieser Gedanke ist besonders für die Zielsetzung des „Integrated Safety Cases“ /IAEA 12/, wie er international immer stärker gefordert wird, von Bedeutung.

Aus den oben genannten Gründen zeigt sich für die Vorgehensweise der Ereignisanalyse ein Weiterentwicklungsbedarf. Die Methode der Szenarienentwicklung bietet dafür Möglichkeiten. Diese liegen zum einen in einer Konkretisierung der methodischen Vorgehensweise und zum anderen im Einsatz von Werkzeugen wie dem FEP-Katalog und Sicherheitsfunktionen.

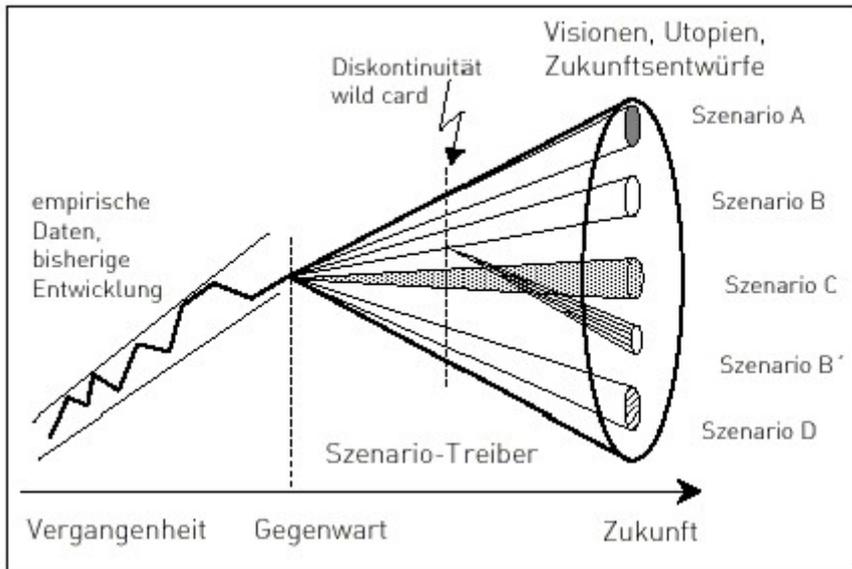
Der Vorteil einer festgelegten Vorgehensweise liegt in der Reproduzierbarkeit und der verringerten Anfälligkeit für methodische Fehler aufgrund von geringeren Interpretationsspielräumen. Der Einsatz von Werkzeugen wie bspw. dem FEP-Katalog bietet sich an, da sich diese bereits im Rahmen der Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase als praktikabel erwiesen haben und weil sie eine strukturierte Dokumentation von Entscheidungsprozessen ermöglichen, die erheblich zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Szenarientwicklung beitragen.

## **4.2 Grundsätze und Herausforderungen der Szenarientwicklung**

Im Folgenden werden besondere Herausforderungen der Szenarientwicklung dargestellt und diskutiert.

Ein Endlager wird nur eine einzige Entwicklung durchlaufen. Wie diese Entwicklung aussieht, kann aufgrund von Prognoseunsicherheiten nicht genau vorhergesagt werden. Die Szenarientwicklung bietet eine Möglichkeit, systematisch ein umfassendes Spektrum von Entwicklungsmöglichkeiten zu identifizieren und zu analysieren. Eine Betrachtung von Ungewissheiten ist dabei eine grundsätzliche Vorgehensweise in der Szenarientwicklung.

Es ist zwischen den Begriffen *Entwicklung* und *Szenario* zu unterscheiden. Ein Szenario umfasst eine Bandbreite von einzelnen Entwicklungen, deshalb kann auch von einem Entwicklungsraum gesprochen werden. Eine einzelne Entwicklung ist spezifisch und konkret. In der Abb. 4.2 ist zu erkennen, dass die Entwicklung aus der Vergangenheit als Linie dargestellt wurde. Im Gegensatz dazu werden Szenarien, Entwicklungsräume bzw. Entwicklungsmöglichkeiten in der Zukunft durch Trichter dargestellt, die eine Bandbreite von Entwicklungen darstellen sollen.



**Abb. 4.2** Darstellung von Entwicklungen und Entwicklungsmöglichkeiten in einem Szenarietrichter /DEA 15/

Im VSG-Projekt /FIS 13/ wurde eine vorläufige Sicherheitsanalyse für ein Endlager am Standort Gorleben in Deutschland erarbeitet. Dabei wurde u. a. eine Szenariomentwicklung für die Nachverschlussphase eines potenziellen Endlagers am Standort Gorleben durchgeführt. In diesem Rahmen tauchten hauptsächlich Fragestellungen an der Schnittstelle der Szenariomentwicklung zur Modellierung und Berechnung von Szenarien auf. Für die Modellierung und Berechnung von Szenarien sind konkrete Beschreibungen der Szenarien erforderlich, weil nur für diese Rechnungen durchgeführt werden können. Das „Referenzszenarium R1 zur Einlagerungsvariante AB1“ aus der VSG besteht beispielsweise für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ aus den folgenden Initial-FEP /BEU 12/:

- Fluiddruck,
- Subrosion,
- glaziale Rinnenbildung.

Die einzelnen FEP für das Teilsystem wurden grob bezüglich ihrer zeitlichen und räumlichen Relevanz beschrieben. Für die Modellierung und Berechnung von Szenarien müssen aus diesen Informationen zunächst einzelne, konkrete, repräsentative Entwicklungen abgeleitet werden. Dabei kann der Nachweis schwierig sein, dass die konkreten Rechenfälle für das gesamte Szenario repräsentativ sind.

Ferner besteht eine Abhängigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien von ihrer Bandbreite. Die kumulierte Eintrittswahrscheinlichkeit aller möglichen Szenarien zusammen beträgt 1 (100 %), da in der Realität eine Entwicklung garantiert eintreten wird. Die Gesamteintrittswahrscheinlichkeit von 100 % verteilt sich auf alle Entwicklungen innerhalb der Szenarien. Das bedeutet je größer die Bandbreite eines Szenarios ist, desto größer ist auch die Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios. Die Wahl der Szenarienbandbreite hat damit auch Einfluss auf die Klassifizierung von Szenarien und damit darauf, ob einzelne Szenarien überhaupt betrachtet werden.

Es ist anzumerken, dass in den in /UHL 16/ betrachteten Szenarientwicklungsansätzen keine einheitliche Vorgehensweise existiert und auch Werkzeuge auf unterschiedliche Weise zum Einsatz kommen. Die in diesem Bericht entwickelte und beschriebene Methode (s. Kapitel 6) soll daher als eine Möglichkeit angesehen werden, wie eine Szenarientwicklung für die Betriebsphase aussehen könnte. Da die Methode möglichst viele vorteilhafte Elemente aus den einzelnen betrachteten Szenarientwicklungsansätzen in sich vereinen soll, werden in Kapitel 5 die verschiedenen Methoden einander gegenübergestellt und die vorteilhaftesten Elemente identifiziert.



## **5 Analyse der Szenarientwicklungsmethoden und Übertragung auf die Störfallanalyse der Betriebsphase eines Endlagers**

In diesem Kapitel werden die Elemente der betrachteten Szenarientwicklungsmethoden, die einen Vorteil für die Störfallanalyse bieten, identifiziert. Dazu wird zunächst in Kapitel 5.1 das Verfahren gezeigt, nach der die in /UHL 16/ dargelegten Szenarientwicklungsmethoden ausgewertet werden. Anschließend wird in Kapitel 5.2 der konzeptuelle Ansatz für die neue Methodik beschrieben. Die Übertragung einzelner Elemente der Szenarientwicklungsmethode in die Ereignisanalyse der Betriebsphase wird in Kapitel 5.3 dargestellt.

### **5.1 Methodik zur Auswertung der Szenarientwicklungsmethoden**

Die in /UHL 16/ betrachteten Szenarientwicklungsmethoden für die Nachverschlussphase von Endlagern sollen gegenübergestellt und verglichen werden. In Kapitel 5.1.1 werden Elemente, die in jeder der Szenarientwicklungsmethoden enthalten sind, vorgestellt. Auf Grundlage dieser gemeinsamen Elemente werden in Kapitel 5.1.2 Unterschiede zwischen den Szenarientwicklungsmethoden innerhalb der Elemente identifiziert. Dazu werden die spezifischen Vorgehensweisen in den einzelnen Szenarientwicklungsmethoden betrachtet. Unterschiede werden hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile bewertet. Die dabei identifizierten vorteilhaften Elemente sollen in die Methode der Szenarientwicklung für die Betriebsphase integriert werden.

#### **5.1.1 Identifizierung von gemeinsamen Elementen der verschiedenen Szenarientwicklungsmethoden**

Alle in /UHL 16/ betrachteten Szenarientwicklungsmethoden für die Nachverschlussphase verfolgen sowohl einen Top-Down- als auch einen Bottom-Up-Ansatz. Beide Ansätze kommen in den einzelnen Szenarientwicklungsmethoden in unterschiedlichen Wichtungen zum Einsatz. 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/. Da sich beide Ansätze gut ergänzen, sollen sie ebenfalls in der Szenarientwicklung für die Betriebsphase von Endlagern zur Anwendung kommen. In diesem Kapitel werden diejenigen Elemente identifiziert, die Vorteile in den Szenarientwicklungsmethoden für die Nachverschlussphase aufzeigen. Diese vorteilhaften Elemente sollen ebenso in die Szenarientwicklung für die Betriebsphase integriert werden. Um die vorteilhaften Elemente identifizieren zu können, werden zunächst wesentliche gemeinsame Elemente der Methoden

beschrieben. Diese wesentlichen gemeinsamen Elemente werden im Folgenden kurz dargestellt:

### **Die erwartete Entwicklung**

Die erwartete Entwicklung (engl.: expected evolution) ist die Entwicklung, die für das Endlager-System als am wahrscheinlichsten angesehen wird und damit als Ausgangspunkt für alle weiteren Szenarien dient.

Bei allen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden gibt es eine erwartete Entwicklung des Endlagersystems. Diese erwartete Entwicklung und ihre Beschreibung bilden i. d. R. den ersten Schritt und damit den Ausgangspunkt für die Szenarienentwicklung. Die erwartete Entwicklung gehört in jedem Fall zum Referenzszenarium.

Der Begriff „Entwicklung“ suggeriert eine einzelne spezifische Abfolge von Ereignissen. Allerdings umfasst ein Szenario eine Bandbreite von Entwicklungen. Und auch die erwartete Entwicklung besitzt dementsprechend eine gewisse Bandbreite (Entwicklungsraum).

### **Ungewissheiten**

Die Betrachtung von Ungewissheiten ist ein zentrales Element der Szenarienentwicklung. Deshalb werden Ungewissheiten auch bei allen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden berücksichtigt. Sie dienen ferner als Ansatz für die Ableitung alternativer Szenarien.

Ungewissheiten existieren an den Stellen, wo Wissenslücken vorhanden sind. Wissenslücken entstehen dort, wo nicht ausreichend empirische Daten verfügbar sind. Dies ist für Aussagen über die Zukunft evident. Aus diesem Grund wird in der Szenarienentwicklung das Aktualitätsprinzip angewendet. Das Aktualitätsprinzip besagt, dass geologische Gesetzmäßigkeiten in der Vergangenheit ebenso wie heute herrschten. Diese Aussage wird für die Szenarienentwicklung auch auf die Zukunft erweitert.

Unsicherheiten lassen sich bspw. in der VSG in drei übergeordnete Kategorien einteilen:

- Szenariengewissheiten,
- Modellungsgewissheiten,
- Parameterungewissheiten.

Ungewissheiten werden nie vollkommen eliminiert werden können, da Wissen bezüglich Prozessen und Abläufen in der Zukunft immer begrenzt sein wird. Dies gilt insbesondere für derartig lange Zeiträume, wie sie in der Langzeitsicherheit betrachtet werden müssen. Um alle denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten zusammenzutragen und anschließend für ein individuelles Endlager zu bewerten wird eine Szenarientwicklung benötigt.

### **Einteilungen**

In allen betrachteten Szenarientwicklungsmethoden gibt es verschiedene Einteilungen. Das Ziel der Einteilung ist es, eine Struktur zu schaffen, die die Übersichtlichkeit komplexer Systeme erhöht. In der Szenarientwicklung finden sich zeitliche Einteilungen des Betrachtungszeitraumes und räumliche Einteilungen des Betrachtungsgebietes (Endlagersystem und Umgebung).

### **(Sicherheits-)Funktionen**

In allen betrachteten Szenarientwicklungsmethoden wird die Sicherheit eines Endlagers durch die Definition und Erfüllung von Aufgaben erreicht. Diese Aufgaben, die die Sicherheit eines Endlagers sicherstellen, werden als Sicherheitsfunktionen oder kurz als Funktionen bezeichnet und sind Bestandteile des Sicherheitskonzepts eines Endlagers.

### **Analyse**

In allen betrachteten Szenarientwicklungsmethoden wird eine Analyse durchgeführt, in der die Auswirkungen von Prozessen und Ereignissen auf die sicherheitsrelevanten Features (Komponenten) identifiziert werden. Sicherheitsrelevante Features dienen der Erfüllung von Sicherheitsfunktionen in der Nachverschlussphase.

### **Eintrittswahrscheinlichkeiten**

In allen betrachteten Szenarientwicklungsmethoden werden Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien als Grundlage für deren Klassifizierung genutzt.

### **Klassifizierung von Szenarien**

In allen betrachteten Szenarientwicklungsmethoden werden die Szenarien in ein Referenzszenario und Alternativszenarien eingeteilt. Anlass für die Einteilung ist die Festlegung

unterschiedlich hoher (regulatorischer) Anforderungen für die Szenarienklassen bezüglich ihrer radiologischen Auswirkungen, um das Risiko eines Endlagers zu begrenzen.

## **5.1.2 Vergleich der Szenarientwicklungsmethoden**

Anhand der im vorangegangenen Kapitel 5.1.1 beschriebenen, wesentlichen, gemeinsamen Elemente der Szenarientwicklung werden in den nachfolgenden Kapiteln die gemeinsamen Elemente der Szenarientwicklungsmethoden miteinander verglichen. Es wird auf die Unterschiede und deren Vor- und Nachteile eingegangen. Diese Analysen werden anschließend in Kapitel 5.1.2.8 zusammengefasst.

### **5.1.2.1 Die erwartete Entwicklung**

Die erwartete Entwicklung des Endlagersystems ist i. d. R. der Entwicklungsraum, der als Wahrscheinlichster angesehen wird. Damit gehört die erwartete Entwicklung zum Referenzszenario. Alle weiteren Entwicklungsmöglichkeiten (Szenarien), die von der erwarteten Entwicklung abweichen, werden demzufolge als weniger wahrscheinlich im Vergleich zur erwarteten Entwicklung angesehen. Der quantitative Nachweis, dass die erwartete Entwicklung das wahrscheinlichste Szenario ist, ist aufgrund der schwierigen genauen Quantifizierbarkeit der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien nicht möglich.

Die erwartete Entwicklung stellt den Ausgangspunkt in der Szenarientwicklung dar. Allen Szenarien inklusive der erwarteten Entwicklung liegt ein definierter Ausgangszustand (Verschlusszeitpunkt des Endlagers) zugrunde. Der Ausgangszustand wird in Form von Eigenschaften und Spezifikationen (Zustandsbeschreibungen) bezüglich der Komponenten des Endlagersystems beschrieben. Dazu zählen die Abfallspezifikationen (z. B. Radionuklidinventar), die geowissenschaftliche Standortcharakterisierung, welche die natürlichen Barrieren beinhaltet (z. B. Permeabilität des Wirtsgesteins, Lage der geologischen Schichten), sowie die zusätzlichen geotechnischen Barrieren (Permeabilität von Verschlussbauwerken, Abfallbehälter usw.). Die erwartete Entwicklung wird im Wesentlichen von der Annahme geprägt, dass alle Komponenten wie ausgelegt funktionieren. Teilweise gibt es zusätzliche, regulatorisch vorgegebene Randbedingungen, die vorschreiben, dass neben der erwarteten Entwicklung im Referenzszenario weitere Szenarien berücksichtigt werden müssen (bspw. globale Erwärmung). Einflüsse auf die erwartete Entwicklung werden entweder in Form von Randbedingungen festgelegt (bspw. durch regulatorische Vorgaben) oder alle denkbaren Prozesse und Ereignisse müssen betrachtet und hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz analysiert werden.

Diese Vorgehensweise der Beschreibung des Ausgangszustandes und der Definition einer erwarteten Entwicklung ist bei allen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden gleich. Unterschiede gibt es bei der Nutzung von FEP. FEP steht in der Nachverschlussphase für Features, Events und Processes. Dabei sind Features Merkmale und Zustände, Events sind Ereignisse und Processes sind (THMC-)Prozesse<sup>2</sup>. Einige Szenarienentwicklungsmethoden (VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/ und Schweden /SKB 06/) nutzen eine standort- und projektspezifische FEP-Datenbank, die die Berichte bezüglich der einzelnen FEP für ein bestimmtes Endlagerprojekt zusammenfasst. Diese projektspezifischen FEP-Datenbanken werden auch mit der internationalen NEA-FEP-Datenbank abgeglichen, um eine größtmögliche FEP-Abdeckung zu erreichen. Die anderen in /UHL 16/ betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/ und Schweiz /JOH 02/) beschreiben die relevanten THMC-Prozesse ausführlich in Berichten. Eine zugehörige FEP-Liste wird nur zum Abgleich mit der NEA-FEP-Datenbank genutzt. Es wird keine projektspezifische FEP-Datenbank erstellt, in der weiterführenden Informationen zu der jeweiligen FEP enthalten sind.

Der Vorteil der Vorgehensweise bei der Erstellung einer projektspezifischen FEP-Datenbank liegt in der erhöhten Übersichtlichkeit, weil sich alle relevanten Informationen zusammengefasst in der jeweiligen FEP-Beschreibung der FEP-Datenbank (VSG /BEU 12/ und ANSICHT /LOM 15/) befinden, oder in der FEP-Datenbank finden sich Verweise auf die jeweiligen relevanten Berichte (Schweden /SKB 06/). Die restlichen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden haben diesen Vorteil nicht, weil die FEP-Listen lediglich zum Abgleich mit der internationalen NEA-FEP-Datenbank genutzt werden.

### **5.1.2.2 Ungewissheiten**

Im Rahmen der Nachverschlussphase wird im Allgemeinen zwischen Szenariengewissheiten, Modellungsgewissheiten und Parameterungewissheiten unterschieden. Letzteres sind bspw. Eigenschaften von Komponenten (die durch Parameter beschreibbar/quantifizierbar sind), Ausmaße eines Prozesses oder eines Ereignisses. In Bezug auf Parameter beschreibt die Ungewissheit die Unsicherheit über Größe und Genauigkeit des Parameters. Eine seismische Untersuchungsmethode hat beispielsweise eine bestimmte Auflösung bzw. Messunsicherheit. Wenn exaktere Daten benötigt werden, können diese nur mit genaueren Untersuchungsmethoden geliefert werden. Andernfalls bestimmt die Messunsicherheit der

---

<sup>2</sup> THMC-Prozesse ist die Abkürzung für thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse.

seismischen Untersuchung die Ungewissheit über den Aufbau der geologischen Schichten (Geomorphologie). Dabei können beispielsweise die Parameter, die das Ausmaß einer geologischen Schicht beschreiben, nur mit einer bestimmten Genauigkeit (z. B.  $\pm 2$  m) bestimmt werden. Diese Ungewissheit lässt sich damit quantifizieren.

Viele Ungewissheiten in Bezug auf die Nachverschlussphase sind nicht genau zu quantifizieren. Ein Beispiel dafür ist die Stärke der Eisüberdeckung, die während einer Eiszeit über dem Endlager liegt. Hierbei kann die in der Vergangenheit aufgetretene Mächtigkeit der Eisüberdeckung als Orientierung dienen, indem im Rahmen einer konservativen Annahme z. B. die stärkste bekannte Eisdecke einer vergangenen Eiszeit für die Stärke der Eisdecke in einer kommenden Eiszeit herangezogen wird.

Die Vorgehensweise bei der Identifizierung von Ungewissheiten ist in allen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden gleich. Je nachdem, wie genau eine Aussage bezüglich Eintrittswahrscheinlichkeiten, Eigenschaften von Komponenten, Ausmaße eines Prozesses bzw. eines Ereignisses oder einer Entwicklung getroffen werden kann, wird damit gleichzeitig die Grenze der Genauigkeit bestimmt und somit die Ungewissheit festgelegt.

Wenn Parameterungewissheiten (Unsicherheiten) beispielsweise bei der Beschreibung der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems identifiziert werden, können entweder Maßnahmen ergriffen werden, die die Unsicherheit reduzieren (nur bei epistemischen Ungewissheiten möglich) oder alle denkbaren Entwicklungsmöglichkeiten werden in die verschiedenen Szenarien integriert. Wenn epistemische Unsicherheiten reduziert werden sollen, dann ist der Ursprung einer Ungewissheit zu betrachten. In Belgien werden Ungewissheiten in folgende drei Kategorien eingeteilt /SMI 09/:

- Szenarienungewissheiten,
- Modellungewissheiten,
- Parameterungewissheiten.

In Schweden werden folgende Kategorien verwendet /SKB 06/:

- Szenarienungewissheiten,
- Systemungewissheiten,
- Modellungewissheiten,
- Parameterungewissheiten,
- räumliche Ungewissheiten von Parametern.

### 5.1.2.3 Einteilung

Im Rahmen der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase von Endlagern werden verschiedene Einteilungen vorgenommen. Dabei ist zwischen einer räumlichen und einer zeitlichen Einteilung (Diskretisierung) zu unterscheiden. Die räumliche Diskretisierung erfolgt in Bezug auf das gesamte Endlagersystem. Eine zeitliche Diskretisierung erfolgt für den Betrachtungszeitraum. Ziel der Einteilung ist es, die verschiedenen Entwicklungen bzw. deren Prozesse nur in den relevanten räumlichen und zeitlichen Abschnitten zu betrachten.

Eine räumliche Einteilung wird für das Endlagersystem durchgeführt. Dabei wird das Endlager in den meisten betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/, Schweden /SKB 06/, Schweiz /JOH 02/) in einzelne Komponenten aufgeteilt. Einige dieser Komponenten sind sicherheitsrelevant, d. h. sie leisten einen Beitrag zur Sicherheit des Gesamtsystems. In der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ werden diese sicherheitsrelevanten Komponenten Barrieren genannt.

Eine räumliche wie auch zeitliche Einteilung erfolgt für die Entwicklung des Endlagersystems bzw. für die dabei ablaufenden Prozesse. Beim Screening der Prozesse wird jedem relevanten Prozess ein Zeitbereich zugeordnet (zeitliche Diskretisierung), in dem der Prozess für das Endlagersystem von Bedeutung ist. Außerdem werden jedem relevanten Prozess die Komponenten zugeordnet (räumliche Diskretisierung), auf die er sich auswirken kann. Die Szenarienentwicklung in Frankreich /AND 05/ weist dabei eine Besonderheit im Gegensatz zu den anderen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden auf. Die Kombination einer zeitlichen und räumlichen Einteilung wird hier als *Situation* bezeichnet. Eine Situation kann mehrere Prozesse enthalten.

