

**Vorschlag zur
Einordnung von
Szenarien für tiefe
geologische Endlager
in Wahrscheinlichkeits-
klassen**

Vorschlag zur Einordnung von Szenarien für tiefe geologische Endlager in Wahrscheinlichkeits- klassen

Thomas Beuth

März 2013

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609 R 03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

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

Deskriptoren

Ausprägung, Bündelung, Eintrittswahrscheinlichkeit, FEP, Klassifizierung, Methodik, Szenarienentwicklung, Szenarium, Wahrscheinlichkeitsklassen

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht der im Rahmen des Vorhabens 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“ erstellt wurde, beinhaltet den Vorschlag für eine Methodik, die eine Zuordnung von im Rahmen von Langzeitsicherheitsnachweisen entwickelten Szenarien zu festgelegten Wahrscheinlichkeitsklassen erlaubt. Die Zuordnung erfolgt auf indirektem Weg über die Einordnung der definierenden relevanten Faktoren (sog. FEP: Features, Events and Processes) des entsprechenden Szenariums ebenfalls in Wahrscheinlichkeitsklassen. Für die Einordnung der relevanten Faktoren in die Klassen wurden Entscheidungsabläufe und Kriterien entwickelt. Neben der Beschreibung der Methodik war ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit auf die beispielhafte Anwendung der Methode auf ein definiertes Szenarium ausgerichtet. Hierbei wurden anhand des Beispiels die einzelnen durchzuführenden Schritte bzw. Entscheidungskriterien der Methodik dokumentiert. Zusätzlich wurden auf mögliche subjektive Einflüsse, bei der Entscheidungsfindung für eine Zuordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse, hingewiesen.

Abstract

The provided report was elaborated in the framework of the project 3609R03210 „Research and Development for Proof of the long-term Safety of Deep Geological Repositories“. It contains a proposal for a methodology that enables the assignment of developed scenarios in the frame of Safety Cases to defined probability classes. The assignment takes place indirectly through the categorization of the defining relevant factors (so-called FEP: Features, Events and Processes) of the respective scenarios also in probability classes. Therefore, decision trees and criteria were developed for the categorization of relevant factors in classes. Besides the description of the methodology another focal point of the work was the application of the method taking into account a defined scenario. By means of the scenario the different steps of the method and the decision criteria were documented, respectively. In addition, potential subjective influences along the path of decisions regarding the assignment of scenarios in probability classes were identified.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung/Zielsetzung..... | 1 |
| 2 | Randbedingungen/Voraussetzungen..... | 5 |
| 3 | Beschreibung der Methodik zur Szenarienklassifizierung | 7 |
| 3.1 | Abgrenzung | 7 |
| 3.2 | Szenarienklassen | 7 |
| 3.3 | Methodik zur Einstufung in die Klassen | 9 |
| 3.4 | Kriterien für die Zuordnung der FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen | 14 |
| 3.4.1 | Eintrittswahrscheinlichkeit..... | 16 |
| 3.4.1.1 | Einstufung von Merkmalen | 16 |
| 3.4.1.2 | Einstufung von Events/Processes..... | 18 |
| 3.4.2 | Wahrscheinlichkeit der Ausprägung..... | 22 |
| 3.5 | Bündelung von Szenarien und repräsentatives Szenarium | 23 |
| 4 | Anwendungsbeispiel zur Klassifizierung von Szenarien..... | 25 |
| 4.1 | Beschreibung des Szenariums | 25 |
| 4.2 | Voraussetzungen..... | 26 |
| 4.3 | Transportbedingungen..... | 26 |
| 4.4 | Varianten | 28 |
| 4.5 | Wahrscheinlichkeitseinteilung der FEP und des Szenariums | 29 |
| 4.6 | Gruppierung und Bündelung..... | 31 |
| 5 | Zusammenfassung | 33 |
| | Literaturverzeichnis..... | 35 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 37 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 39 |

1 Einleitung/Zielsetzung

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern werden Langzeitsicherheitsanalysen herangezogen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Durchführung solcher Analysen ist die Szenarienentwicklung, in der die potenziellen Entwicklungen (Szenarien) des Endlagersystems im Nachweiszeitraum ermittelt werden.