Bis auf die Benennung gibt es in der Einteilung keine Unterschiede zwischen den betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden.

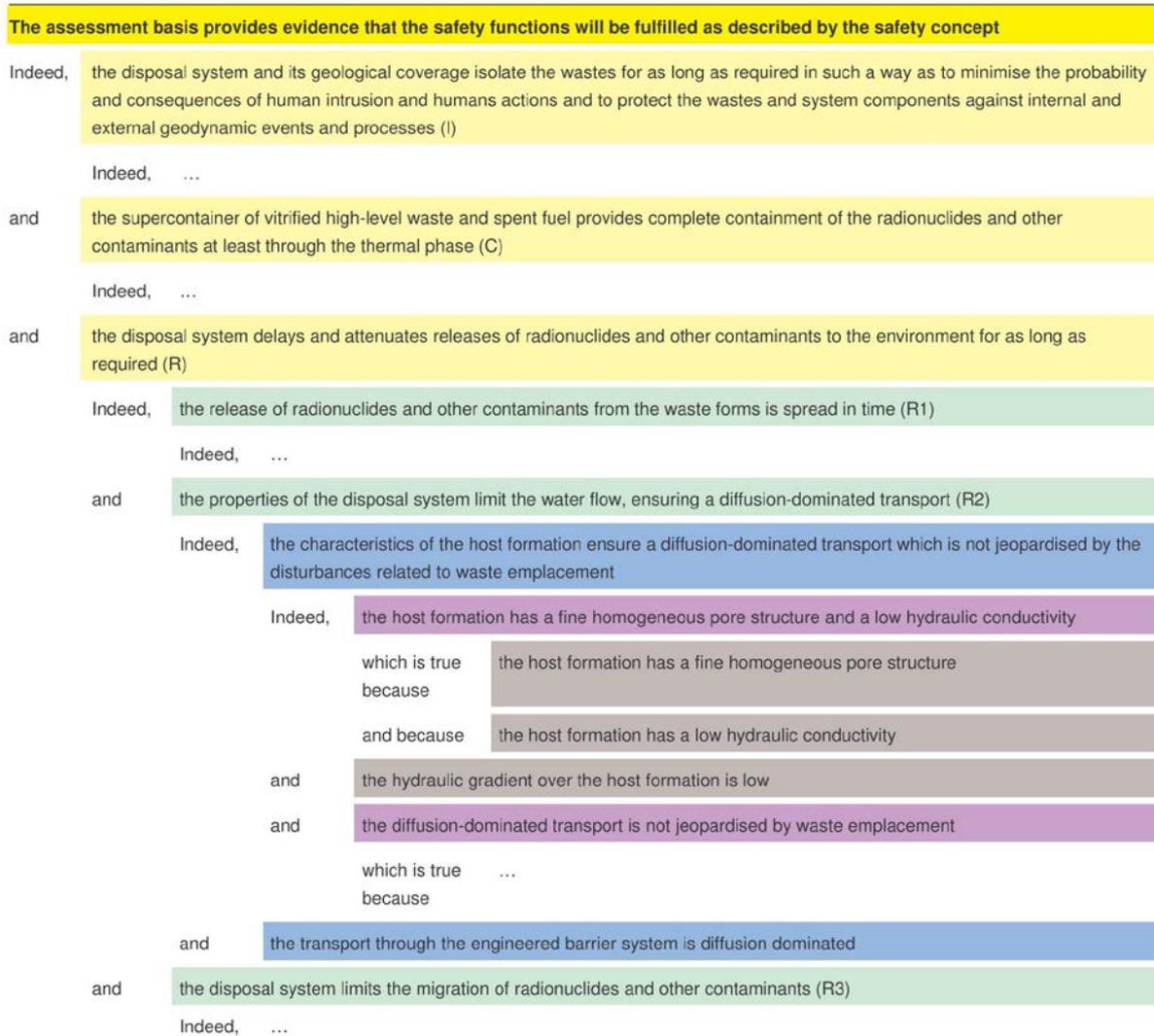
### 5.1.2.4 (Sicherheits-)Funktionen

Sicherheitsfunktionen sind Aufgaben, die durch bestimmte Komponenten des Endlagersystems erfüllt werden und damit einen Beitrag zur Sicherheit leisten. Alle betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden außer die VSG /BEU 12/ und ANSICHT /LOM 15/ benutzen dafür

den Begriff Sicherheitsfunktionen. Die VSG und ANSICHT gebrauchen synonym den Begriff Funktionen.

In den betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden unterscheiden sich die Vorgehensweisen zur Aufstellung von Sicherheitsfunktionen nur in der Darstellungsform. Alle betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden legen Sicherheitsfunktionen auf Grundlage des Sicherheitskonzeptes fest. Einige Szenarienentwicklungsmethoden (Belgien /SMI 09/ und Schweden /SKB 06/) leiten Sicherheitsfunktionen hierarchisch her und stellen diese Hierarchie in Abbildungen dar. Diese Darstellungsform liefert einen großen Beitrag zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Im Folgenden wird die hierarchische Herleitung am Beispiel von Belgien beschrieben.

Die Vorgehensweise von Belgien zur Herleitung von Sicherheitsfunktionen wird in /SMI 09/ ausführlich und nachvollziehbar beschrieben. Es wird eine Hierarchie von Sicherheitsaussagen aufgestellt. Dabei wird jede Sicherheitsaussage mit weiteren Sicherheitsaussagen aus der darunterliegenden Hierarchieebene gestützt und diese wiederum von weiteren Aussagen der nächsttieferen Ebene. Siehe dazu auch Abb. 5.1. Die oberste Ebene (gelb) beinhaltet übergeordnete Sicherheitsfunktionen in Bezug auf die Anlage (das Endlager). Ebene 2 (grün) beinhaltet spezifischere Sicherheitsfunktionen, die zur Erfüllung der übergeordneten Sicherheitsfunktion in Ebene 1 dienen. Sicherheitsfunktionen in Bezug auf einzelne Komponenten des Endlagersystems werden in Ebene 3 (blau) beschrieben und dienen der Erfüllung der spezifischeren Sicherheitsfunktion in Ebene 2. In den beiden letzten Ebenen (Ebenen 4 und 5, violett und grau) werden die Komponenteneigenschaften genannt, die zur Erfüllung der komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen aus Ebene 3 dienen. Am Beispiel der übergeordneten Sicherheitsfunktion „Verzögerung und Verminderung der Ausbreitung von Radionukliden“ in Ebene 1 (gelb) lässt sich u. a. die spezifischere Sicherheitsfunktion „die Eigenschaften des Endlagersystems begrenzen den Wasserfluss und stellen einen diffusionsdominierten Transport von Radionukliden sicher“ in Ebene 2 (grün) ableiten. Weiterhin lässt sich daraus u. a. die komponentenspezifische Sicherheitsfunktion „die Eigenschaften des Wirtsgesteins sorgen für einen diffusionsdominierten Transport von Radionukliden, der durch den eingelagerten Abfall nicht beeinträchtigt wird“ in Ebene 3 (blau) herleiten. Letztendlich lässt sich daraus für die Ebene 4 und 5 (violett und grau) u. a. die komponentenspezifische Eigenschaft „das Wirtsgestein besitzt eine geringe hydraulische Leitfähigkeit“ ableiten.



**Abb. 5.1** Beispiel für eine hierarchische Herleitung von Sicherheitsfunktionen /SMI 09/

Der Vorteil der belgischen /SMI 09/ und schwedischen /SKB 06/ Vorgehensweise liegt in einer erhöhten Transparenz und Nachvollziehbarkeit durch die hierarchische Darstellung des Sicherheitskonzeptes mit den enthaltenen Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevanten Eigenschaften (Abb. 5.1).

Dementsprechend ist die Darstellung der Aufstellung der Sicherheitsfunktionen bzw. die Aufstellung des Sicherheitskonzeptes in den Vorgehensweisen von VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/, in Frankreich /AND 05/ und in der Schweiz /JOH 02/ in Bezug auf die Nachvollziehbarkeit nachteilig, weil keine Dokumentation der Vorgehensweise in Form einer Abbildung genutzt wird.

### 5.1.2.5 Analyse der Verbindungen zwischen FEP und Sicherheitsfunktionen

Es muss für jede Entwicklungsmöglichkeit (Szenario) untersucht werden, ob und wie die im Szenario enthaltenen FEP die Sicherheitsfunktionen beeinträchtigen können. Dazu wird in einer Analyse untersucht, welche FEP im Allgemeinen Einfluss auf welche Sicherheitsfunktionen haben können. Diese Analyse wird per Expert Judgement für jedes einzelne FEP durchgeführt. Da Sicherheitsfunktionen in der Nachverschlussphase i. d. R. an Komponenten geknüpft sind, wird oftmals zunächst untersucht, ob für ein FEP die Möglichkeit des Einflusses auf eine sicherheitsrelevante Systemkomponente besteht.

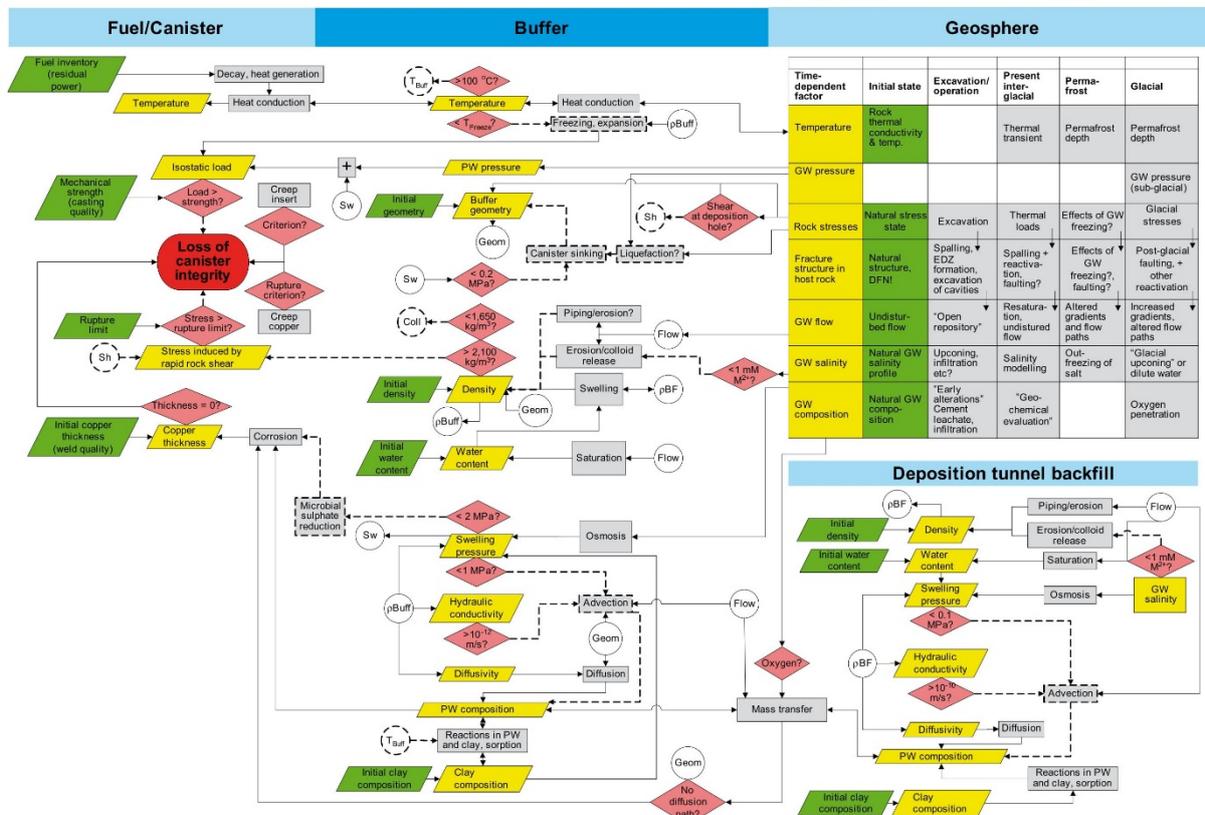
Die Analysen werden in den verschiedenen betrachteten Szenarientwicklungsansätzen unterschiedlich bezeichnet. Frankreich /AND 05/ bezeichnet die Analyse als „PARS – Phenomenological Analysis of Repository Situations“. Dabei werden Unsicherheiten und die *wesentlichen Prozesse* identifiziert. Belgien /SMI 09/ nennt die Analyse Ungewissheitsanalyse in Bezug auf Randbedingungen und sicherheitsrelevante Eigenschaften. Die Schweiz /JOH 02/ identifiziert in einer Sensitivitätsanalyse die *wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen*. In der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ wird nach potenziellen Einflüssen durch FEP auf die *Initialen-Barrieren* gesucht (Initial-FEP). Die Schweden /SKB 06/ haben die Ergebnisse ihrer Analyse in Form von verschiedenen Grafiken und Diagrammen dargestellt.

Grundsätzlich kann zwischen den Vorgehensweisen der betrachteten Szenarientwicklungsansätze in Bezug auf die Analyse kein Unterschied festgestellt werden. Es geht in der Analyse stets um die Identifizierung von relevanten Prozessen, die einen potenziellen Einfluss auf Sicherheitsfunktionen haben könnten. Sicherheitsfunktionen werden von bestimmten quantifizierbaren Eigenschaften (Parametern) von Komponenten oder Prozessen erfüllt. Infolgedessen können im Allgemeinen folgende Verbindungen zwischen den FEP identifiziert werden:

- Abhängigkeiten von Prozessen untereinander,
- Abhängigkeiten von Parametern untereinander,
- Einfluss von Prozessen auf Parameter,
- Einfluss von Parametern auf Prozesse.

Diese Abhängigkeiten und Verbindungen werden in der schwedischen Vorgehensweise /SKB 06/ grafisch dargestellt (siehe Abb. 5.2). Diese Grafiken sind teilweise sehr komplex

und wirken unübersichtlich. Solche Übersichtsgrafiken eignen sich daher weniger für die Nachvollziehbarkeit, sondern vielmehr zur vollständigen Darstellung und als Überblick.



**Abb. 5.2** FEP-Chart eines schwedischen Endlagerprojektes

Grün: Ausgangsfaktoren, Gelb: Variablen, Grau: Prozesse, Rot: Indikatoren für Sicherheitsfunktionen, durchgezogene Linien: Permanente Einwirkungen, gestrichelte Linien: Einwirkungen falls Sicherheitsfunktionen nach Indikatoren nicht erfüllt werden, Kreise: Unterbrochene Einwirkungslinie (zur Steigerung der Übersichtlichkeit) /SKB 06/.

Wie weitreichend die Auswirkungen eines FEP auf eine Komponente bzw. eine Sicherheitsfunktion sind (Quantifizierung), kann nur in einer Modellierung und Berechnung genau ermittelt werden. Die Modellierung und Berechnung von Szenarien (Referenz- und Alternativszenarien) mit ihren FEP gehört zur Szenarienbewertung und ist nicht Bestandteil der Szenarienentwicklung.

### 5.1.2.6 Eintrittswahrscheinlichkeiten

Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios wird in einigen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/ und Schweiz /JOH 02/) direkt per Expert Judgement durchgeführt. In der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT

/LOM 15/ wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios durch die Kombination der einzelnen Eintrittswahrscheinlichkeiten der enthaltenen Prozesse und deren Ausprägung bestimmt (siehe Abb. 5.3). In Schweden /SKB 06/ werden einzelne Eintrittswahrscheinlichkeiten kombiniert, um die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien zu bestimmen.

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. 5.3** Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien in der VSG /BEU 12/

Die Abbildung zeigt das Schema zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien, die in der VSG zur Anwendung kam. Bewertet werden die bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit für bestimmte Ausprägungen der FEP. Dabei wird grundsätzlich zwischen den Bewertungsklassen „wahrscheinlich“ und „weniger wahrscheinlich“ unterschieden. Je nach Kombination der einzelnen Bewertungsklassen ergibt sich eine Bewertungsklasse für das jeweilige Szenario.

Wo dies möglich ist, werden zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten statistisch gesicherte Daten genutzt. Oftmals sind statistisch gesicherte Daten jedoch nicht vorhanden. In diesen Fällen werden die einzelnen Eintrittswahrscheinlichkeiten per Expert Judgement festgelegt. Die Festlegung von Eintrittswahrscheinlichkeiten per Expert Judgement hat i. d. R. eine qualitative Form.

Ein Vorteil in der Vorgehensweise bei VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/ und in Schweden /SKB 06/ liegt darin, dass die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien durch die Kombination der Eintrittswahrscheinlichkeiten von einzelnen FEP erfolgt, die das jeweilige Szenario umfasst. Da ein Szenario aus Prozessen (FEP) und Ereignissen besteht, kann eine Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit von FEP als tiefere Ebene im Gegensatz

zur darüberliegenden Szenarienebene bezeichnet werden. Die logische Abhängigkeit von Eintrittswahrscheinlichkeiten einer untergeordneten Ebene (Ereignis- und Prozessebene) in eine übergeordnete Ebene (Szenarienebene) ist vergleichbar mit den Ebenen in einem Fehlerbaum. Durch diese systematischere Vorgehensweise erhöht sich der Grad der Nachvollziehbarkeit. Im Gegensatz dazu sind die Vorgehensweisen von Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/ und Schweiz /JOH 02/ nachteilig, weil diese die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien direkt per Expert Judgement bestimmen. Dadurch ist der Grad der Transparenz und Nachvollziehbarkeit geringer.

#### **5.1.2.7 Klassifizierung von Szenarien**

Die Einteilung in Referenzszenario und Alternativszenarien erfolgt in allen Szenarientwicklungs-methoden ähnlich. Die erwartete Entwicklung ist stets im Referenzszenario enthalten. Diese erwartete Entwicklung ist der Entwicklungsraum, der als am wahrscheinlichsten angesehen wird. Der Nachweis, dass die erwartete Entwicklung auch die wahrscheinlichste Entwicklung ist, ist nur schwer zu erbringen. Grund dafür sind die qualitativen Einschätzungen (Expert Judgement) der Eintrittswahrscheinlichkeiten. In den meisten Szenarientwicklungs-methoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/, Schweden /SKB 06/ und Schweiz /JOH 02/) wird die erwartete Entwicklung durch die Annahme gebildet, dass alle Sicherheitsfunktionen wie ausgelegt funktionieren. In Schweden /SKB 06/ besteht das Referenzszenario aufgrund von regulatorischen Vorschriften neben der erwarteten Entwicklung aus weiteren Entwicklungen, in dem die Klimaerwärmung berücksichtigt wird. In der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ umfasst das Referenzszenario alle Entwicklungen, die als wahrscheinlich (Einteilung siehe Abb. 5.3) angesehen werden. D. h. in der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ umfasst das Referenzszenario ein größeres Spektrum an Entwicklungen.

Alle Entwicklungen, die nicht dem Referenzszenario zugeordnet werden und die nicht ausgeschlossen werden können, gehören zu den Alternativszenarien. D. h. in Bezug auf die Szenarientwicklung in der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ sind alle weniger wahrscheinlichen Szenarien den Alternativszenarien zuzuordnen. In den anderen betrachteten Szenarientwicklungs-methoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/, Schweden /SKB 06/ und Schweiz /JOH 02/) sind alle Szenarien, die nicht in der erwarteten Entwicklung berücksichtigt sind und nicht ausgeschlossen werden können, den Alternativszenarien zuzuordnen.

Unterschieden werden muss zwischen der Vorgehensweise der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ sowie der Vorgehensweise der anderen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/, Schweden /SKB 06/ und Schweiz /JOH 02/). Bei Letzteren umfasst das Referenzszenario nur die erwartete Entwicklung. Dabei handelt es sich i. d. R. um ein einzelnes Szenario. Die Einschätzung, was die erwartete Entwicklung ist, wird per Expert Judgement durchgeführt. In der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ werden im Gegensatz dazu alle wahrscheinlichen Szenarien dem Referenzszenario zugeordnet.

Die Vorgehensweise der VSG /BEU 12/ und in ANSICHT /LOM 15/ bietet den Vorteil, dass das Referenzszenario aus mehreren Szenarien bestehen kann. Damit decken die Referenzszenarien, an die höhere regulatorische Anforderungen gestellt werden, einen größeren Teil des Szenarienspektrums ab. Die restlichen betrachteten Szenarienentwicklungsmethoden (Frankreich /AND 05/, Belgien /SMI 09/, Schweden /SKB 06/ und Schweiz /JOH 02/) haben daher einen Nachteil, weil das Referenzszenario i. d. R. lediglich ein einziges Szenario (die erwartete Entwicklung) umfasst. Den Nachweis zu erbringen, dass die erwartete Entwicklung die wahrscheinlichste ist, ist allerdings schwierig, da die Einschätzung bezüglich der Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Szenarien auf Basis von Expert Judgement beruht. Letztendlich kann dieser Unterschied bspw. dazu führen, dass ein Szenario in der Szenarienbewertung in der Schweiz zu den Alternativszenarien zugeordnet wird, an welche geringere Anforderungen gestellt werden. Dagegen könnte das gleiche Szenario nach der deutschen Vorgehensweise in der Szenarienbewertung zum Referenzszenario zugeordnet werden, an das höhere Anforderungen gestellt werden.

#### **5.1.2.8 Zusammenfassung des Vergleichs der wesentlichen gemeinsamen Punkte der Szenarienentwicklungsmethoden**

Nachfolgend werden die Punkte, die sich im Vergleich als vorteilhaft ergeben haben, noch einmal zusammenfassend genannt:

- Standortspezifische FEP-Datenbank als Teil der Beschreibung des Endlagers und der Entwicklung (VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/ und Schweden /SKB 06/).
- Herleitung von Sicherheitsfunktionen ausgehend von regulatorischen Schutzziele (Belgien /SMI 09/ und Schweden /SKB 06/).
- Verbesserte Anschauung durch Nutzung verschiedener Darstellungsformen, allen voran das FEP-Chart (Schweden /SKB 06/).

- Kombination von untergeordneten Eintrittswahrscheinlichkeiten (Prozesse und Ereignisse) zur Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien (VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/ und Schweden /SKB 06/).
- Klassifizierung der Szenarien in Abhängigkeit von ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und damit die Möglichkeit dem Referenzszenario mehrere Szenarien zuzuordnen (VSG /BEU 12/, ANSICHT /LOM 15/).

In Tab. A.1 im Anhang ist der Vergleich der Szenarientwicklungs-methoden aus den Kapiteln 5.1.2.1 - 5.1.2.7 tabellarisch zusammengefasst. Vorteilhafte Elemente in den Vorgehensweisen der Szenarientwicklungs-methoden sind in Tab. A.1 grün markiert.

## **5.2 Darstellung des Konzeptansatzes für betriebliche Sicherheitsanalysen**

Für die in dieser Arbeit zu entwickelnde Methode zur Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase soll die grundsätzliche Herangehensweise aus der Szenarientwicklung der Nachverschlussphase von Endlagern (siehe /UHL 16/) übernommen werden. Dazu zählen die Nutzung von FEP sowie die Anwendung des Bottom-Up und Top-Down Ansatzes. Dies folgt dem Vorschlag, der bereits in /UHL 16/ angebracht wurde. Des Weiteren werden jene wesentlichen gemeinsamen Elemente, die sich im Detailvergleich in Kapitel 5.1.2 als vorteilhaft erwiesen haben, in die Methode integriert. Im Folgenden wird anhand der wesentlichen gemeinsamen Elemente aus Kapitel 5.1.1 beschrieben, wie die zu entwickelnde Methode aussehen soll.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass in /UHL 16/ bereits erste Überlegungen für die Gestaltung einer Szenarientwicklungs-methode für die Betriebsphase erwähnt wurden, die an dieser Stelle teilweise aufgegriffen und weitergeführt werden.

### **Verfolgung eines Bottom-Up und eines Top-Down Ansatzes**

Die Begrifflichkeiten FEP-Liste, FEP-Katalog und FEP-Datenbank werden in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase häufig synonym verwendet. In dieser Arbeit sollen die Begriffe zur Verdeutlichung differenziert werden: Ein FEP-Katalog bezieht sich dabei jeweils auf ein spezifisches Endlagerkonzept an einem bestimmten Standort. Im Gegensatz dazu sind FEP-Listen standort- und konzeptunabhängig. Unter FEP-Datenbanken werden digitale Abbildungen eines FEP-Kataloges oder einer FEP-Liste verstanden. Diese strikte

Unterscheidung der Begriffe soll zu einer bewussteren Auswahl der Begrifflichkeiten und damit zu einem besseren Verständnis führen.

Der FEP-Katalog ist ein zentrales Element des Bottom-Up-Ansatzes (siehe /UHL 16/). In der zu entwickelnden Methodik soll ein Bottom-Up-Ansatz durch die Aufstellung von relevanten FEP in einem FEP-Katalog für ein jeweiliges Endlager zur Anwendung kommen. Für den Top-Down-Ansatz stellen die Sicherheitsfunktionen das zentrale Element dar. Ein Top-Down Ansatz soll mit der Aufstellung von Sicherheitsfunktionen im Rahmen der Erstellung des Sicherheitskonzeptes in die zu entwickelnde Methodik integriert werden. Beide Ansätze in Kombination sollen die Grundlage zur Ableitung von Szenarien darstellen.

### **Die erwartete Entwicklung**

Die erwartete Entwicklung wird in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase dem Referenzszenario zugeordnet und wird als Ausgangspunkt für die Szenarientwicklung genutzt. Die erwartete Entwicklung ist vergleichbar mit dem Normalbetrieb eines Endlagers in Anlehnung an das gestaffelte Sicherheitskonzept in Kernkraftwerken (siehe Abb. 5.4). Der Normalbetrieb wird auch als bestimmungsgemäßer Betrieb bezeichnet und soll als Ausgangspunkt für die Ableitung von Szenarien für die Betriebsphase genutzt werden.

### **Ungewissheiten**

Ungewissheiten kommen an den Stellen vor, wo Wissenslücken vorhanden sind. Wissenslücken beziehen sich i. d. R. auf Parameter von Prozessen und Ereignissen. Auch für die Betriebsphase, die im Vergleich zum Betrachtungszeitraum der Langzeitsicherheit wesentlich kürzer ist, gilt, dass Ungewissheiten nicht vollständig eliminiert werden können. Jedoch sind Parameter von Prozessen und Ereignissen wesentlich besser und akkurater vorhersagbar, weil sie nicht so über so lange Zeiträume extrapoliert werden müssen.

Ungewissheiten dienen auch in der Betriebsphase als Grundlage für die Ableitung von Alternativszenarien.

## **Einteilungen**

Eine räumliche Einteilung des Endlagersystems wird auch für die Betriebsphase angestrebt und wurde bereits in der Störfallanalyse Konrad /BFS 96/ durchgeführt. Danach wird die Anlage zunächst in die folgenden drei Anlagenbereiche eingeteilt:

- Übertägiger Anlagenbereich,
- Transportbereich,
- Untertägiger Anlagenbereich.

Jeder dieser Anlagenbereiche kann weiter in untergeordnete Betriebsbereiche eingeteilt werden. Siehe dazu die beispielhafte Anwendung der entwickelten Methode in Kapitel 7.2.

Die Betriebsphase soll zeitlich in die Einlagerungsbetriebsphase und in die Verschlussphase eingeteilt werden. Falls eine Rückholung von Abfällen vorgesehen ist, so ist außerdem eine Rückholphase zu betrachten. Diese Einteilungen sollen eine Struktur erzeugen, die die Analyse systematisieren soll.

## **(Sicherheits-)Funktionen**

Der Begriff Sicherheitsfunktion war bisher nicht Bestandteil der Sicherheitsanalyse für die Betriebsphase. Jedoch gibt es auch in der Betriebsphase ein Sicherheitskonzept. Sicherheitsfunktionen sollen wie in der Nachverschlussphase in der zu entwickelnden Methode (Szenarientwicklung) für die Betriebsphase zum Einsatz kommen, um das Sicherheitskonzept genauer zu definieren. Dies soll erfolgen indem die Funktionen beschrieben werden, die einen Beitrag zur Sicherheit in der Betriebsphase leisten. Im Unterschied zur Nachverschlussphase können Sicherheitsfunktionen in der Betriebsphase von Komponenten und von Personalhandlungen (Faktor Mensch) übernommen werden. Die Sicherheitsfunktionen sollen nach dem Vorbild von Belgien (siehe Abb. 5.1) hierarchisch abgeleitet werden.

## **Analyse**

Die Analyse soll ebenso wie in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase auch in der zu entwickelten Methodik für die Betriebsphase zum Einsatz kommen. In der Analyse werden die Abhängigkeiten und Verbindungen zwischen FEP ermittelt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Ermittlung von Einflüssen auf sicherheitsrelevante Komponenten und

sicherheitsrelevante Personalhandlungen. Sicherheitsrelevante Komponenten und Personalhandlungen dienen der Erfüllung von Sicherheitsfunktionen in der Betriebsphase.

Bei der Analyse der FEP-Verbindungen ist die Zuordnung von Prozessen und Ereignissen zu relevanten Zeitabschnitten und Betriebsbereichen hilfreich.

### **Eintrittswahrscheinlichkeiten**

Eintrittswahrscheinlichkeiten sollen neben den radiologischen Auswirkungen in der Betriebsphase der zweite Teil der Grundlage für die Einteilung von Szenarien darstellen. Für die Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten sollen die Vorgehensweisen und die Werkzeuge aus der PSA für Kernkraftwerke zum Einsatz kommen. Allen voran sollen Fehlerbäume für die Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten Anwendung finden, wenn keine statistisch gesicherten Daten für das TOP-Ereignis verfügbar sind.

### **Einteilung von Szenarien**

In der zu entwickelnden Methodik soll eine Einteilung von Szenarien anhand eines definierten Bewertungsmodells/-schemas durchgeführt werden. Dazu sollen die Sicherheitsebenen aus dem gestaffelten Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke genutzt werden. Das gestaffelte Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke /ILK 08/ besteht aus den Sicherheitsebenen, die in Abb. 5.4 dargestellt sind. Der Fokus liegt dabei zunächst auf der Unterscheidung zwischen:

- Bestimmungsgemäßem Betrieb (Sicherheitsebene 1),
- Betriebsstörungen (Sicherheitsebene 2),
- Auslegungsstörfällen (Sicherheitsebene 3) und
- auslegungsüberschreitende Störfälle (Sicherheitsebene 4).

Sicherheitsebene		Maßnahmen	Sicherheitsziele	
Nr.	Zustände		technisch	radiologisch
1	Normalbetrieb	–Qualitätsgewährleistung der technischen Einrichtungen und betrieblichen Maßnahmen –sicherheitsgerichtetes Handeln	Vermeidung von Störungen	Einhaltung der Grenzwerte für die Abgaben radiologischer Stoffe mit Minimierungsgebot
2	Anomaler Betrieb	–Inhärent sicheres Anlagenverhalten, –zusätzl. betriebliche Einrichtungen –Begrenzungseinrichtungen –Rückgriff auf Sicherheitseinrichtungen	Beherrschung von Störungen	
3	Störfälle (Auslegungsstörfälle)	–Inhärent sicheres Anlagenverhalten, –Sicherheitseinrichtungen	Beherrschung von definierten Auslegungsstörfällen	Einhaltung der Planungsrichtwerte für die Strahlenexposition der Bevölkerung
4a	Die Ebene 3 überschreitende Ereignisse und Zustände	–Inhärent sicheres Anlagenverhalten –spez. technische Einrichtungen und Maßnahmen –Rückgriff auf Sicherheitseinrichtungen	Beherrschung von ATWS und Notstandsfällen <sup>1)</sup>	Begrenzung der radiologischen Auswirkungen (Minderung des Risikos)
4b		–Maßnahmen des anlageninternen Notfallschutzes mit Rückgriff auf die Reserven der Schutzmaßnahmen der vorgelagerten Sicherheitsebenen	Vermeidung von Kernschmelzen	
4c			Schadensminderung bei Kernschmelzen	

<sup>1)</sup> ATWS: Transienten mit unterstelltem Ausfall der RESA (Reaktorschnellabschaltung); Notstandsfälle: z. B. Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle

#### Abb. 5.4 Gestaffeltes Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke /LIE 09/

Neben der Eintrittswahrscheinlichkeit soll auch das radiologische (Schadens-)Ausmaß eines Szenarios zur Einteilung von Szenarien herangezogen werden. Ein Beispiel für eine solches Bewertungsschema ist in /PEI 09/ zu finden.

#### Gegenüberstellung der Begrifflichkeiten Störfall, potenzieller Störfall und Ereignisse

Der Begriff *Störfall* bezieht sich im Bereich der Kerntechnik meist auf Kernkraftwerke. In der Strahlenschutzverordnung /SSV 17/ wird ein Ereignisablauf, bei dessen Eintreten der Betrieb einer Anlage oder eine 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 als Störfall bezeichnet. D. h. ein Störfall ist im Allgemeinen immer von sicherheitstechnischer Relevanz.

Dementsprechend ist das Ergebnis der Ereignisanalyse lediglich eine Sammlung von Ereignissen bzw. Szenarien. Es sind aber keine Störfälle, da die Ereignisse bzw. Szenarien bei ihrer Identifikation in der Ereignisanalyse noch nicht hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen

Relevanz bewertet wurden. Daher ist auch der Begriff der *Störfallliste*, wie das Ergebnis der Ereignisanalyse betitelt wird, nicht zutreffend und irreführend.

Weil die Ereignisse bzw. Szenarien aus der Ereignisanalyse nach ihrer Bewertung durchaus Störfälle sein können (aber nicht müssen), bietet sich der Begriff der *potenziellen Störfälle* an. Damit sind *potenzielle Störfälle* Ereignisse, die unter Umständen auch Störfälle sein können. Der Begriff der Störfallliste wird ersetzt durch den passenderen Begriff des *Ereignis- bzw. Szenarienspektrums*. Ein *Ereignisspektrum* besteht demnach aus *potenziellen Störfällen*.

### 5.3 Übertragung des FEP-Katalogs

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass erste Ansätze für einen FEP-Katalog für die Betriebsphase bereits in /UHL 16/ aufgezeigt wurden. Diese Ansätze werden hier genutzt und weiterverfolgt.

Der FEP-Katalog für die Betriebsphase soll aus der Szenarientwicklung der Nachverschlussphase übernommen werden. Dabei werden vereinzelt Veränderungen vorgenommen um den Katalog anzupassen. Diese Veränderungen werden im Folgenden aufgeführt und beschrieben.

FEP steht in der Nachverschlussphase für Features, Events und Processes. Dabei sind Features Merkmale und Zustände, Events sind Ereignisse und Processes sind (THMC-)Prozesse. Sicherheitsfunktionen in der Nachverschlussphase können beispielsweise durch natürlich ablaufende Prozesse im Endlagersystem (Processes, z. B. Korrosion), Ereignisse im Endlagersystem (Events, z. B. Erdbeben) bzw. durch statische unentdeckte Fehler bezüglich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften (Features, z. B. höhere Porosität des Wirtsgesteins als angenommen) beeinträchtigt werden. Menschliche Handlungen spielen in der Nachverschlussphase nur in Ausnahmefällen (Human Intrusion Szenarien) eine Rolle, die im Rahmen der Szenarientwicklung nicht betrachtet werden /UHL 16/.

Für die Betriebsphase sind andere FEP als für die Nachverschlussphase relevant. Beispielsweise sind menschliche Einflüsse für die Betriebsphase von Bedeutung, da der Mensch z. B. bei der Einlagerung von Abfallbinden eine aktive Rolle einnimmt. Diese menschlichen Einflüsse können sowohl Fehlhandlungen (negativ) als auch Gegenmaßnahmen bei Störfällen und Störungen (positiv) sein. Daher können Sicherheitsfunktionen in der Betriebsphase nicht nur von Systemkomponenten und ihren Eigenschaften (sicherheitsrele-

vante Eigenschaften) sondern auch durch organisatorische Maßnahmen (sicherheitsrelevante Personalhandlungen) erfüllt werden /UHL 16/.

In der Betriebsphase können Sicherheitsfunktionen durch statische unentdeckte Fehler bezüglich der sicherheitsrelevanten Eigenschaften (Systemkomponenten), Fehler in den Betriebsabläufen, übergreifende Einwirkungen (EVI und EVA) sowie weitere ablaufende Prozesse im Endlagersystem (Processes) beeinflusst werden. Demzufolge weisen die FEP-Kategorien in der Betriebsphase eine abweichende Definition im Gegensatz zur Nachverschlussphase auf. Es werden folgende Kategorien für den FEP-Katalog für die Betriebsphase definiert:

### **Systemkomponenten (Features)**

Das Endlager und das Einlagerungssystem bestehen aus Komponenten (Systems, Structures and Components – SSC). Dazu zählen beispielsweise ein Transportfahrzeug oder die Abfallbinde im Endlager. Jede Komponente soll in weitere (Unter-)Komponenten hierarchisch aufgeschlüsselt werden können, die über bestimmte Eigenschaften verfügen. Komponenten und Eigenschaften sind mit der FEP-Katalog-Kategorie „*Features*“ aus der Nachverschlussphase vergleichbar.

### **Betriebsabläufe (Processes)**

Das Einlagerungssystem besteht neben Komponenten ebenso aus definierten Einlagerungsabläufen (Betriebsabläufe). Ein Beispiel für einen Einlagerungsablauf ist der Schachttransport in der Schachtförderanlage. Analog zu den Komponenten sollen die Einlagerungsabläufe in einzelne Schritte zerlegt werden können. Einlagerungsabläufe sind mit der FEP-Katalog-Kategorie „*Processes*“ aus der Nachverschlussphase vergleichbar.

### **Übergreifende Einwirkungen (Events)**

Neben Einwirkungen von innen (EVI) können in einem Endlager auch Einwirkungen von außen (EVA) wie etwa ein Erdbeben auftreten. Als Datenbasis für mögliche EVI und EVA soll einschlägige Literatur aus dem Bereich der Kerntechnik (bspw. /IAEA 10/) und der Endlagerung dienen. Übergreifende Einwirkungen sind mit der FEP-Katalog-Kategorie „*Events*“ aus der Nachverschlussphase vergleichbar.

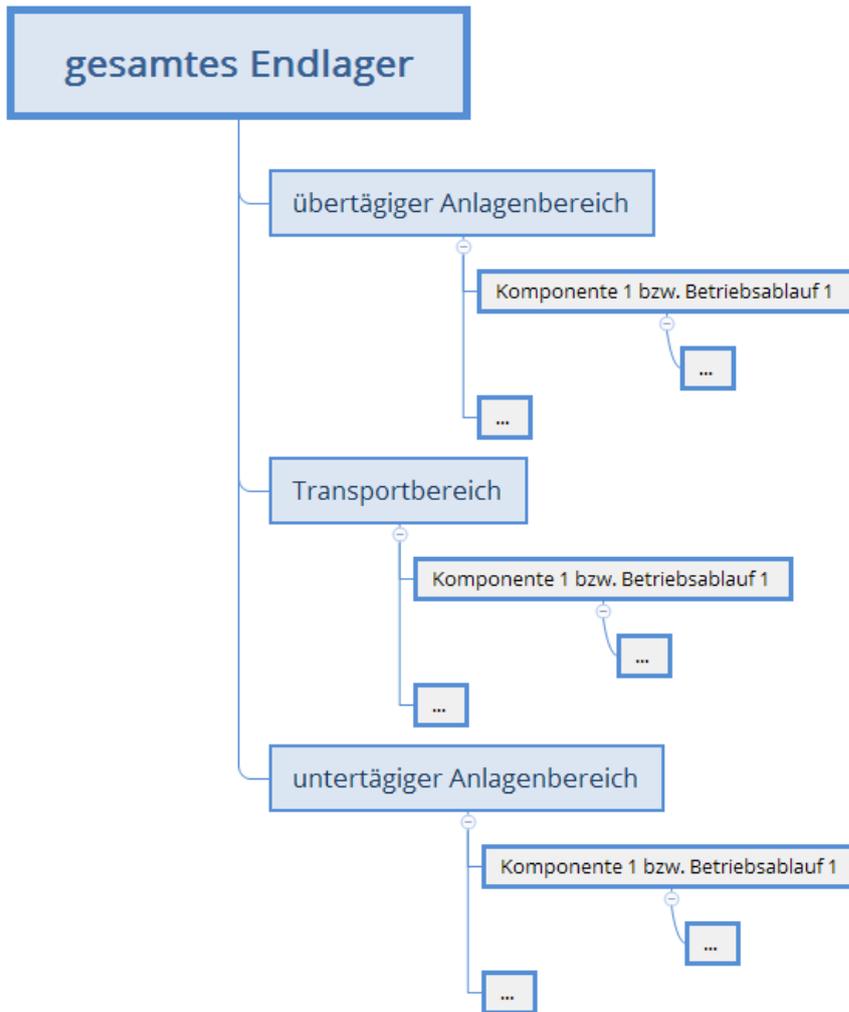
### **Weitere Prozesse (Processes)**

Alle weiteren Prozesse, die nicht in die zuvor genannten Kategorien passen, die aber während der Betriebszeit eines Endlagers ablaufen können, werden der Kategorie „weitere Prozesse“ zugeordnet. Zu weiteren Prozessen zählen beispielsweise Alterungs- und Ver-

schleißprozesse. Als Quelle für weitere Prozesse in der Betriebsphase können auch andere FEP-Listen (z. B. die NEA-FEP-Liste) für die Betriebsphase dienen. Ersatzweise kann die NEA-FEP-Liste im Rahmen eines Screenings herangezogen werden (siehe Kapitel 6.1.1.2).

Wie den Definitionen zu entnehmen ist, wurden die Kategorien und damit die grundsätzliche Struktur der FEP aus der Nachverschlussphase übernommen. In Kapitel 5.4 wird auf die Benennung der Kategorien für den FEP-Katalog der Betriebsphase und auf die FEP-Kategorien selbst tiefer eingegangen. Außerdem zeigt Abb. 5.7 einen Vergleich der FEP-Kategorien in der Nachverschlussphase und der Betriebsphase und ihren Zusammenhang.

Die Kategorien Systemkomponenten (Features) und Betriebsabläufe (Processes) im FEP-Katalog sollen hierarchisch strukturiert werden (siehe Abb. 5.5). Die oberste Hierarchieebene stellt das gesamte Endlager bzw. den gesamten Einlagerungsablauf dar. In der zweiten Hierarchieebene findet eine Aufteilung des Endlagers bzw. der Betriebsabläufe in die drei Anlagenteile übertägiger Anlagenbereich, Transportbereich der Anlage (Schacht bzw. Rampe) sowie der untertägige Anlagenbereich statt. Diese Aufteilung kann durch sehr viele weitere Hierarchieebenen sehr detailliert und damit unübersichtlich werden. Aus diesem Grund sollte der Detaillierungsgrad bzw. die Anzahl der Hierarchieebenen jeder Komponente bzw. jedes Arbeitsschrittes in Abhängigkeit ihrer Sicherheitsrelevanz gewählt werden. Die Sicherheitsrelevanz ergibt sich aus der Herleitung von Sicherheitsfunktionen (siehe Kapitel 6.1.2). Ziel dieser hierarchischen Struktur ist die Erhöhung der Übersichtlichkeit und die Modularisierung des FEP-Katalogs.



**Abb. 5.5** Hierarchische Darstellungsform von Komponenten und Betriebsabläufen

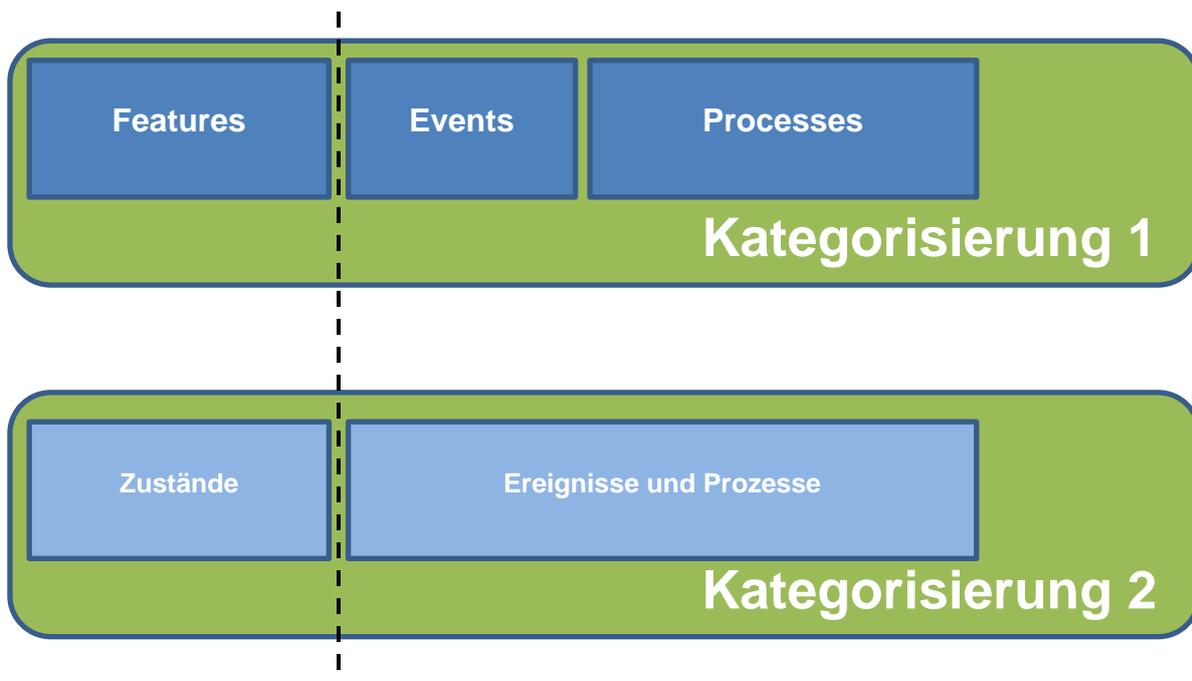
Für jedes FEP im FEP-Katalog soll ein Datenblatt erstellt werden, welches die relevanten Informationen zu dem jeweiligen FEP enthält. Das Datenblatt sollte mindestens folgende Punkte enthalten:

- Eine eindeutige Bezeichnung durch eine FEP-Nummer,
- eine treffende Kurzbezeichnung,
- eine Kurzbeschreibung,
- die Eintrittswahrscheinlichkeit,
- die Beeinträchtigung einer Sicherheitsfunktion,
- direkte FEP-Verbindungen (beeinflussende und beeinflusste FEP).

## 5.4 FEP-Benennung und FEP-Kategorien

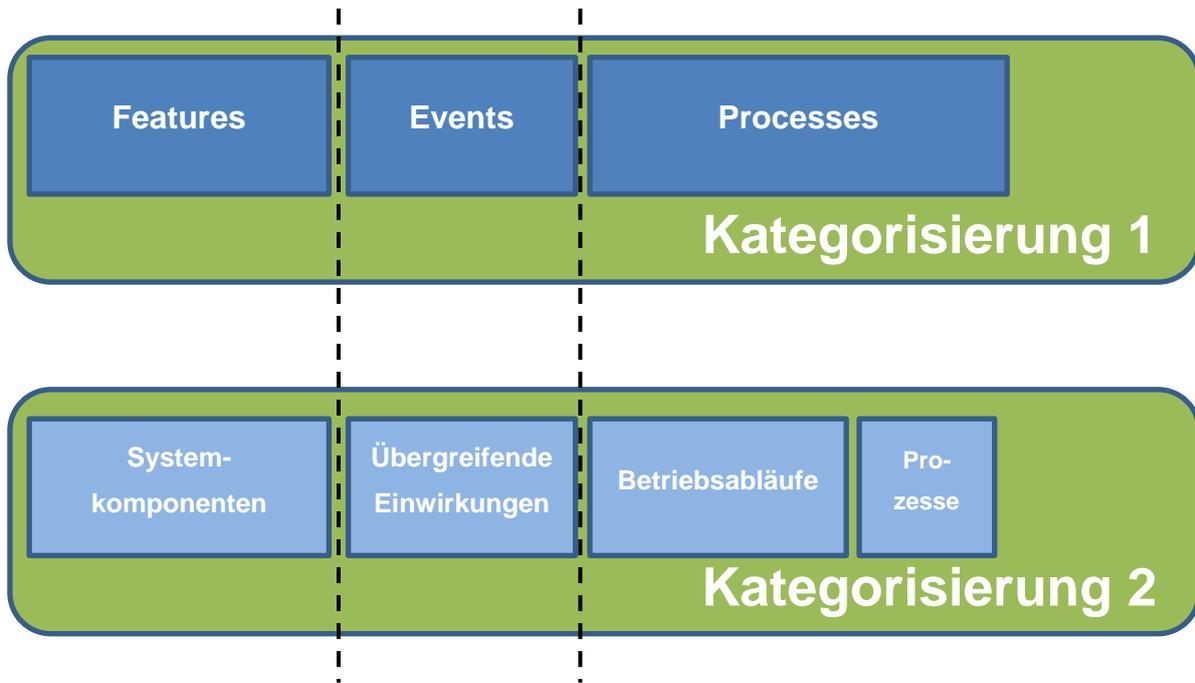
Im Gegensatz zur Nachverschlussphase muss in der Betriebsphase auch der Einfluss des Menschen in der Szenarientwicklung berücksichtigt werden. Um dies zu verdeutlichen, sollten die Betriebsabläufe und Personalhandlungen in einer eigenen neuen Kategorie im Rahmen des FEP-Kataloges eingeordnet werden. Diese neue Kategorie wird „Operations“ genannt. Von einer Umbenennung des FEP-Katalogs in FEPO-Katalog (Features, Events, Processes und Operations) wird jedoch abgesehen, da dies die Harmonisierung der Methoden für Betriebs- und Nachverschlussphase erschwert. Der Katalog soll demzufolge in der Nachverschlussphase und in der Betriebsphase gleichermaßen als FEP-Katalog bezeichnet werden. Die zusätzliche Kategorie „Operations“ wird für die Betriebsphase in die Kategorie „Processes“ integriert.

Das Projekt ANSICHT /LOM 15/ umfasste eine Umstrukturierung des FEP-Katalogs im Rahmen der Optimierung der Szenarientwicklungsmethode, indem die Kategorien „Zustände“ sowie „Ereignisse und Prozesse“ genutzt wurden. Allerdings sind diese Kategorien als eine Art zweite Kategorisierung zu verstehen, da der FEP-Katalog seine Bezeichnung behielt und weil die Kategorien der beiden Kategorisierungsmöglichkeiten miteinander kompatibel sind. In Abb. 5.6 sind die Kategorisierungen und ihr Zusammenhang aus dem Projekt ANSICHT graphisch dargestellt.



**Abb. 5.6** Darstellung der Kategorisierungen im Projekt ANSICHT /LOM 15/ und ihr Zusammenhang

Angelehnt an diese Anpassung aus dem Projekt ANSICHT wurden ebenfalls für den FEP-Katalog für die Betriebsphase in einer zweiten Kategorisierung die Kategorien Systemkomponenten, Betriebsabläufe, übergreifende Einwirkungen und weitere Prozesse eingeführt. In Abb. 5.7 sind die beiden Kategorisierungen für FEP in der Betriebsphase dargestellt und ihr Zusammenhang abgebildet.



**Abb. 5.7** Darstellung der Kategorisierungen für FEP in der Betriebsphase und ihr Zusammenhang



## **6 Methode zur Ableitung von Szenarien für die Betriebsphase**

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methode beschrieben, nach der Szenarien in der Betriebsphase abgeleitet werden sollen. Zunächst werden in Kapitel 6.1 die Grundlagen der Methode erläutert. Es werden wichtige Begriffsdefinitionen und die Beschreibung des Ausgangszustandes bzw. des Normalbetriebs gegeben sowie die Sicherheitsfunktionen hergeleitet. Anschließend wird in Kapitel 6.2 die Vorgehensweise zur Entwicklung von Störfallszenarien in der Betriebsphase von Endlagern im Rahmen einer Analyse vorgestellt.

### **6.1 Grundlagen**

Die Aufstellung des FEP-Kataloges wird in Kapitel 6.1.1 dargestellt. Anschließend wird in Kapitel 6.1.2 die Herleitung von Sicherheitsfunktionen erläutert. Die hier aufgeführte Reihenfolge muss dabei nicht richtungsweisend für die Anwendung der Methode sein. Wie auch in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase sollen sich beide Ansätze gegenseitig ergänzen. Beide Ansätze bilden zusammen eine Grundlage für die Analyse in Kapitel 6.2, in der die Szenarien aufgestellt werden.

#### **6.1.1 Erstellung des FEP-Katalogs**

Ein FEP-Katalog enthält alle relevanten FEP (Features, Events und Processes) des Endlagerkonzepts an einem spezifischen Standort. Zum einen dienen die Systemkomponenten und Betriebsabläufe im FEP-Katalog der Beschreibung des Endlagers und seines Betriebes. Zum anderen dienen übergreifende Einwirkungen und Prozesse als auslösende Ereignisse.

Folgende Bestandteile sollten in einen FEP-Katalog für die Betriebsphase aufgenommen werden:

- Systemkomponenten (Features) des Endlagers und Betriebsabläufe (Processes) im Endlager; siehe Kapitel 6.1.1.1,
- übergreifende Einwirkungen von innen – EVI und übergreifende Einwirkungen von außen – EVA (Events); siehe Kapitel 6.1.1.1,
- weitere Prozesse (Processes) und Ergänzungen des gesamten FEP-Katalogs aus dem Screening anderer FEP-Listen; siehe Kapitel 6.1.1.2.

### **6.1.1.1 Beschreibung des Endlagers und auslösende Ereignisse**

Als Grundlage für die Ableitung von Störfallszenarien gilt die Beschreibung des betrachteten Endlagers im Ausgangszustand bzw. im Normalbetrieb (bestimmungsgemäßer Betrieb). Der Ausgangszustand für die Sicherheitsanalyse der Betriebsphase beschreibt den Zustand des Endlagers zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme. Der Normalbetrieb umfasst alle Vorgänge, die nach Betriebshandbuch, Störfallhandbuch und Prüfhandbuch planmäßig in der Betriebsphase durchgeführt werden. Er ist insoweit vergleichbar mit der erwarteten Entwicklung in der Nachverschlussphase bei der Szenarientwicklung. Bei der Beschreibung des Endlagerbetriebs liegt der Schwerpunkt auf dem Einlagerungssystem und den Einlagerungsabläufen.

Neben der Beschreibung des Ausgangszustandes und des Normalbetriebs in Textform sollen die wichtigsten Bestandteile der Beschreibung in einem FEP-Katalog zusammengefasst werden. Die Struktur des FEP-Kataloges soll, wie bereits in Kapitel 5.3 erwähnt, aus der Szenarientwicklung der Nachverschlussphase übernommen werden. Um einen modularen Aufbau zu erreichen, ist der FEP-Katalog hierarchisch zu strukturieren. Die Hierarchie bezieht sich dabei primär auf den Aufbau der Komponenten (Features).

Diese Modularität soll eine reibungslose Anpassung des FEP-Kataloges an andere Einlagerungskonzepte oder veränderte Randbedingungen durch Austausch einzelner Komponenten ermöglichen. Ein Modul soll dabei alle zugehörigen FEP umfassen, die bestimmte FEP be-  
dingen.

Ein FEP-Katalog enthält relevante FEP, die für das betrachtete Endlagerkonzept und den Endlagerstandort nicht ausgeschlossen werden können. Aus der Beschreibung des Endlagers und des Normalbetriebs (Anlagen- und Konzeptbeschreibung) können die Systemkomponenten (Features) und Betriebsabläufe (Processes) entnommen werden. Die Definitionen dieser Kategorien wurden in Kapitel 5.3 erläutert.

Als Grundlage für den Bottom-Up-Ansatz werden auslösende Ereignisse benötigt, die zu einer sicherheitsrelevanten Abweichung vom Ausgangszustand bzw. vom Normalbetrieb führen können. Unter auslösenden Ereignissen werden übergreifende Einwirkungen (Events) und weitere Prozesse (Processes) verstanden. Definitionen dieser Kategorien wurden bereits in Kapitel 5.3 dargestellt.

### **6.1.1.2 Screening**

Ziel des Screenings ist es, ausgehend von einer FEP-Datenbasis, die relevanten FEP zu identifizieren und in den FEP-Katalog zu übernehmen. Idealerweise wird für ein Screening eine FEP-Datenbank eines vergleichbaren Endlagerstandorts und -konzepts als FEP-Datenbasis herangezogen. Optimal wäre, einen FEP-Katalog als FEP-Datenbasis zu nutzen, der bereits für die Betriebsphase eines Endlagers zum Einsatz kam. In Bezug auf den Anwendungsbereich ist bei der Auswahl der FEP-Datenbasis eine hohe Vergleichbarkeit anzustreben. Je ähnlicher dabei das zu Grunde liegende Endlager- und Einlagerungskonzept des FEP-Kataloges ist, welches als FEP-Datenbasis herangezogen wird, umso besser sind die FEP-Kataloge miteinander vergleichbar.

In der Szenarientwicklung der Nachverschlussphase kann stets ein Bezug zur NEA-FEP-Liste hergestellt werden, da diese auf Basis verschiedener nationaler FEP-Kataloge und FEP-Listen eine umfangreiche Datenbasis für die Nachverschlussphase für Endlager darstellt. Dagegen existiert für die Betriebsphase von Endlagern bisher keine FEP-Liste. Im Rahmen des BASEL-Projektes /WOL 18a/, /WOL 18b/ wird zur Zeit von der GRS eine FEP-Liste für die Betriebsphase erarbeitet, diese wird jedoch erst nach Abschluss des BASEL-Projektes zu Verfügung stehen. Alternativ können die NEA-FEP-Liste oder andere FEP-Listen für die Nachverschlussphase von Endlagern zum Screening herangezogen werden, dabei ist jedoch zu prüfen, welche FEP auch in der Betriebsphase relevant sein könnten.

Die FEP aus diesen genannten Quellen sollen gescreent werden, d. h. jedes FEP wird einzeln betrachtet und geprüft, ob es auf die Betriebsphase eines betrachteten Endlagers anwendbar ist. Dieses Screening soll einen möglichst umfangreichen FEP-Katalog für die Betriebsphase eines Endlagers ergeben. Das Screening sollte stets den letzten Schritt bei der Erstellung eines FEP-Katalogs darstellen und dient der Ergänzung und damit der Verbesserung des Umfangs einer FEP-Liste. Die Vollständigkeit einer FEP-Liste kann dabei jedoch nicht nachgewiesen werden. Um die Transparenz zu wahren, sollte der Screeningprozess, der oftmals per Expert Judgement durchgeführt wird, umfassend dokumentiert werden. Insbesondere sollte ein Ausschluss von FEP begründet werden.

### **6.1.2 Herleitung von Sicherheitsfunktionen (Top-Down Ansatz)**

Als weitere Grundlage für die Ableitung von Störfallszenarien gilt die Identifizierung der Sicherheitsfunktionen. Sicherheitsfunktionen bilden den Ausgangspunkt für den Top-Down-

Ansatz in der Szenarienentwicklung. In der Betriebsphase können Sicherheitsfunktionen von bestimmten Eigenschaften von Komponenten und teilweise auch von spezifischen Betriebsabläufen erfüllt werden. Es muss festgestellt werden, durch welche Komponenten bzw. deren Eigenschaften oder durch welche Betriebsabläufe die Sicherheitsfunktionen erfüllt werden. Dies soll mit Hilfe der hierarchischen Herleitung von Sicherheitsfunktionen nach dem Vorbild der Szenarienentwicklung in Belgien (siehe Abb. 5.1) geschehen.

Bei der hierarchischen Herleitung von Sicherheitsfunktionen wird mit den zugrundeliegenden Gesetzen und Verordnungen (grundsätzliche regulatorische Anforderungen) begonnen. In Bezug auf radiologische Vorschriften für die Betriebsphase eines Endlagers sind dies in Deutschland das Atomgesetz – AtG /ATG 17/ (§ 1 Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgütern vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen) und die Strahlenschutzverordnung – StrlSchV /SSV 16/ (§ 6 Vermeidungs- und Minimierungsgebot von Strahlenexpositionen). Die Anforderungen aus diesen Regelwerken können als grundsätzliche Schutzziele bezeichnet werden und bilden somit die oberen Hierarchiestufen.

Weitere Anforderungen können dem untergesetzlichen Regelwerk wie bspw. den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/, ESK-Leitlinien und -Stellungnahmen sowie entsprechenden KTA-Regeln entnommen werden.

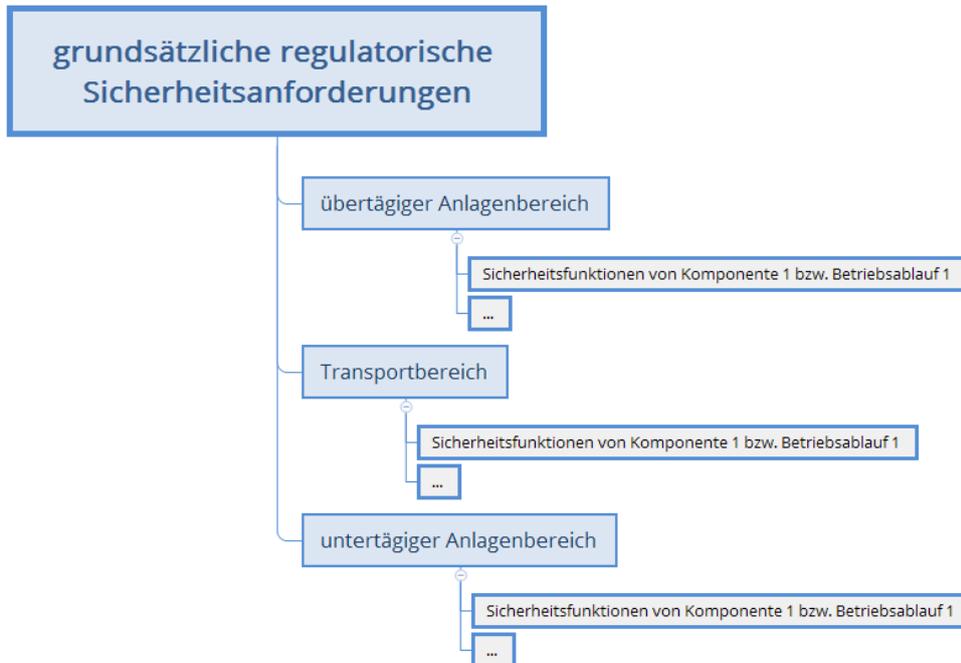
Für eine bessere Strukturierung kann in den folgenden Ebenen gleichermaßen, wie bei den Komponenten und Betriebsabläufen (siehe Kapitel 5.3), zunächst eine Einteilung des Endlagers in drei Endlagerbereiche erfolgen:

- den übertägigen Anlagenbereich,
- den Transportbereich der Anlage (Schacht bzw. Rampe) und
- den untertägigen Anlagenbereich.

Für die einzelnen Anlagenbereiche werden in der nächsten Ebene spezifische Schutzziele formuliert, die von Komponenten bzw. Betriebsabläufen im jeweiligen Anlagenbereich erfüllt werden. Diese spezifischen Schutzziele werden als Sicherheitsfunktionen bezeichnet. Siehe dazu Abb. 6.1.

Die Ebene unterhalb der Sicherheitsfunktionen beinhaltet die Komponenten(-Eigenschaften) bzw. Betriebsabläufe und Arbeitsschritte, die die Sicherheitsfunktionen erfüllen. In /UHL 16/

werden Eigenschaften, die Sicherheitsfunktionen erfüllen, als *sicherheitsbedingende Eigenschaften* bezeichnet. Im Projekt-VerSi (siehe /UHL 16/) werden diese Eigenschaften als *sicherheitsgerichtete Eigenschaften* bezeichnet. Im Folgenden werden diese als sicherheitsrelevante Eigenschaften von Komponenten (Si-Komponenten) bzw. als sicherheitsrelevante Betriebsabläufe (Si-Betriebsabläufe) bezeichnet.



**Abb. 6.1** Beispielhafte Darstellung der hierarchischen Herleitung von Sicherheitsfunktionen

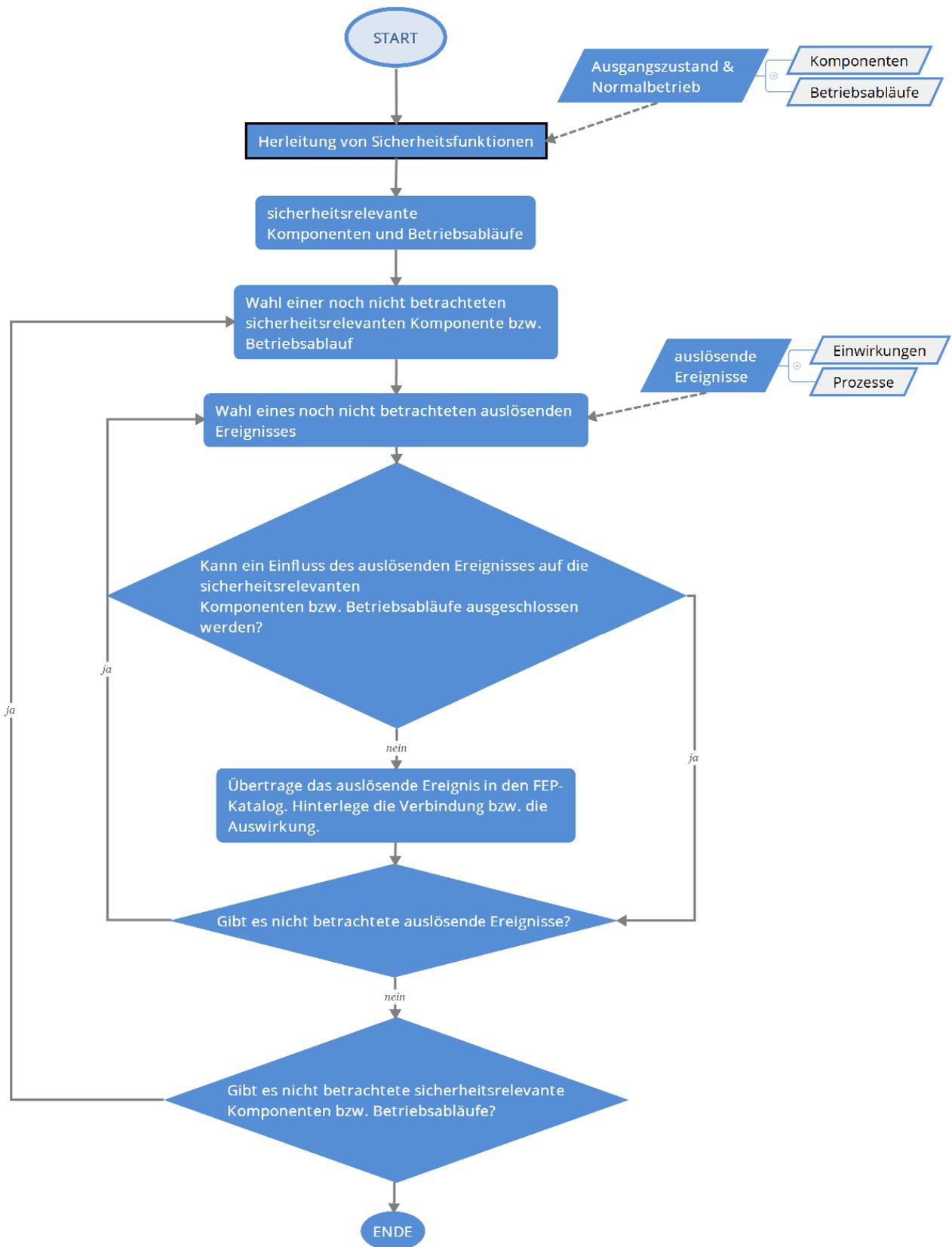
## 6.2 Analyse

Der Arbeitsschritt Analyse dient im Rahmen der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase der Beantwortung der Frage nach dem Einfluss von FEP auf die geologische Entwicklung oder auf die Mobilisierung von Radionukliden /BUH 10/. Analog dazu sollen sicherheitsrelevante auslösende Ereignisse im Rahmen der Analyse der Szenarientwicklung für die Betriebsphase identifiziert werden, indem geprüft wird, welche auslösenden Ereignisse einen Einfluss auf die Sicherheitsfunktionen bzw. auf die sicherheitsrelevanten Komponenten und Betriebsabläufe (Si-Komponenten und Si-Betriebsabläufe) haben könnten.

Damit lautet die Zielsetzung in der Analyse, die FEP-Verbindungen zu identifizieren. FEP-Verbindungen sind Abhängigkeiten und Auswirkungen (Wechselwirkungen) zwischen den FEP. Es werden nicht nur FEP-Verbindungen zwischen den einzelnen Kategorien (System-

komponenten, übergreifende Einwirkungen, Betriebsabläufe und Prozesse), sondern auch zwischen FEP innerhalb der Kategorien analysiert. Entscheidend sind letztendlich stets die (mittelbaren) Wechselwirkungen mit den Sicherheitsfunktionen bzw. Si-Komponenten und Si-Betriebsabläufen.

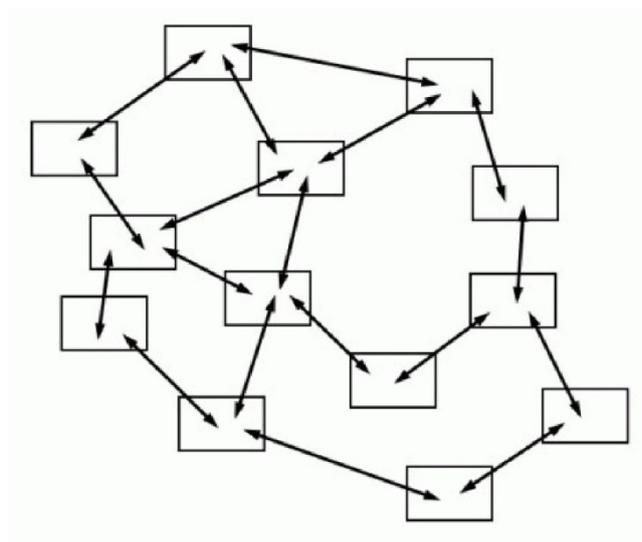
Das Hauptaugenmerk in der Analyse liegt auf der Untersuchung der Auswirkungen von auslösenden Ereignissen (übergreifenden Einwirkungen und Prozessen) auf die Sicherheitsfunktionen. Da die Sicherheitsfunktionen in der Betriebsphase von Komponenten(-Eigenschaften) und Betriebsabläufen übernommen werden (Si-Komponenten und Si-Betriebsabläufe), liegt der Fokus der Analyse auf der Identifikation von FEP-Verbindungen zwischen auslösenden Ereignissen (übergreifende Einwirkungen und Prozesse) und den Si-Komponenten bzw. Si-Betriebsabläufen. Diese Vorgehensweise ist in Abb. 6.2 in Form eines Ablaufplans dargestellt.



**Abb. 6.2** Ablaufplan der Vorgehensweise bei der Analyse der FEP und der Identifizierung der FEP-Verbindungen in der Szenarientwicklung für die Betriebsphase

Durch diese systematische und sukzessive Abarbeitung aller FEP und aller Sicherheitsfunktionen können die auslösenden Ereignisse identifiziert werden, welche die Sicherheitsfunktionen beeinträchtigen und somit zu Abweichungen vom Normalbetrieb führen könnten. Diese Ereignisse werden als sicherheitsrelevante auslösende Ereignisse bezeichnet.

Das Ergebnis der Analyse ist eine Art Netzwerk von FEP. Die Knotenpunkte des Netzes stellen die einzelnen FEP dar und die Linien zwischen den Knoten stellen die FEP-Verbindungen dar. Abb. 6.3 zeigt eine beispielhafte Abbildung für eine Netzwerkstruktur. Die Kästchen stellen FEP und die Pfeile FEP-Verbindungen dar.



**Abb. 6.3** Beispielhafte Darstellung einer Netzwerkstruktur /INT 09/

### **Darstellung der Ergebnisse**

Nach dem Vorbild der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase in Schweden kann für die Darstellung der FEP-Verbindungen und Abhängigkeiten ein FEP-Chart (vgl. Abb. 5.2) zum Einsatz kommen.

Für jedes Ereignis kann ein Fehlerbaum analog zur Vorgehensweise in der PSA für Kernkraftwerke aufgestellt werden. Die Pfade im Fehlerbaum ergeben sich durch die Vernetzung zwischen den einzelnen FEP im FEP-Katalog und werden nach Top-Down Verfahren ausgehend vom TOP-Ereignis aufgestellt. Jeder Pfad im Fehlerbaum, vom Basisereignis bis zum TOP-Ereignis (Bottom-Up), stellt dabei ein Szenario dar.

Als TOP-Ereignis wird der Ausfall einer betrachteten Sicherheitsfunktion bzw. einer Si-Komponente festgelegt. Anschließend werden die FEP-Verbindungen als einzelne Äste im

Fehlerbaum dargestellt. Auf der zweiten Ebene des Fehlerbaums sind dementsprechend jene FEP angesiedelt, welche eine unmittelbare FEP-Verbindung mit dem TOP-Ereignis-FEP aufweisen. Die Anzahl der Ebenen der einzelnen Äste im Fehlerbaum ist in Abhängigkeit der vorhandenen statistischen Daten zu wählen. Die letzte Ebene eines jeden Astes im Fehlerbaum wird als Basisereignis bezeichnet.

Basisereignisse dürfen untereinander keine funktionellen Abhängigkeiten besitzen. Außerdem ist die Ebene der Basisereignisse eine Komponentenebene, die durch Daten beschreibbar ist, die in statistisch gesicherter Form vorliegen /BFS 05/.



## **7 Beispielhafte Anwendung der Methodik**

In diesem Kapitel wird die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Methode zur Ableitung von Störfallszenarien beispielhaft angewendet. Es wird dazu zunächst in Kapitel 7.1 das herangezogene Beispiel beschrieben und abgegrenzt. Anschließend erfolgt die beispielhafte Anwendung der Methode in Kapitel 7.2.

Das in diesem Kapitel beschriebene Beispiel erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Das betrifft insbesondere die dargestellten Screening- und Auswahlprozesse in der Methodik. Dieses Kapitel soll der Veranschaulichung der entwickelten Methode einerseits und dem Nachweis der Umsetzbarkeit des Konzeptes andererseits dienen.

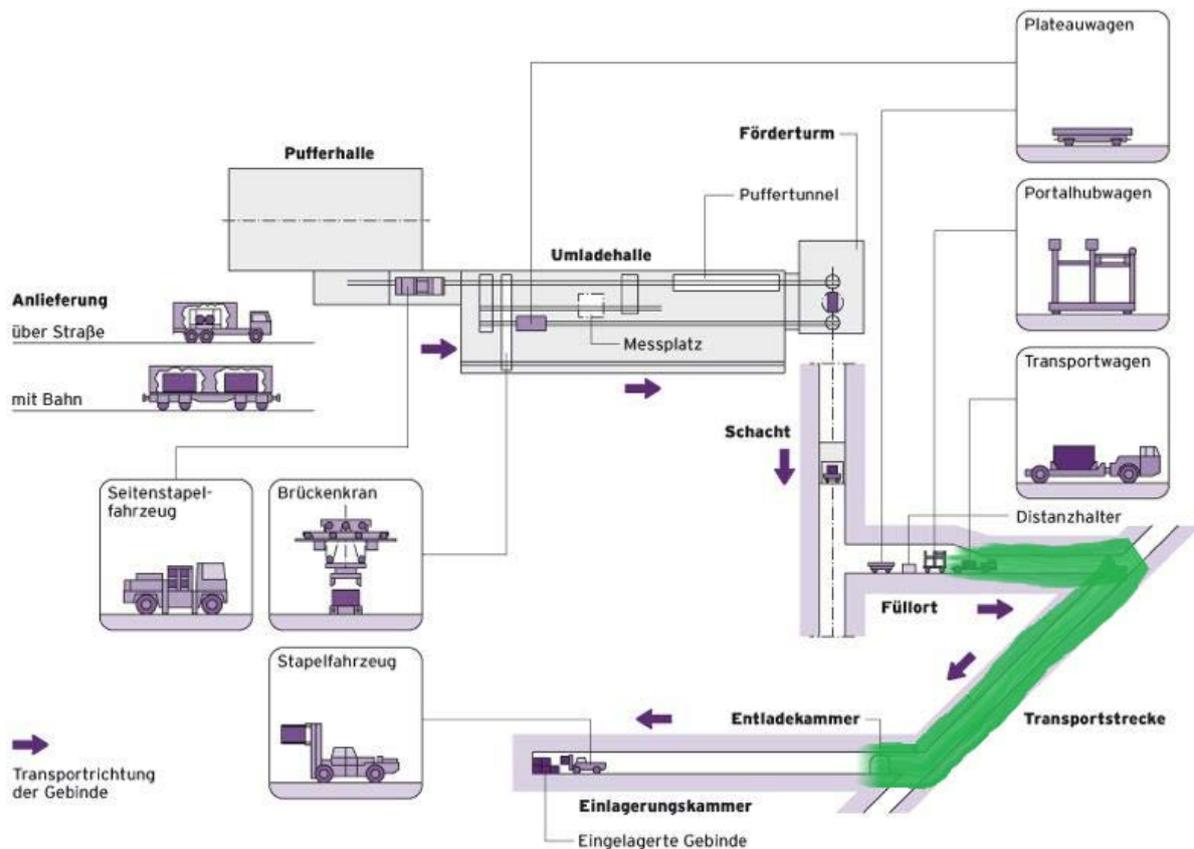
### **7.1 Beschreibung des betrachteten Beispiels**

Als Beispiel wird ein Teil des Endlagers Konrad herangezogen. Grund dafür ist, dass im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens diverse Planungen erstellt und Festlegungen getroffen wurden, welche bei der Bearbeitung des Vorhabens zur Verfügung standen. Eben dieser Umstand der vorliegenden Planungen bezüglich des Endlagerkonzeptes (u. a. /DBE 97/), die die Sicherheitsanalysen durchlaufen haben, macht das Endlager Konrad für die Nutzung als Beispiel an dieser Stelle attraktiv.

Als Beispiel soll der untertägige Gebindetransport im Endlager Konrad dienen. Dieser beginnt unter Tage am Füllort<sup>3</sup>, nachdem die Transporteinheit mit Hilfe eines Portalhubwagens auf den Transportwagen umgeladen wurde. Der Weg des Transportwagens führt über die sogenannten Transportstrecken bis zur Einlagerungsstrecke. Kurz hinter dem Eingang der Einlagerungsstrecke wird die Transporteinheit von einem Stapelfahrzeug übernommen und am finalen Einlagerungsort in der Einlagerungskammer platziert. Das betrachtete Beispiel berücksichtigt lediglich den Transport der Transporteinheit mit dem Transportwagen. D.h. die Umladeprozesse am Füllort und in der Einlagerungsstrecke werden in diesem Beispiel nicht betrachtet und dienen gleichzeitig als Abgrenzung des Beispiels. In Abb. 7.1 ist der gesamte Einlagerungsablauf dargestellt. Der grün markierte Teil ist jener, der für die beispielhafte Anwendung in diesem Kapitel herangezogen wird.

---

<sup>3</sup> Der Füllort ist der Umschlagplatz von Personen und Material von einer Sohle in den Schachtförderkorb.



**Abb. 7.1** Einlagerungsablauf des Endlagers Konrad mit Markierung des betrachteten Einlagerungsabschnitts; geändert nach /LAM 17/

## 7.2 Anwendung der Methode auf das Beispiel

### 7.2.1 Erstellung des FEP-Katalogs

In diesem Kapitel werden die relevanten FEP für den im Beispiel betrachteten Teil des Endlagers Konrad zusammengestellt. Dafür wird der Endlagerteil zunächst beschrieben und anschließend einem Screening unterzogen.

#### 7.2.1.1 Beschreibung des Endlagers und auslösende Ereignisse

Im Folgenden wird der betrachtete Endlagerteil mit Hilfe von Systemkomponenten (Features) und Betriebsabläufen (Operations) beschrieben. Begonnen wird mit der Beschreibung des Einlagerungsablaufes. Es folgen Beschreibungen von einzelnen Komponenten, wobei Systemkomponenten durch **blaue** und Betriebsabläufe durch **grüne** Schrift gekennzeichnet werden. Im Anhang sind in Tab. A.2 Systemkomponenten und in Tab. A.3 Betriebsabläufe jeweils hierarchisch aufgelistet. Die Beschreibung des Endlagers stellt die Grundlage für den

FEP-Katalog dar. Außerdem erfolgt eine Abbildung der Abhängigkeiten zwischen Systemkomponenten und Betriebsabläufen in den Abhängigkeitsmatrizen in Tab. A.8 und Tab. A.9 im Anhang.

Die Beschreibung des Einlagerungsablaufes für das Endlager Konrad wurde aus der EU 208 /DBE 97/ und dem TÜV-Gutachten /TÜV 97/ entnommen.

In der folgenden Beschreibung wird der Begriff Transporteinheit verwendet. Eine Transporteinheit kann entweder ein Abfallgebinde, ein Abfallgebinde in Kombination mit einer Tauschpalette oder ein Abfallgebinde in Kombination mit einer Transportpalette sein.

### **Beschreibung eines Teils des Einlagerungsablaufs**

Die Ablaufbeschreibung beginnt mit dem **Transportwagen** (Transportfahrzeug), welches im **Füllort** rückwärts am **Distanzhalter** mit einer **Transporteinheit** auf der **Ladefläche** steht. Nachdem die **Transporteinheit** auf dem **Transportwagen** auf der **Ladefläche** **abgesetzt** wurde, wird die **Transporteinheit** auf der **Ladefläche** durch eine einstellbare **Verriegelungsvorrichtung** des **Transportwagens** **zentriert und gesichert**. Anschließend **fährt** der **Transportwagen** aus dem **Füllort** **heraus** in die **Transportstrecke**. Dabei erfolgt eine **Überwachung** der Fahrt vom **örtlichen Leitstand** aus, der im **Füllort** installiert ist. Die **Transportstrecke** führt direkt vom **Füllort** zur **Einlagerungsstrecke**. Der **Transportwagen** **fährt** bis zur **Einlagerungsstrecke** und **biegt** in diese **ein**. Anschließend **bleibt** der **Transportwagen** kurz hinter der **Einfahrt** zur **Einlagerungsstrecke**, vor der **Entladekammer** **stehen**. Die **Entladekammer** ist eine kurz hinter der **Einfahrt** zur **Einlagerungsstrecke** im rechten Winkel zur Längsachse der **Einlagerungsstrecke** angeordnete, Kammer, in der das **Stapelfahrzeug** rückwärtsfahrend hält und auf den **Transportwagen** wartet. Sobald der **Transportwagen** vor der **Entladekammer** **zum Stehen** **gekommen** ist, wird die **Verriegelungsvorrichtung** auf der **Ladefläche** des **Transportwagens** **gelöst**. An dieser Stelle endet das betrachtete Beispiel.

### **Transportwagen**

Der **Transportwagen** ist ein gleisloses Knickgelenkfahrzeug, welches allradangetrieben ist und aus einem **Motor**- sowie einem **Lastteil** besteht. Beide Teile besitzen jeweils eine **Starrachse** mit **einfach bereiften Rädern** und sind durch ein **Drehknickgelenk** verbunden. Angetrieben wird der **Transportwagen** von einem **Diesel**- oder einem **Elektromotor**. Der **Motor**-teil ist neben dem **Antriebsaggregat** des **hydrodynamischen Fahrtriebs** mit den **Nebenaggregaten** des **Lenk**- und **Bremssystems**, der **Kraftstoffanlage**, dem **Kraftstoffbehälter**, dem

Hydrauliköl, dem Ölkühler, der elektrischen Anlage und der Fahrerkabine mit den Bedien- und Kontrollelementen bestückt.

Der Lastteil des Transportwagens ist als Ladefläche ausgelegt und enthält eine Verriegelungsvorrichtung zur Zentrierung und Fixierung der Transporteinheit auf der Ladefläche. Die Verriegelungsvorrichtung besteht aus klappbaren Aufsetzapfen, die in die Eckbeschläge der Transporteinheit eingreifen und diese damit formschlüssig sichern

Die Ausstattung des Transportwagens umfasst eine bordfeste HRD-Löschanlage mit ausreichend Löschmittel für zwei Löschangriffe, eine Notlenkung für zwei vollständige Lenkeinschläge bei Ausfall der Antriebsmaschine und Abschleppösen.

### **Verkehrslenkung**

Die Verkehrslenkung bezieht sich auf die Transportstrecken unter Tage. Da diese während des regulären Einlagerungsbetriebes von mindestens zwei Transportwagen befahren werden kann, wird die Verkehrslenkung benötigt um eine sichere Vorbeifahrt zweier Transportwagen zu gewährleisten. Die Verkehrslenkung besteht aus mehreren Ausweichstellen auf der Transportstrecke. Der Verkehrsfluss auf der Transportstrecke wird abwechselnd in Einbahnrichtung geleitet. Die Regelung dieses wechselnden Verkehrsflusses erfolgt durch das Verkehrslenkungssystem. Das Verkehrslenkungssystem besteht aus einem Lichtzeichen-gesteuerten Blocksystem. Dazu werden an Kreuzungen, Einmündungen und Ausweichstellen der Transportstrecke vom Füllort bis zur Einlagerungskammer detektor- und funktionsüberwachte Lichtsignalanlagen installiert. Deren Funktion und Betriebsbereitschaft wird ständig während des Einlagerungsbetriebes vom Leitstand im Füllort überwacht.

### **Stapelfahrzeug**

Das Stapelfahrzeug ist allradangetrieben. Ein Knickgelenk verbindet den Vorder- und den Motorteil des Stapelfahrzeugs. Der Motorteil besitzt eine Pendelachse mit einfach bereiften Rädern. Im Gegensatz dazu ist der Vorderteil mit einer Starrachse und zwillingsbereiften Rädern ausgestattet. Im Motorteil ist der Diesel- bzw. Elektromotor mit angeflanschem Drehmomentwandler und das Lastschaltgetriebe untergebracht. Der Vorderwagen umfasst ein Hubgerüst mit einer Lastaufnahmeeinrichtung, das Gegengewicht, den Kraftstofftank, die Hydraulikanlage, den Hydraulikölbehälter, den Ölkühler, die elektrische Anlage und die Fahrerkabine mit den Bedien- und Kontrollelementen

## Übergreifende Einwirkungen

Im nächsten Schritt werden übergreifende Einwirkungen im Rahmen der Aufstellung von auslösenden Ereignissen zusammengetragen, die in den FEP-Katalog aufgenommen werden müssen und damit in der Szenarientwicklung betrachtet werden. Als Datengrundlage für eine Zusammenstellung übergreifender Einwirkungen wird in diesem Beispiel eine Liste aus /IAEA 10/ genutzt, die interne und externe Einwirkungen („List of internal and external hazards“) für Kernkraftwerke enthält. Im Anhang sind in Tab. A.4 die internen und externen Einwirkungen aufgelistet. Die Ergebnisse eines Screenings dieser Liste, in dem entschieden wurde welche Einwirkungen für das hier betrachtete Beispiel berücksichtigt werden, sind in Spalte drei der Tab. A.4 im Anhang zu finden.

## Weitere Prozesse

Alle Erscheinungen, die nicht in die zuvor genannten Kategorien (Systemkomponenten, Betriebsabläufe und übergreifende Einwirkungen) passen und die als auslösende Ereignisse fungieren können, werden in der Kategorie „weitere Prozesse“ zusammengefasst. Als Datengrundlage wurde die NEA-FEP-Liste /NEA 06/ genutzt. In einem Screening der NEA-FEP-Liste fiel auf, dass ein Großteil der FEP grundsätzlich auch für die Betriebsphase anwendbar ist. Grund dafür ist der allgemeine Charakter der FEP des NEA-FEP-Katalogs. So ist es oftmals der Fall, dass die NEA-FEP nur als eine Art FEP-Kategorien betrachtet werden, die durch mehrere FEP in der spezifischen Anwendung substituiert werden. Beispielsweise enthält der NEA-FEP-Katalog das FEP „Inventar, Radionuklide und anderes Material“ (Nummer des FEP: 2.1.01). Im VSG-FEP-Katalog wurden daraus folgende vier einzelne FEP abgeleitet:

- „Inventar: Radionuklide“ (FEP-Nr.: 2.1.01.01),
- „Inventar: Metalle“ (FEP-Nr.: 2.1.01.02),
- „Inventar: Organika“ (FEP-Nr.: 2.1.01.03) und
- „Inventar: Sonstige Stoffe“ (FEP-Nr.: 2.1.01.04).

Eine Übersicht der FEP bzw. der FEP-Kategorien aus der NEA-FEP-Liste, die grundsätzlich für die Betriebsphase in Betracht gezogen werden könnten sind im Anhang in Tab. A.5 zu finden. In einem weiteren Screening wurden daraus die FEP identifiziert, die auf das hier betrachtete Beispiel angewendet werden sollen. Das Ergebnis dieses Screenings ist ebenfalls in Tab. A.5 im Anhang in der dritten Spalte zu finden.

### **7.2.1.2 Screening**

Beim Screening soll der FEP-Katalog durch Informationen anderer FEP-Kataloge ergänzt werden. Idealerweise werden FEP-Kataloge für die Betriebsphase als Datengrundlage für das Screening herangezogen. Bisher existiert erst eine einzige FEP-Liste für die Betriebsphase, die im Rahmen des BASEL-Projektes von der GRS erarbeitet wurde. Da das BASEL-Projekt /WOL 18a/, /WOL 18b/ bisher noch nicht beendet ist und die Ergebnisse daher noch nicht veröffentlicht sind, ist diese FEP-Liste für die Betriebsphase noch nicht verwendbar. Alternativ kann eine möglichst umfangreiche FEP-Liste für die Nachverschlussphase von Endlagern als Datengrundlage für ein Screening herangezogen werden. Da die NEA-FEP-Liste bereits in Kapitel 7.2.1.1 als Datengrundlage für ein Screening genutzt wurde und die BASEL-FEP-Liste noch nicht zur Verfügung steht, wird an dieser Stelle die VSG-FEP-Liste /WOL 12/ zum Screening herangezogen. Als Ergebnis des Screenings ist im Anhang eine Übersicht der FEP aus dem VSG-FEP-Katalog, die grundsätzlich für die Betriebsphase in Betracht gezogen werden könnten, dargestellt (Tab. A.6). Außerdem sind in der Tabelle in der dritten Spalte die FEP gekennzeichnet, welche im hier betrachteten Beispiel berücksichtigt werden.

### **7.2.2 Herleitung von Sicherheitsfunktionen (Top-Down Ansatz)**

Zur Herleitung der Sicherheitsfunktionen wird mit den grundsätzlichen Schutzziele aus den relevanten Regelwerken begonnen. Für Endlager mit radioaktiven Abfällen in Deutschland gibt es bisher lediglich Anforderungen für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle /BMU 10/. Diese enthalten die grundsätzlichen Schutzziele für Endlager mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen. Das hier betrachtete Beispiel bezieht sich auf ein Teil des Endlagers Konrad, welches lediglich für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung planfestgestellt wurde. Für Endlager mit radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung gibt es in Deutschland bisher keine spezifischen regulatorischen Anforderungen. Darum müssen als grundsätzliche Schutzziele an dieser Stelle das Atomgesetz /ATG 17/ und die Strahlenschutzverordnung /SSV 17/ herangezogen werden.

Die grundsätzlichen Schutzziele sind zunächst der § 1 AtG /ATG 17/, der den Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgütern vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen fordert. Hierarchisch darunter sind weitere grundsätzliche Schutzziele in den §§ 5 und 6 StrlSchV /SSV 17/ zu finden – das Vermeidungs- und Minimierungsgebot von Strahlenexpositionen. Alle weiteren Sicherheitsfunktionen, die hierarchisch unter den grundsätzlichen Schutzziele liegen, sind Anforderungen spezifisch für Endlager

(endlagerspezifische Anforderungen). Dazu zählen Sicherheitsfunktionen in Bezug auf einzelne Komponenten des Endlagersystems wie bspw. „Gewährleistung der Behälterintegrität“. Das Ergebnis der beispielhaften Herleitung von Sicherheitsfunktionen für das hier betrachtete Beispiel ist in Tab. A.7 im Anhang aufgelistet.

### **7.2.3 Analyse**

In der Analyse werden die FEP-Verbindungen identifiziert. Zunächst wurden dazu die FEP-Verbindungen zwischen übergreifenden Einwirkungen und Sicherheitsfunktionen detektiert. Dies erfolgt mit Hilfe einer Abhängigkeitsmatrix (siehe Tab. A.8 im Anhang). Eine weitere Abhängigkeitsmatrix (Tab. A.9 im Anhang) wurde für die Darstellung der identifizierten FEP-Verbindungen zwischen VSG-FEP und den Sicherheitsfunktionen genutzt.

Weitere FEP-Verbindungen wie die zwischen den NEA-FEP und den Sicherheitsfunktionen, zwischen den Sicherheitsfunktionen untereinander, zwischen den übergreifenden Einwirkungen untereinander und zwischen den jeweiligen FEP untereinander sind in gleicher Weise mit Hilfe von Abhängigkeitsmatrizen zu identifizieren. Um die Übersichtlichkeit zu wahren und weil diese beispielhafte Anwendung keine vollumfängliche Störfallanalyse darstellt, wird an dieser Stelle darauf verzichtet.

Die unmittelbaren FEP-Verbindungen sind auch in den Datenblättern zu vermerken, die für jedes FEP im FEP-Katalog zu erstellen sind. Beispielhaft wurde ein Datenblatt für das FEP „Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen“ in /UHL 16/ erstellt.

Die Darstellung der identifizierten FEP-Verbindungen der beispielhaften Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ als Fehlerbaum ist in Abb. A.1 und Abb. A.2 im Anhang zu sehen.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase gibt es eine Methode, um möglichst umfangreiche Szenarienspektren zu erstellen. Auch wenn eine Vollständigkeit der Spektren nicht nachweisbar ist, wird sie im Rahmen der Szenarientwicklung durch die systematische Vorgehensweise zumindest angestrebt.

Um vorteilhafte Methoden der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase auf die Betriebsphase zu übertragen, wurden zunächst Unterschiede zwischen den Szenarientwicklungsmethoden der betrachteten Länder untersucht und hinsichtlich Vor- und Nachteilen analysiert. Die dabei identifizierten Elemente, die sich als vorteilhaft erwiesen, wurden in die entwickelte Methodik übernommen. Die Methode der Szenarientwicklung wurde der Methode der Störfallanalyse gegenübergestellt, um die Vorteile der Szenarientwicklung zu verdeutlichen. Basierend darauf erfolgte eine formale Beschreibung der Szenarientwicklungsmethodik für die Betriebsphase von Endlagern. Letztendlich wurde die Methode beispielhaft an einem abgegrenzten Beispiel angewendet.

Bei der Ableitung von Sicherheitsfunktionen im Rahmen der beispielhaften Anwendung der Methode fiel auf, dass für Endlager mit nicht wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Deutschland keine spezifischen Sicherheitsanforderungen vorhanden sind. Daher waren die Schutzziele aus dem Atomgesetz /ATG 17/, bzw. aus der Strahlenschutzverordnung /SSV 17/ abzuleiten. Spezifische Sicherheitsanforderungen, wie es sie für Endlager mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in Deutschland gibt /BMU 10/, wären auch für Endlager mit nicht wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen wünschenswert, damit die Sicherheitsnachweise für Endlager mit nicht wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen auf spezifischeren Vorgaben beruhen.

Im Rahmen der beispielhaften Anwendung hat es sich als praktikabel erwiesen, bei der Ableitung von Sicherheitsfunktionen auch aufzuführen, wie die Sicherheitsfunktionen durch Si-Komponenten und deren Eigenschaften bzw. Si-Betriebsabläufe erfüllt werden. Da das Basisereignis in einem Fehlerbaum sich auf einer Komponentenebene befindet, wird dadurch die Aufstellung des Fehlerbaums wesentlich erleichtert.

Des Weiteren wurde bei der beispielhaften Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Methode deutlich, dass bei der Identifizierung der FEP-Verbindungen konsequent nur die direkten Verbindungen in den Abhängigkeitsmatrizen berücksichtigt werden sollten. Falls dies nicht konsequent erfolgt, kann es beim Erstellen des Fehlerbaums zu Problemen kommen.

So erfolgte bspw. bei der ersten Aufstellung der FEP-Verbindungen zwischen Sicherheitsfunktionen und übergreifenden Einwirkungen ein Eintrag für die Verbindung/Abhängigkeit zwischen der Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ und der übergreifenden Einwirkung „Internes Feuer aus anderen Bereichen auf dem Gelände“. Bei der Notierung dieser Verbindung in der Abhängigkeitsmatrix wurde von einer „Löschung des Feuers“ und einem anschließenden „Übergang von Löschwasser aus dem vom Feuer betroffenen Bereich in den Bereich, in dem Abfallgebände eingelagert sind“ ausgegangen. Beides stellen jedoch für sich separate FEP dar und sind einzeln zu betrachten. Die Kombination dieser einzelnen FEP führt zu folgendem (Teil-)Szenario:

„Internes Feuer aus anderen Bereichen auf dem Gelände“. → „Löschvorgang des Feuers“ → „Übergang von Löschwasser aus dem vom Feuer betroffenen Bereich in den Bereich, in dem Abfallgebände eingelagert sind“ → „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“.

D. h. über diese Verkettung von FEP (Szenario) beeinträchtigt ein „Internes Feuer aus anderen Bereichen auf dem Gelände“ die Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“. Eine direkte Abhängigkeit (FEP-Verbindung) existiert jedoch nicht.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass selbst für das in dieser Arbeit im Rahmen der beispielhaften Anwendung betrachtete eingeschränkte Beispiel der Aufwand der Methode sehr hoch war. Das liegt insbesondere an den unterschiedlichen FEP, die im Allgemeinen und in Bezug auf das jeweilige Endlagerkonzept und den Endlagerstandort vollständig zu verstehen sind, um die Abhängigkeitsmatrizen ausfüllen zu können. Es empfiehlt sich daher bei der Festlegung der FEP-Verbindungen interdisziplinäre Diskussionen durchzuführen, um möglichst einen umfassenden Eindruck über die jeweiligen FEP und ihre Abhängigkeiten zu erhalten. Da im Rahmen dieser beispielhaften Anwendung eine solche Diskussion nicht stattfand, kann diese beispielhafte Anwendung nicht als vollumfänglich angesehen werden. Die Vollständigkeit eines FEP-Katalogs kann nicht nachgewiesen werden.

Ferner entsteht durch die vielen FEP und deren Abhängigkeiten untereinander eine große Menge an Daten, die nur schwer zu überblicken sind. Daher wird empfohlen, bei der Anwendung der Methode die generierten Daten in einer Datenbank abzulegen. Durch ein Datenbankmanagementsystem kann eine schrittweise Verarbeitung der einzelnen FEP in den Abhängigkeitsmatrizen und die Pflege und Erweiterung der Datenblätter jedes FEP erleichtert werden. Ebenso ist eine zügige individuelle Darstellung der Daten möglich.

Bei genauer Betrachtung der FEP aus der Nachverschlussphase im Rahmen der beispielhaften Anwendung fiel auf, dass eine Vielzahl von FEP der Beschreibung von Erscheinungen bezüglich des Transports von Radionukliden dienen. Der Transport von Radionukliden ist damit eindeutig in der Szenarientwicklung für die Nachverschlussphase enthalten. In der Betriebsphase ist die Sicherheitsanalyse in mehrere Teile gegliedert: die Störfallanalyse, die Ermittlung des Quellterms und die Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse. Die Quelltermmittlung und die Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse sind vergleichbar mit dem Transport in der Nachverschlussphase. In dieser Arbeit wurde die Szenarientwicklung und damit auch die FEP-Liste auf die Störfallanalyse übertragen und angewendet. D. h. die Ermittlung des Quellterms bzw. die Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Es spricht bisher jedoch nichts gegen eine Anwendung der Szenarientwicklung auf die Ermittlung des Quellterms bzw. auf die Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse. Inwieweit die Methodik der Szenarientwicklung auf die Ermittlung des Quellterms und auf die Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse übertragen werden kann und ob Störfallanalyse, Quelltermmittlung und Ausbereitungs- und Konsequenzenanalyse in einer Methode zusammengefasst oder weiterhin einzeln durchgeführt werden, stellt eine mögliche Aufgabenstellung für zukünftige Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten dar.



## Literaturverzeichnis

- /AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): 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.
- /ATG 17/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I 1985, Nr. 41, S. 1565-1583), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, S. 2808).
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzhelm, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung, Methodik und Anwendung, Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-284, 239 S., ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BFS 83/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Leitlinien zur Beurteilung der Auslegung von Kernkraftwerken mit Druckwasserreaktoren gegen Störfälle im Sinne des § 28 Abs. 3 der Strahlenschutzverordnung - Störfall-Leitlinien. Handbuch Reaktorsicherheit und Strahlenschutz (RS-Handbuch), RS-Handbuch 3-33.1, 7 S., 18. Oktober 1983.
- /BFS 96/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Systemanalyse Konrad, Teil 3. Ermittlung und Klassifizierung von Störfällen. EU 228, 135 S., 15. Januar 1996.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke, Facharbeitskreis: Probabilistische Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke. 321 S., ISBN 3-86509-414-7, Wirtschaftsverlag NW / Verlag für neue Wissenschaft GmbH: Salzgitter, 2005.
- /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.

- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /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.
- /BVG 09/ Bundesverfassungsgericht: BVerfG, Beschluss der 3. Kammer des Ersten Senats vom 10. November 2009 - 1 BvR 1178/07 - Rn. (1 - 77),. 22 S., 10. November 2009.
- /DBE 97/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Systembeschreibung Einlagerungssystem. Hrsg.: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), EU 208, 244 S., 1997.
- /DEA 15/ [www.deacademic.com](http://deacademic.com): Szenarioplanung. Stand vom 30. April 2015, erreichbar unter <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1354496>, abgerufen am 19. April 2018.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /GEO 11/ GEOSAF Working Group on Operational Safety: GEOSAF Position paper on operational safety, Main outcomes. International Atomic Energy Agency (IAEA), 3 S.: Vienna, 2011.

- /GRS 91/ Beise, E., Biesold, H., Gründler, D., Handge, P., Lange, F., Larue, P.-J., Mielke, H.-G., Müller, W., Peiffer, F., Pfeffer, W., Wurtinger, W., Jaritz, W., Meister, D., Schnier, H.: Sicherheitsanalyse des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Eine Studie der Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), GRS-79, ISBN 3-923875-29-0: Köln, 1991.
- /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. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-383, ISBN 978-3-944161-64-8: Köln, 2015.
- /IAEA 10/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants. IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide No. SSG-3, 192 S., ISBN 978-92-0-114509-3: Vienna, 2010.
- /IAEA 12/ International Atomic Energy Agency (IAEA): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series, Specific Safety Guide SSG-23, ISBN 978-92-0-128310-8: Vienna, 2012.
- /IAEA 13/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Managing integration of postclosure safety and pre-closure activities in the Safety Case for Geological Disposal, DRAFT. 35 S.: Vienna, 2013.
- /IAEA 17/ International Atomic Energy Agency (IAEA): GEOSAF Project, International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal. Stand vom 30. August 2017, erreichbar unter <http://www-ns.iaea.org/projects/geosaf/>, abgerufen am 7. März 2018.
- /ILK 08/ Internationale Länderkommission Kerntechnik (ILK): Grundlegende Sicherheitsanforderungen für Kernkraftwerke, Beilage zu ILK-31. ISaR GmbH, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 62 S., September 2008.

- /INT 09/ Internetdokument: Navigationsstrukturen. erreichbar unter <https://107soldiers.wordpress.com/>, Stand von 2009.
- /JOH 02/ Johnson, 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). Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wettingen, 1. Dezember 2002.
- /LAM 17/ Lampe, C., Info Konrad: Re\_ Anfrage Bildmaterial Einlagerungsablauf Endlager Konrad. An Uhlmann, S., E-Mail, PDF, 1 S.: Köln, 14. September 2017.
- /LIE 09/ Liemersdorf, H.: Entwicklung der Sicherheitskonzepte für Auslegung und Betrieb von Kernkraftwerken, Vortrag im Rahmen des 2. Workshop zu Fragen von Risiko und Sicherheit im Verkehr im Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung. Präsentation, Dezember 2009.
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Bebiolka, A., Jahn, S., Jobmann, M., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Rheinhold, K., Rübél, A., Stark, L.: Szenarienentwicklung für das Endlagerstandortmodell NORD, Methodik und Anwendung, Projekt ANSICHT. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Technischer Bericht, TEC-17-2014-AP, 92 S.: Peine, 30. Juni 2015.
- /MAR 08/ Marić, D., Müller, W.: Storfalldanalyse für die Schließung der Schachanlage Asse II. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, ISTEC-A-1237, 70 S.: Köln, Mai 2008.
- /NEA 06/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): NEA International FEP Database, User Notes. Version Version 2.1, PC and MAC, 2006.
- /NEA 12/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): 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.

- /NMU 02/ Niedersächsisches Umweltministerium (NMU): Planfeststellungsbeschluss für die Errichtung und den Betrieb des Bergwerkes Konrad in Salzgitter, Anlage zur Endlagerung fester oder verfestigter radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Az.: 41-40326/3/10, 851 S.: Hannover, 22. Mai 2002.
- /PEI 09/ Peiffer, F.: Überprüfung von Risikokonzepten zur Bewertung der Sicherheit in der Betriebsphase eines Endlagers, Abschlussbericht zum Vorhaben SR 2572. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 86 S., Februar 2009.
- /SKB 06/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxmar - a first evaluation, Main report of the SR-Can project. SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S.: Stockholm, Schweden, 2006.
- /SMI 09/ 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. Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials (ONDRAF/NIRAS), NIROND-TR 2009-14 E, 80 S., 2009.
- /SSV 16/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38, S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 5 der Verordnung vom 27. April 2016 (BGBl. I 2016, Nr. 20, S. 980).
- /SSV 17/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38, S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert 27. Januar 2017 (BGBl. I 2017, S. 114, 1222).
- /TÜV 97/ TÜV Hannover / Sachsen-Anhalt e. V.: Endlager für radioaktive Abfälle Schachtanlage Konrad, Gutachten im Planfeststellungsverfahren. GK-SBA 07/97: (unveröffentlicht), 1997.

- /UHL 16/ Uhlmann, S.: Vorgehensweisen bei der Szenarienentwicklung in der Nachverschlussphase 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 Langzeitsicherheitsnachweise. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-424, ISBN 978-3-946607-06-9: Köln, 2016.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., et al.: FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 864 S., 2012.
- /WOL 18a/ Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U., Prignitz, S.: Operational Safety and Post-Closure Safety: Investigation of their Interactions by a FEP Analysis, Vortrag auf der WM 2018 Phoenix, Arizona, USA. Präsentation, 2018.
- /WOL 18b/ Wolf, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Fahrenholz, C., Filbert, W., Lommerzheim, A., Noseck, U., Prignitz, S.: Operational Safety and Post-Closure Safety: Investigation of their Interactions by a FEP Analysis – 18040. WM2018 Conference, March 18 - 22, 2018, Phoenix, Arizona, USA, 2018.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Beziehungen zwischen den Begriffen Safety Envelope, Design Target und As-Built State /IAEA 13/ .....	3
Abb. 4.1	Gegenüberstellung der grundlegenden Schritte der Sicherheitsanalysen für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase .....	11
Abb. 4.2	Darstellung von Entwicklungen und Entwicklungsmöglichkeiten in einem Szenarientrichter /DEA 15/ .....	14
Abb. 5.1	Beispiel für eine hierarchische Herleitung von Sicherheitsfunktionen /SMI 09/ .....	25
Abb. 5.2	FEP-Chart eines schwedischen Endlagerprojektes.....	27
Abb. 5.3	Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten von Szenarien in der VSG /BEU 12/ .....	28
Abb. 5.4	Gestaffeltes Sicherheitskonzept für Kernkraftwerke /LIE 09/.....	35
Abb. 5.5	Hierarchische Darstellungsform von Komponenten und Betriebsabläufen.....	39
Abb. 5.6	Darstellung der Kategorisierungen im Projekt ANSICHT /LOM 15/ und ihr Zusammenhang .....	40
Abb. 5.7	Darstellung der Kategorisierungen für FEP in der Betriebsphase und ihr Zusammenhang .....	41
Abb. 6.1	Beispielhafte Darstellung der hierarchischen Herleitung von Sicherheitsfunktionen.....	47
Abb. 6.2	Ablaufplan der Vorgehensweise bei der Analyse der FEP und der Identifizierung der FEP-Verbindungen in der Szenarientwicklung für die Betriebsphase .....	49
Abb. 6.3	Beispielhafte Darstellung einer Netzwerkstruktur /INT 09/ .....	50
Abb. 7.1	Einlagerungsablauf des Endlagers Konrad mit Markierung des betrachteten Einlagerungsabschnitts; geändert nach /LAM 17/ .....	54
Abb. A.1	Erster Teil des Fehlerbaums für die Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ für das betrachtete Beispiel aus Kapitel 7 .....	103
Abb. A.2	Zweiter Teil des Fehlerbaums für die Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ für das betrachtete Beispiel aus Kapitel 7 .....	104



## **Tabellenverzeichnis**

Tab. 1	Gegenüberstellung der Szenarienentwicklung für die Nachverschlussphase und der Ereignisanalyse für die Betriebsphase .....	10
--------	--	----



## Abkürzungsverzeichnis

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
AtG	Atomgesetz
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
ESK	Entsorgungskommission
EVA	Einwirkungen von außen
EVI	Einwirkungen von innen
FEP	Features, Events and Processes
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
IAEA	International Atomic Energy Agency
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
NEA	Nuclear Energy Agency
PSA	Probabilistic safety analysis
Si-Betriebsabläufe	Sicherheitsrelevante Betriebsabläufe
Si-Komponenten	Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Komponenten
THMC	thermisch, hydraulisch, mechanisch und chemisch
THMCR	thermisch, hydraulisch, mechanisch, chemisch und radiolo- gisch



## A Anhang

**Tab. A.1** Gegenüberstellung der Einzelschritte der Szenarienentwicklungsmethoden

Grün unterlegte Abschnitte werden als vorteilhaft angesehen.

<b>Beschreibung des Ausgangszustandes und der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems</b>
<p><b>VSG, ANSICHT</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Aufstellung FEP-Datenbasis (inkl. standortspezifischer Gegebenheiten, konzeptspezifischer Aspekte, des aktuellen Anlagenzustandes, historische Entwicklungen des Standortes und regulatorischer Vorgaben)</li><li>• FEP-Screening: Ausschluss von nicht relevanten FEP anhand von Ausschlusskriterien</li><li>• Standortspezifische FEP-Datenbank</li></ul> <p><b>Frankreich</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Beschreibung thermischer, mechanischer, hydraulischer, chemischer und radiologischer Prozesse (THMCR) und gekoppelte Komponenten</li><li>• Vollständigkeit der THMCR-Prozesse erfolgt durch Abgleich mit der NEA-FEP-Datenbank</li></ul> <p><b>Belgien</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Beschreibung der erwarteten Entwicklungen des EBS („Engineered Barrier System“) mit zugehörigen THMC-Prozessen</li><li>• Vollständigkeit der THMC-Prozesse erfolgt durch Abgleich mit der NEA-FEP-Datenbank</li></ul> <p><b>Schweden</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Aufstellung FEP-Datenbasis</li><li>• Ergänzung per NEA-FEP-Datenbank</li><li>• Standortspezifische FEP-Datenbank</li></ul> <p><b>Schweiz</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Beschreibung des Endlagersystems und der Endlagerkonzepte</li><li>• Beschreibung der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems inkl. Randbedingungen wie z. B. Klima</li><li>• Vollständigkeit der FEP-Liste durch Abgleich mit NEA-FEP-Datenbank</li></ul>
<b>Identifizierung von Ungewissheiten</b>
<p><b>VSG, ANSICHT</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Erkennbar bei: Standortbeschreibung (Parameterbestimmung) und Entwicklungsbeschreibung (Prozess- und Ereignisbeschreibungen)</li><li>• Ableitung aus Genauigkeit verfügbarer Daten (Messgenauigkeiten bzw. Annahmen bei unzureichender Datenlage)</li></ul> <p><b>Frankreich</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Erkennbar bei: Standortbeschreibung (Parameterbestimmung) und Entwicklungsbeschreibung (Prozess- und Ereignisbeschreibungen)</li><li>• Ableitung aus Genauigkeit verfügbarer Daten (Messgenauigkeiten bzw. Annahmen bei unzu-</li></ul>

reichender Datenlage)

#### **Belgien**

- Erkennbar bei: Standortbeschreibung (Parameterbestimmung) und Entwicklungsbeschreibung (Prozess- und Ereignisbeschreibungen)
- Ableitung aus Genauigkeit verfügbarer Daten (Messgenauigkeiten bzw. Annahmen bei unzureichender Datenlage)
- Ungewissheiten werden weiter auf Sicherheitsrelevanz analysiert

#### **Schweden**

- Erkennbar bei: Standortbeschreibung (Parameterbestimmung) und Entwicklungsbeschreibung (Prozess- und Ereignisbeschreibungen)
- Ableitung aus Genauigkeit verfügbarer Daten (Messgenauigkeiten bzw. Annahmen bei unzureichender Datenlage)

#### **Schweiz**

- Erkennbar bei: Standortbeschreibung (Parameterbestimmung) und Entwicklungsbeschreibung (Prozess- und Ereignisbeschreibungen)
- Ableitung aus Genauigkeit verfügbarer Daten (Messgenauigkeiten bzw. Annahmen bei unzureichender Datenlage)

### **Einteilung**

#### **VSG, ANSICHT**

- Einteilung des Endlagersystems in Barrieren und Komponenten (räumliche Diskretisierung)
- Relevanz-/Wirkzeitraum von Prozessen (Zeitliche Diskretisierung)

#### **Frankreich**

- Einteilung der Entwicklung des Endlagersystems in „Situationen“ (Situationen: zeitliche und räumliche Diskretisierung von Prozessen)

#### **Belgien**

- Einteilung der Beschreibung der erwarteten Entwicklungen des EBS („Engineered Barrier System“) in zeitliche Abschnitte (storyboards)
- Jedes storyboard umfasst einen gewissen Zeitraum und stellt die Prozesse und Abläufe in den einzelnen Komponenten (Barrieren) während diesen Zeitraums dar
- zeitliche und räumliche Diskretisierung

#### **Schweden**

- Einteilung des Endlagersystems in Systemkomponenten;
- Zuordnung von Prozessen zu Komponenten (räumliche Diskretisierung);
- Angabe von Zeitbereichen (zeitliche Diskretisierung)

#### **Schweiz**

- Einteilung des Endlagersystems in Systemkomponenten (örtliche Diskretisierung);
- Relevanz-/Wirkzeitraum von Prozessen (Zeitliche Diskretisierung)

## Sicherheitsfunktionen

### VSG, ANSICHT

- Initiale Barrieren festlegen. (Initiale-Barrieren: Barrieren die direkt oder indirekt, bei Erfüllung ihrer Funktion, zum Einschluss von Radionukliden beitragen)

### Frankreich

- Formulierung von Sicherheitsfunktionen für sicherheitskonzeptionell bedeutsame Komponenten

### Belgien

- Hierarchische Ableitung von Sicherheitsfunktionen und sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Komponenten ausgehend vom Sicherheitskonzept.

### Schweden

- Sicherheitskonzept → grundlegende Schutzziele → untergeordnete Schutzziele → komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen

### Schweiz

- Darlegung des Sicherheitskonzeptes und von Sicherheitsfunktionen

## Analyse

### VSG, ANSICHT

- Analyse der potenziellen Einflüsse der FEP auf Initiale Barrieren (u.a. zeitliche Diskretisierung)
- Erstellung der FEP-Datenbank mit Eigenschaften

### Frankreich

- PARS (phenomenological analysis of repository situations)
- Bewertung jeder Situation
- Ermittlung von Ungewissheiten und der wesentlichen Prozesse

### Belgien

- Ungewissheitsanalysen für die Randbedingungen, sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Komponenten und Sicherheitsfunktionen

### Schweden

- Prozesse und deren gegenseitige Einflüsse (Prozessdiagramm)
- Parameterabhängigkeiten (Interaktionsmatrizen)
- Beeinflussung von Parametern einer Komponente durch einen Prozess (Prozesstabellen)
- Datenblätter für Prozesse
- Tabellen für jede Komponente mit Angabe der relevanten Prozesse (räumliche Diskretisierung)
- Alle Zusammenhänge zwischen Prozessen und Komponenten (FEP-Chart)
- Untersuchung von Ausgangsfaktoren, Prozessen, externer Bedingungen auf Sicherheitsfunktionen

### Schweiz

- Untersuchung der Einflüsse von Erscheinungen auf die Sicherheitsfunktionen (Sensitivitätsanalyse)
- Identifizierung von wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen

## Bestimmung von Eintrittswahrscheinlichkeiten

### VSG, ANSICHT

- Expert Judgement für die Parameter und der zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit; **Kombination beider für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien**

#### Frankreich

- Expert Judgement

#### Belgien

- Expert Judgement

#### Schweden

- Expert Judgement, Statistiken wenn vorhanden, **Kombination von Wahrscheinlichkeiten wird genutzt**

#### Schweiz

- Expert Judgement

## Einteilung in Referenzszenario und Alternativszenarien

### VSG, ANSICHT

- **Referenzszenario: wahrscheinliche Szenarien**
- **Alternativszenarien: weniger wahrscheinliche Szenarien**

#### Frankreich

- Referenzszenario: Sicherheitsfunktionen wirken wie ausgelegt, erwartete Entwicklung
- Alternativszenarien: nicht in Referenzszenario berücksichtigt und Auswirkung vernachlässigbar oder Eintrittswahrscheinlichkeiten gering

#### Belgien

- Referenzszenario: Sicherheitsfunktionen wirken wie ausgelegt, erwartete Entwicklung
- Alternativszenarien: Ungewissheiten bezüglich Sicherheitsfunktionen

#### Schweden

- Referenzszenario: Erwartete (wahrscheinlichste) Entwicklung (Sicherheitsfunktionen wirken wie ausgelegt)
- Randbedingung mit globaler Erwärmung und ohne
- Alternativszenarien: nicht in Referenzszenario berücksichtigte Ungewissheiten bezüglich Sicherheitsfunktionen

#### Schweiz

- Referenzszenario: Erwartete Entwicklung (Sicherheitsfunktionen wirken wie ausgelegt)
- Alternativszenarien: Auf Grundlage der wichtigen sicherheitsrelevanten Erscheinungen

**Tab. A.2** Tabellarische-Hierarchische Aufstellung von Systemkomponenten

Ort		Systemkomponente							
Übertägiger Anlagenbereich									
Transportbereich									
					Bedien- und Kontrollelementen				
				Starrachse	Räder	Reifen			
				Karosserie					
				Antriebsaggregat	Hydrodynamischer Fahrtrieb	Dieselmotor	Kraftstoffanlage		
							Kraftstoffbehälter	Diesel	
							Dieselleitungen		
						E-Motor	Verkabelung		
							Batterie		
				Nebenaggregate	Lenksystem	Hydrauliksystem	Hydraulikleitungen	Hydrauliköl	
								Dichtungen	
						Bremssystem	Hydrauliksystem	Hydraulikleitungen	Hydrauliköl
									Dichtungen
							Ölkühler		
					Elektrische Anlage	Verkabelung			

						Batterie		
					bordfeste HRD-Löschanlage	Löschmittel		
						Temperatursensoren		
						Handauslöser		
					Feuerlöscher	Löschmittel		
					Notlenkung			
					Abschleppösen			
			Drehknickgelenk					
		Lastteil	Ladefläche	Verriegelungsvorrichtung	klappbaren Aufsetzzapfen			
				Transporteinheit	Eckbeschläge			
			Starrachse	Räder	einfach bereift			
			Karosserie					
		Distanzhalter						
		Verkehrslenkung						
		Wirtsgestein						
		Weitere Grubenarbeiter						
		Örtlicher Leitstand						

Einlage- Trans- portstre- cke	Verkehrs- lenkung	Verkehrslen- kungssystem	Lichtzeichen- gesteuertem Blocksystem	Lichtsignalanlagen	detektor- und funktionsüber- wacht		
	Ausweich- stellen						
	Kreuzungen						
	Einmündun- gen						
	Wirtsgestein						
	Weitere Gru- benarbeiter						
	Schleusen- tore						
	Wetterkühler						
	Weiteres Transport- fahrzeug						
	Weitere sonstige Fahrzeuge						
Einlage- rungsstre- cke	Entlade- kammer	Stapelfahr- zeug	Vorderteil	Fahrerkabine	Fahrer		
					Bedien- und Kon- trollelementen	Verkabelung	
				Starrachse	Räder	zwillingsbereift	
				Karosserie			
				Hubgerüst	Lastaufnahmeein- richtung		
					Gegengewicht		
Hydraulikanlage	Hydraulikölbehäl-	Hydrauliköl					

						ter		
						Ölkühler		
						Hydraulikleitungen	Dichtungen	
					elektrische Anlage			
					Lenkung			
					Bremssystem			
					Karosserie			
				Knickgelenk				
				Motorteil	Pendelachse	Räder	einfach bereift	
					Karosserie			
					Dieselmotor	Kraftstofftank	Diesel	
						Dieselleitungen		
					E-Motor	Verkabelung		
						Batterie		
					Drehmomentwandler			
					Lastschaltgetriebe			
					bordeigene Löscheinrichtung	Löschmittel		
						Temperatursensoren		
				Handauslöser				
				Feuerlöscher	Löschmittel			
		Einfahrt						

**Tab. A.3** Tabellarische-hierarchische Aufstellung von Betriebsabläufen

Ort		Betriebsablauf		
Übertägiger Anlagenbereich				
Transportbereich				
Untertägiger Transportbereich	Füllort	Absetzen der Transporteinheit auf der Ladefläche des Transportwagens		
		Zentrieren und Sichern durch Verriegelungseinrichtung	Formschlüssige Sicherung	
		Ausfahrt des Transportwagens aus dem Füllort		
		Überwachung der Fahrt vom örtlichen Leitstand aus		
		Überwachung der Funktion und Betriebsbereitschaft der Lichtsignalanlage während des Einlagerungsbetriebes		
	Einlagerungs-Transportstrecke	Fahrt des Transportwagens vom Füllort zum Eingang der Einlagerungsstrecke	Bedienung des Fahrzeuges	Beschleunigen
				Lenken
				Bremsen
		Einbiegen in Einlagerungsstrecke	Bedienung des Fahrzeuges	Beschleunigen
				Lenken
				Bremsen
		Regelung der abwechselnden Leitung des Verkehrsflusses auf der Einlagerungs-Transportstrecke	Beachten des Verkehrsleitsystems	
	Einlag.-Strecke	Auslösen der Löscheinrichtung		
Betätigen eines Feuerlöschers				
Stehen bleiben vor der Entladekammer				
	Lösen der Verriegelungsvorrichtung			

**Tab. A.4** Liste mit internen und externen Einwirkungen; vgl. /IAEA 10/

Einwirkung	Definition	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
Starker Wind	Umfasst Schäden durch Staudruck durch Wind und Schäden durch fliegende Gegenstände.	
Tornado	Zu unterscheiden von starkem Wind durch spezifische Charakteristiken: Dauer, Windgeschwindigkeiten und Häufigkeit.	
Hohe Temperaturen		
Niedrige Temperaturen		
Extremer Luftdruck (hoch und niedrig)		ja
Extremer Regenfall	Umfasst Schäden durch Regendruck auf Dächern und Überflutungen ausgelöst von Starkregen.	ja
Extremer Schneefall	Schäden durch starken Schneefall und Schneesturm.	
Extremer Hagel	Schäden durch Belastung von starkem Hagel.	
Nebel		
Raureif		
Dürre	Schäden durch längere Trockenzeiten	
Salzsturm		
Sandsturm		
Blitzschlag	Direkte und indirekte Schäden ausgelöst durch Blitzschlag.	
Meteoriteneinschlag		ja
Bodenhebung		ja
Bodenfrost		
Einwirkungen durch Tiere		
Vulkanische Erscheinungen		
Lawinen		
Erdbeben		

Einwirkung	Definition	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
Externes Feuer	Schäden durch Feuer aus der Umgebung bzw. auf dem Gelände aber außerhalb der Anlage.	ja
Seismische Aktivitäten	Schäden durch Erdbeben	ja
Karst	Gefahren durch Spaltenbildung, Senklöcher, Flüsse und Höhlen im Untergrund.	ja
Starke Strömungen	Schäden durch starke Wasserströmungen und dadurch hervorgerufene Erosion.	
Niedriger Wasserpegel		
Hohen Wasserpegel	Schäden durch hohen Wasserpegel durch Sturmfluten, Wellen oder Gezeiten.	ja
Hohe Wassertemperatur		
Niedrige Wassertemperatur		
Erdrutsch unter Wasser		
Eisbedeckung		
Kammeis/Nadeleis		
Packeis		
Organisches Material im Wasser	Gefahr durch bspw. Algen, Seetang, Fisch, Muscheln und Quallen	
Korrosion	Gefahr durch salzinduzierte Korrosion	
Feste und flüssige Verunreinigungen durch Schiffe		
Chemische Freisetzungen im Wasser	Gefahr durch Veränderung der Wasserqualität durch Freisetzungen aufgrund von Schiffsunglücken oder von Land.	
Tsunami	Gefahr durch hohe Wasserdrücke und Pegel durch einen Tsunami.	
Direkter Einschlag eines Schiffes		
Explosion nach einem Transportunfall	Gefahr durch Druckwellen bzw. fliegende Objekte aufgrund einer Explosion ausgehend von einem Transportunfall außerhalb der Anlage auf der Straße, auf dem Meer, auf einem See oder auf einem Fluss.	ja

Einwirkung	Definition	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
Chemische Freisetzung nach einem Transportunfall	Gefahr durch giftige Substanzen ausgehend von einem Transportunfall außerhalb der Anlage auf der Straße, auf dem Meer, auf einem See oder auf einem Fluss.	ja
Explosion außerhalb der Anlage	Gefahr durch Druckwellen bzw. fliegende Objekte aufgrund einer Explosion fester und gasförmiger Stoffe außerhalb der Anlage.	
Explosion nach einem Pipelineunfall	Gefahr durch Druckwellen bzw. fliegende Objekte aufgrund von Explosionen nach Pipelineunfällen.	
Chemische Freisetzung außerhalb der Anlage		ja
Chemische Freisetzung nach Pipelineunfall	Gefahr durch giftige Substanzen von einem Pipelineunfall.	ja
Militärische Flugobjekte		
Ausgrabungs-/Aushubarbeiten		
Einwirkung von Schwerttransporten auf dem Gelände		
Explosion auf dem Gelände	Gefahr durch Druckwellen oder fliegenden Objekten ausgehend von einer Explosion auf dem Anlagengelände.	
Explosion nach einem Pipelineunfall auf dem Gelände	Gefahr durch Druckwellen bzw. fliegende Objekte aufgrund von Explosionen nach Pipelineunfällen auf dem Anlagengelände.	
Chemische Freisetzung auf dem Gelände	Gefahr durch giftige Substanzen aufgrund chemischer Freisetzungen auf dem Gelände.	ja
Chemische Freisetzung nach Pipelineunfall auf dem Gelände	Gefahr durch giftige Einwirkungen aufgrund einer chemischen Freisetzung nach Pipelineunfall auf dem Anlagengelände.	
Internes Feuer aus anderen Bereichen auf dem Gelände		ja
Flugobjekte von anderen Bereichen auf dem Gelände		
Interne Überflutung und schwierige Umgebungs-		ja

Einwirkung	Definition	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
bedingungen von anderen Bereichen auf dem Gelände		
Ausgrabung-/Aushubarbeiten auf dem Gelände		
Satellitenabsturz		ja
Flugzeugabsturz	Gefahr durch Absturz von privaten, kommerziellen und militärischen Flugzeugen.	ja
Magnetische Störungen	Gefahr durch menschlich erstellte elektrische und magnetische Felder wie bspw. Radar, Radio und Handys.	ja
Versagen eines Damms flussaufwärts.	Gefahr durch hohe Wasserpegel und Wellen aufgrund eines defekten Damms flussaufwärts.	ja

**Tab. A.5** Liste der NEA-FEP, die als relevant für die Betriebsphase angesehen werden;  
vgl. /NEA 06/

<b>NEA-FEP-Nr.</b>	<b>FEP-Bezeichnung</b>	<b>Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2</b>
0.01	Impacts of concern	
0.02	timescales of concern	
0.03	spatial domain of concern	
0.04	repository assumptions	
0.05	future human actions assumptions	
0.06	future human behavior (target group) assumptions	
0.07	dose response assumptions	
0.08	Aims of the assessment	
0.09	regulatory requirements and exclusions	
0.10	model and data issues	
1.1.01.	site investigation	ja
1.1.02.	excavation/construction	ja
1.1.03.	emplacement of wastes and backfilling	ja
1.1.04.	closure and repository sealing	
1.1.06.	waste allocation	
1.1.07.	repository design	
1.1.08.	quality control	ja
1.1.09.	schedule planning	
1.1.10.	administrative control, repository site	ja
1.1.11.	monitoring of repository	ja
1.1.12.	accidents and unplanned events	
1.1.13.	retrievability	
1.2.02.	deformation, elastic, plastic or brittle	ja
1.2.03.	seismicity	
1.2.04.	volcanic and magmatic activity	ja
1.2.09.	salt diapirism and dissolution	ja
1.2.10.	hydrological/hydrogeological response to geological changes	ja
1.3.03.	sea level change	

NEA-FEP-Nr.	FEP-Bezeichnung	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
1.4.04.	drilling activities (human intrusion)	ja
1.4.05.	mining and other underground activities (human intrusion)	ja
1.4.07.	water managements (wells, reservoirs, dams)	
1.4.10.	remedial actions	ja
1.4.11.	explosions and crashes	ja
1.5.01.	meteorite impact	ja
1.5.03.	miscellaneous and FEPs of uncertain relevance	ja
2.1.01.	inventory, radionuclide and other material	ja
2.1.02.	waste form materials and characteristics	ja
2.1.03.	container materials and characteristics	ja
2.1.04.	buffer/backfill materials and characteristics	ja
2.1.05.	seals, cavern/tunnel/shaft	ja
2.1.06.	other engineered features materials and characteristics	ja
2.1.07.	mechanical processes and conditions (in wastes and EBS)	ja
2.1.08.	hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in wastes and EBS)	ja
2.1.09.	chemical/geochemical processes and conditions (in wastes and EBS)	ja
2.1.10.	biological/biochemical processes and conditions (in wastes and EBS)	ja
2.1.11.	thermal processes and conditions (in wastes and EBS)	ja
2.1.12.	gas sources and effects (in wastes and EBS)	ja
2.1.13.	radiation effects (in wastes and EBS)	ja
2.1.14.	nuclear criticality	ja
2.2.01.	excavation disturbed zone, host rock	ja
2.2.02.	host rock	ja
2.2.03.	geological units, other	ja
2.2.04.	discontinuities, large scale (in geosphere)	ja
2.2.06.	mechanical processes and conditions (in geosphere)	ja
2.2.07.	hydraulic/hydrogeological processes and conditions (in geosphere)	ja
2.2.08.	chemical/geochemical processes and conditions (in geo-	ja

NEA-FEP-Nr.	FEP-Bezeichnung	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
	sphere)	
2.2.09.	biological/biochemical processes and conditions (in geosphere)	ja
2.2.10.	thermal processes and conditions (in geosphere)	ja
2.2.11.	gas sources and effects (in geosphere)	ja
2.2.12.	undetected features (in geosphere)	ja
2.2.13.	geological resources	ja
2.3.04.	lakes, rivers, streams and springs	ja
2.3.05.	costal features	
2.3.06.	marine features	
2.3.07.	atmosphere	ja
2.3.10.	meteorology	ja
2.3.11.	hydrological regime and water balance (near surface)	ja
2.3.12.	erosion and deposition	ja
3.1.01.	radioactive decay and in-growth	ja
3.1.02.	chemical/organic toxin stability	ja
3.1.03.	inorganic solids/solutes	ja
3.1.04.	Volatiles and potential for volatility	ja
3.1.05.	organics and potential for organic forms	ja
3.1.06.	noble gases	ja
3.2.01.	dissolution, precipitation and crystallization, contaminant	ja
3.2.02.	speciation and solubility, contaminant	ja
3.2.03.	sorption/desorption processes	
3.2.04.	colloids, contaminant interactions and transport with	
3.2.05.	chemical/complexing agents, affects on contaminant speciation/transport	ja
3.2.06.	microbial/biological/plant-mediated processes, contaminant	ja
3.2.07.	water-mediated transport of contaminants	
3.2.08.	Solid-mediated transport of contaminants	
3.2.09.	Gas-mediated transport of contaminants	
3.2.10.	Atmospheric transport of contaminants	

NEA-FEP-Nr.	FEP-Bezeichnung	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
3.2.11.	Animal, plant and microbe mediated transport of contaminants	
3.2.12.	Human-action-mediated transport of contaminants	
3.2.13.	uptake of contaminants in foodchains	
3.3.01.	contaminant concentrations in drinking water, foodstuffs and drugs	
3.3.02.	contaminant concentrations in environmental media	
3.3.03.	contaminant concentrations in non-food- products	
3.3.04.	exposure modes	
3.3.05.	dosimetry	
3.3.06.	radiological toxicity/effects	
3.3.07.	non-radiological toxicity/effects	
3.3.08.	radon and radon daughter exposure	ja

**Tab. A.6** Liste der FEP aus der VSG, die als relevant für die Betriebsphase angesehen werden; vgl. /WOL 12/

<b>NEA-FEP-Nr.</b>	<b>VSG-FEP-Nr.</b>	<b>FEP-Bezeichnung</b>	<b>Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2</b>
1.1.12.	1.1.12.01	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase	ja
1.1.12.	1.1.12.02	Kokillensticking	
1.2.03.	1.2.03.01	Erdbeben	ja
1.2.04.	1.2.04.01	Magmatismus	ja
1.2.07.	1.2.07.01	Erosion	
1.2.09.	1.2.09.02	Subrosion	ja
1.3.01.	1.3.01.01	Globale klimatische Veränderungen	
1.3.03.	1.3.03.01	Transgression oder Regression	
1.5.01.	1.5.01.01	Meteoriteneinschlag	ja
1.5.03.	1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen	ja
2.1.01.	2.1.01.01	Inventar: Radionuklide	ja
2.1.01.	2.1.01.02	Inventar: Metalle	ja
2.1.01.	2.1.01.03	Inventar: Organika	ja
2.1.01.	2.1.01.04	Inventar: Sonstige Stoffe	ja
2.1.02.	2.1.02.01	Abfallmatrix	ja
2.1.03.	2.1.03.01	Brennelement-Behälter	
2.1.03.	2.1.03.02	Sonstige Endlagerbehälter	ja
2.1.04.	2.1.04.01	Versatz	ja
2.1.05.	2.1.05.01	Verschlussmaterial	
2.1.05.	2.1.05.02	Schachtverschlüsse	
2.1.05.	2.1.05.03	Streckenverschlüsse	
2.1.05.	2.1.05.05	Sonstige Verschlussbauwerke	
2.1.06.	2.1.06.01	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	ja
2.1.06.	2.1.06.02	Bohrlochverrohrung	
2.1.07.	2.1.07.01	Konvergenz	
2.1.07.	2.1.07.02	Fluiddruck	ja
2.1.07.	2.1.07.03	Salzgruskompaktion	

NEA-FEP-Nr.	VSG-FEP-Nr.	FEP-Bezeichnung	Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2
2.1.07.	2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	ja
2.1.08.	2.1.08.01	Porosität	ja
2.1.08.	2.1.08.02	Permeabilität	ja
2.1.08.	2.1.08.03	Lösungen im Grubenbau	ja
2.1.08.	2.1.08.04	Kanalisation im Salzgrus	
2.1.08.	2.1.08.06	Lösungszutritt ins Grubengebäude	ja
2.1.08.	2.1.08.07	Strömungsvorgänge im Grubengebäude	ja
2.1.08.	2.1.08.08	Quellen des Bentonits	
2.1.09.	2.1.09.01	Geochemisches Milieu im Grubenbau	ja
2.1.09.	2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	
2.1.09.	2.1.09.03	Metallkorrosion	ja
2.1.09.	2.1.09.04	Korrosion der Brennstoffmatrix	
2.1.09.	2.1.09.05	Korrosion von Glas	
2.1.09.	2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	ja
2.1.09.	2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	ja
2.1.09.	2.1.09.08	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails	ja
2.1.10.	2.1.10.01	Zersetzung von Organika	ja
2.1.10.	2.1.10.02	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock	ja
2.1.11.	2.1.11.01	Wärmeproduktion	
2.1.11.	2.1.11.02	Thermische Expansion oder Kontraktion	
2.1.11.	2.1.11.03	Verdampfen von Wasser	
2.1.12.	2.1.12.01	Gasbildung	ja
2.1.12.	2.1.12.02	Gasmenge im Grubenbau	ja
2.1.12.	2.1.12.03	Gaseindringdruck	
2.1.12.	2.1.12.04	Zündfähige Gasgemische	ja
2.1.13.	2.1.13.01	Strahlungsinduzierte Aktivierung	ja
2.1.13.	2.1.13.02	Materialversprödung durch Strahlung	ja

<b>NEA-FEP-Nr.</b>	<b>VSG-FEP-Nr.</b>	<b>FEP-Bezeichnung</b>	<b>Verwendung in beispielhafter Anwendung in Kapitel 7.2</b>
2.1.13.	2.1.13.03	Radiolyse	ja
2.1.14.	2.1.14.01	Kritikalität	ja
2.2.01.	2.2.01.01	Auflockerungszone	ja
2.2.02.	2.2.02.01	Wirtsgestein	ja
2.2.02.	2.2.02.02	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	ja
2.2.03.	2.2.03.01	Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.04.	2.2.04.01	Störungen und Störungszonen im Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.06.	2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	ja
2.2.06.	2.2.06.02	Selbstversatz	ja
2.2.07.	2.2.07.01	Fluidvorkommen im Wirtsgestein	ja
2.2.07.	2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	ja
2.2.07.	2.2.07.03	Grundwasserströmung im Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.07.	2.2.07.04	Gasströmung im Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.08.	2.2.08.01	Hydrochemische Verhältnisse im Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.09.	2.2.09.01	Mikrobielle Prozesse im Deck- und Nebengebirge	ja
2.2.10.	2.2.10.01	Wärmebedingte Hebung oder Senkung des Deckgebirges	
2.2.10.	2.2.10.05	Thermochemische Sulfatreduktion	
3.1.01.	3.1.01.01	Radioaktiver Zerfall	ja
3.2.01.	3.2.01.01	Radionuklidmobilisierung	
3.2.03.	3.2.03.01	Sorption und Desorption	
3.2.04.	3.2.04.01	Kolloide	
3.2.05.	3.2.05.01	Komplexbildung	ja
3.2.07.	3.2.07.01	Radionuklidtransport in der flüssigen Phase	
3.2.07.	3.2.07.02	Advektion	
3.2.07.	3.2.07.04	Diffusion	
3.2.09.	3.2.09.01	Radionuklidtransport in der Gasphase	

**Tab. A.7** Hierarchische Aufstellung von Sicherheitsfunktionen

AtG § 1 - Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgüter vor den Gefahren der Kernenergie und der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlen

StrlSchV §§ 5 und 6 - Vermeidungs- und Minimierungsgebot von Strahlenexpositionen

Gewährleistung des sicheren Einschusses des radioaktiven Materials im Behälter		
Gewährleistung der Behälterintegrität		
	Schutz vor mechanischen Einwirkungen	
		Vermeidung von Gebindeabstürzen
		Vermeidung von Kollisionen mit Gebinde
		Vermeidung von Abstürzen auf Gebinde
		Vermeidung von Druckaufbau im Gebinde
	Schutz vor thermischen Einwirkungen	
		Vermeidung/Reduzierung von Bränden
		Vermeidung/Reduzierung von Temperaturen, die zu Integritätsverlust führen
	Schutz vor chemischen Einwirkungen	
		Vermeidung/Reduzierung von Korrosion
		Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser
		Vermeidung/Reduzierung der chem. Veränderung der Abfälle
	Schutz vor hydraulischen Einwirkungen	
		Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser
Vermeidung des Kritischen Zustands von Kernbrennstoff		
	Vermeidung der Bildung einer kritischen Masse	
	Vermeidung einer Moderation von Neutronen	

**Tab. A 8** Abhängigkeitsmatrix für übergreifende Einwirkungen und Sicherheitsfunktionen

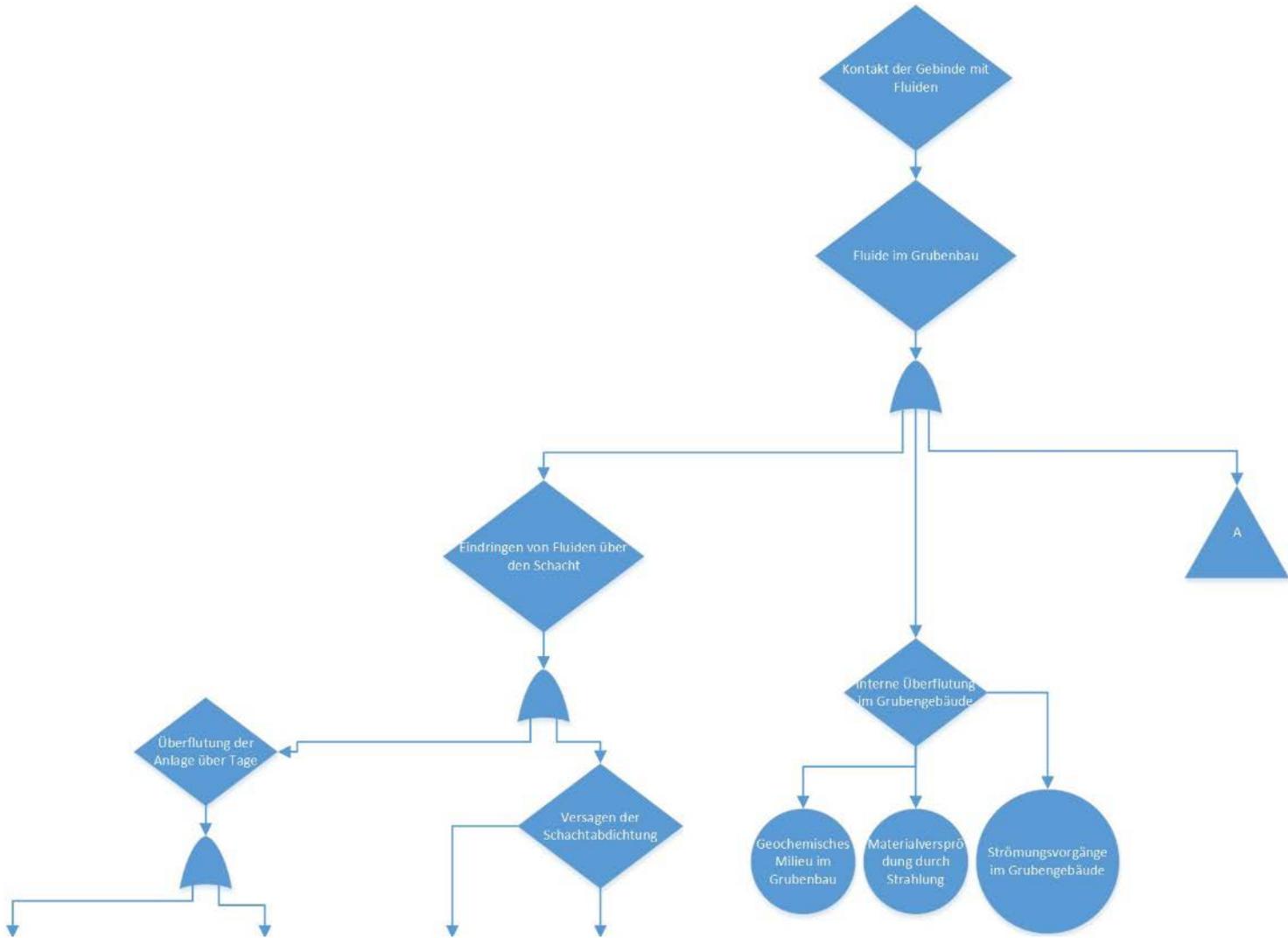
Sicherheitsfunktionen		Vermeidung von Gebindeabstürzen	Vermeidung von Kollisionen mit Gebinde	Vermeidung von Abstürzen auf Gebinde	Vermeidung von Druckaufbau im Gebinde	Vermeidung/ Reduzierung von Bränden	Vermeidung/ Reduzierung von Temperaturen, die zu Integritätsverlust führen	Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser	Vermeidung der Bildung einer kritischen Masse	Vermeidung einer Moderation von Neutronen
Übergreifende Einwirkungen										
Extremer Luftdruck (hoch und niedrig)					x					
Extremer Regenfall	Umfasst Schäden durch Regendruck auf Dächern und Überflutungen ausgelöst von Starkregen.							x		x
Meteoriteneinschlag		x	x	x			x		x	
Bodenhebung			x							
Externes Feuer	Schäden durch Feuer aus der Umgebung bzw. auf dem Gelände aber außerhalb der Anlage.				x	x	x			
Seismische Aktivitäten	Schäden durch Erdbeben	x	x	x						
Karst	Gefahren durch Spaltenbildung, Senklöcher, Flüsse und Höhlen im Untergrund.			x				x		x
Hohen Wasserpegel	Schäden durch hohen Wasserpegel durch Sturmfluten, Wellen oder Gezeiten.							x		x
Explosion nach einem Transportunfall	Gefahr durch Druckwellen bzw. fliegende Objekte aufgrund einer Explosion ausgehend von einem Transportunfall außerhalb der Anlage auf der Straße, auf dem Meer, auf einem See oder auf einem Fluss.			x						
Chemische Freisetzung nach einem Transportunfall	Gefahr durch giftige Substanzen ausgehend von einem Transportunfall außerhalb der Anlage auf der Straße, auf dem Meer, auf einem See oder auf einem Fluss.									
Chemische Freisetzung außerhalb der Anlage										

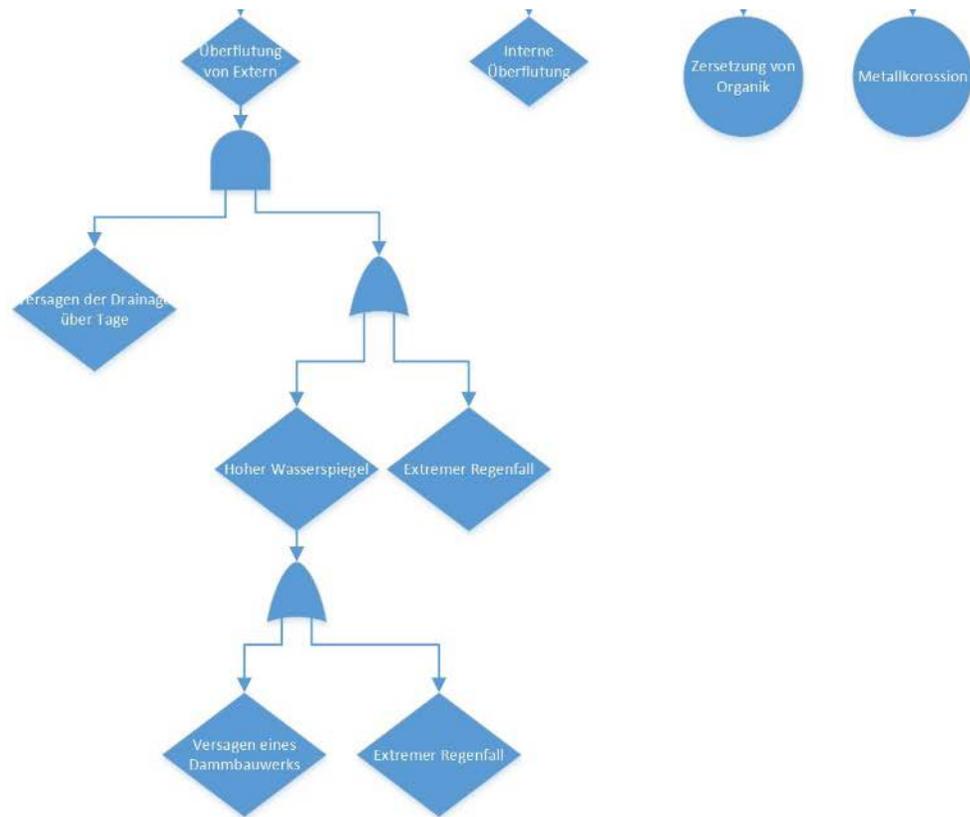
Sicherheitsfunktionen		Übergreifende Einwirkungen								
		Vermeidung von Gebindeabstürzen	Vermeidung von Kollisionen mit Gebinde	Vermeidung von Abstürzen auf Gebinde	Vermeidung von Druckaufbau im Gebinde	Vermeidung/ Reduzierung von Bränden	Vermeidung/ Reduzierung von Temperaturen, die zu Integritätsverlust führen	Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser	Vermeidung der Bildung einer kritischen Masse	Vermeidung einer Moderation von Neutronen
Chemische Freisetzung nach Pipelineunfall	Gefahr durch giftige Substanzen von einem Pipelineunfall.									
Chemische Freisetzung auf dem Gelände	Gefahr durch giftige Substanzen aufgrund chemischer Freisetzungen auf dem Gelände.									
Internes Feuer aus anderen Bereichen auf dem Gelände					x	x	x			
Interne Überflutung und schwierige Umgebungsbedingungen von anderen Bereichen auf dem Gelände								x		x
Satellitenabsturz				x						
Flugzeugabsturz	Gefahr durch Absturz von privaten, kommerziellen und militärischen Flugzeugen.	x	x	x						
Magnetische Störungen	Gefahr durch menschlich erstellte elektrische und magnetische Felder wie bspw. Radar, Radio und Handys.		x				x			
Versagen eines Damms flussaufwärts.	Gefahr durch hohe Wasserpegel und Wellen aufgrund eines defekten Damms flussaufwärts.							x		

**Tab. A 9** Abhängigkeitsmatrix für FEP aus der VSG und Sicherheitsfunktionen

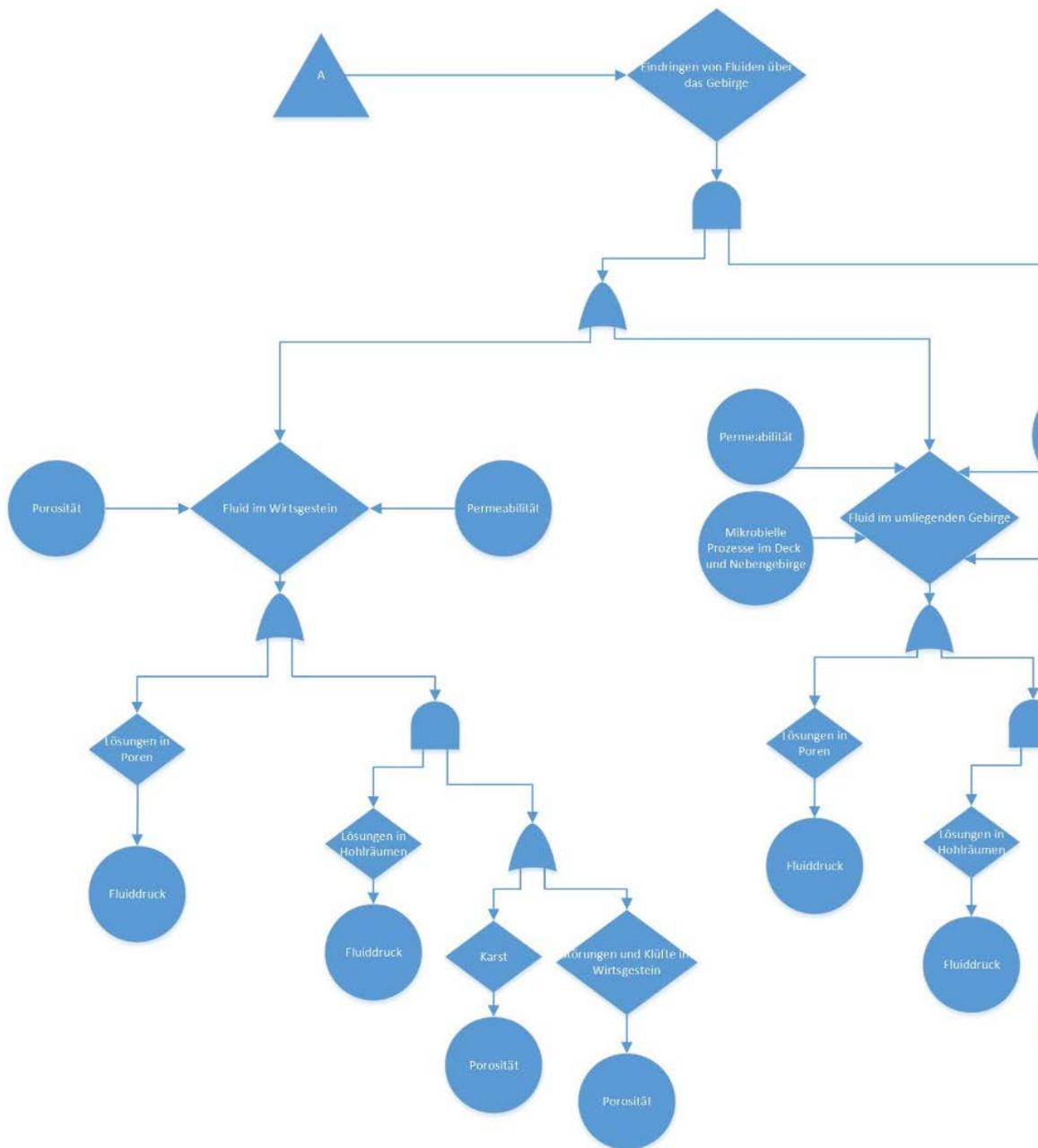
Sicherheitsfunktionen  VSG-FEP		Vermeidung von Gebindeabstürzen	Vermeidung von Kollisionen mit Gebinde	Vermeidung von Abstürzen auf Gebinde	Vermeidung von Druckaufbau im Gebinde	Vermeidung/Reduzierung von Bränden	Vermeidung/ Reduzierung von Temperaturen, die zu Integritätsverlust führen	Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser	Vermeidung der Bildung einer kritischen Masse	Vermeidung einer Moderation von Neutronen
		1.1.12.01	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase							
1.2.03.01	Erdbeben	x	x	x						
1.2.04.01	Magmatismus						x			
1.2.09.02	Subrosion	x	x	x				x		
1.5.01.01	Meteoriteneinschlag	x	x	x						
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen							x		
2.1.01.01	Inventar: Radionuklide				x	x	x	x	x	x
2.1.01.02	Inventar: Metalle									
2.1.01.03	Inventar: Organika				x	x	x			
2.1.01.04	Inventar: Sonstige Stoffe				x	x	x	x	x	x
2.1.02.01	Abfallmatrix				x	x	x	x	x	x
2.1.03.02	Sonstige Endlagerbehälter	x	x	x						
2.1.04.01	Versatz				x		x	x	x	x
2.1.06.01	Technische Einrichtungen und deren Eigenschaften	x	x	x		x	x			
2.1.07.02	Fluiddruck			x				x		
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien				x				x	
2.1.08.01	Porosität			x				x		x
2.1.08.02	Permeabilität							x		
2.1.08.03	Lösungen im Grubenbau			x				x		x
2.1.08.06	Lösungszutritt ins Grubengebäude			x				x		x
2.1.08.07	Strömungsvorgänge im Grubengebäude			x				x		x

2.1.09.01	Geochemisches Milieu im Grubenbau			x				x	x	x
2.1.09.03	Metallkorrosion			x	x			x		
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen			x	x					
2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme				x			x		
2.1.09.08	Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails									x
2.1.10.01	Zersetzung von Organika				x		x	x		
2.1.10.02	Mikrobielle Prozesse im Grubengebäude und im Salzstock			x						
2.1.12.01	Gasbildung				x					

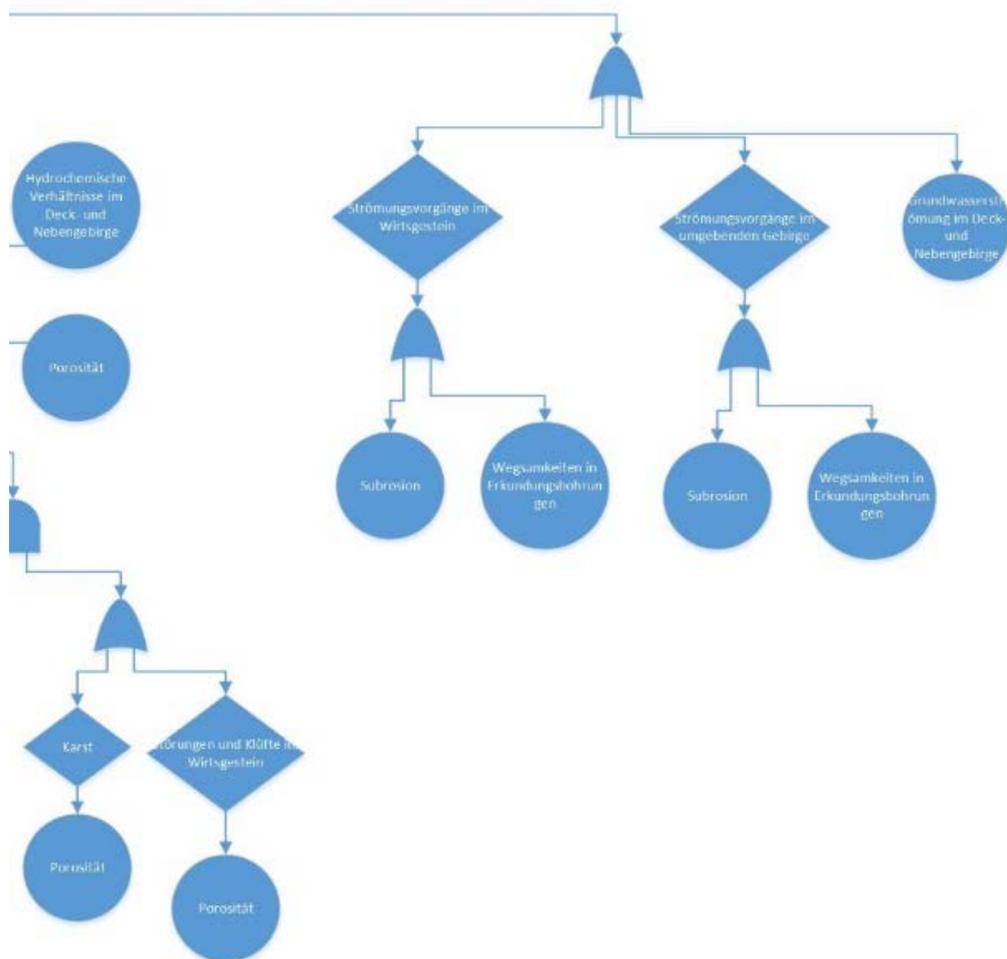




**Abb. A.1** Erster Teil des Fehlerbaums für die Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ für das betrachtete Beispiel aus Kapitel 7



**Abb. A.2** Zweiter Teil des Fehlerbaums für die Sicherheitsfunktion „Vermeidung des Kontaktes der Gebinde mit Wasser“ für das betrachtete Beispiel aus Kapitel 7



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

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

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](http://www.grs.de)