Ein Szenarium beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen /BAL 07/. Die relevanten Faktoren sind hier mit dem Sammelbegriff FEP gleichzusetzen, der für „Features“ (Merkmale, Zustände), „Events“ (Ereignisse) und „Processes“ (Prozesse) steht.

Zur Szenarienentwicklung gehören die Identifizierung von Einfluss nehmenden Faktoren (FEP), die ausführliche Beschreibung und Auswahl möglicher Entwicklungen, die Klassifizierung der Szenarien nach Wahrscheinlichkeiten ihres Eintretens sowie die Bündelung von ähnlichen Entwicklungen zu einer Gruppe und die Identifizierung repräsentativer Szenarien für eine entsprechende Gruppe. Die repräsentativen Szenarien, bilden die Grundlage für die Langzeitsicherheitsanalysen und sind hinsichtlich ihrer Konsequenz zu untersuchen /BEU 12b/.

In der Realität wird das Endlagersystem nur eine Entwicklung durchlaufen, die aufgrund von Prognoseunsicherheiten nicht exakt bestimmt werden kann. Aus diesem Grund, hat die Szenarienentwicklung alle auf das Endlagersystem sicherheitstechnisch relevanten potenziellen Entwicklungen zu erfassen. Aus der Anzahl der potenziellen Entwicklungen wird es solche geben, die als wahrscheinlich angesehen werden und solche, die eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben jedoch nicht ganz auszuschließen sind. Darüber hinaus können Entwicklungen des Endlagersystems als unwahrscheinlich hinsichtlich ihres Eintretens erachtet werden. Die Einschätzung von Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von bestimmten Szenarien ist hinsichtlich der weiteren Handhabung und deren Beurteilung essenziell.

Aus praktischen Gründen sind Szenarien mit ähnlichen Entwicklungsabläufen zu Gruppen zusammenzufassen. Zur Bewertung der Langzeitsicherheit werden ausgewählte Szenarien herangezogen, die repräsentativ sind für eine Gruppe von potenziel-

len Entwicklungen des Endlagersystems. Für die Gruppierung von Szenarien gilt jedoch die Bedingung, dass sich die Gruppe nur aus Szenarien zusammensetzen darf, deren Entwicklungsabläufe ähnlich sind, und gleiche Niveaus hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit aufweisen. Eine Vermischung von z. B. gering wahrscheinlichen Szenarien und wahrscheinlichen Szenarien in einer Gruppe ist daher nicht zulässig.

Ein weiterer Grund für die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien liegt in der Vorgabe unterschiedlicher Richtwerte, die bei der Nachweisführung hinsichtlich der Sicherheit des Endlagers heranzuziehen sind. So gelten nach den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMU folgende Beurteilungskriterien /BMU 10/:

- „Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.“
- „Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen in der Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass die durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, verursachte zusätzliche effektive Dosis für die dadurch betroffenen Menschen 0,1 Millisievert pro Jahr nicht überschreitet. Dabei sind ebenfalls Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.“
- „Für unwahrscheinliche Entwicklungen wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt.“

Der vorliegende Bericht der im Rahmen des Vorhabens 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“ erstellt wurde, beinhaltet den Vorschlag für eine Methodik, die eine Zuordnung von entwickelten Szenarien zu festgelegten Wahrscheinlichkeitsklassen erlaubt. Die hier vorgestellte Methodik (Kap. 3) stellt eine Fortentwicklung des bei der GRS bereits ausgearbeiteten Ansatzes /BAL 04/ und eines Vorläuferdokumentes (Entwurfssfassung) dar. Das Vorläuferdokument wurde der eingerichteten Ad-hoc-Arbeitsgruppe "Leitlinie zur Szenarienklassifikation" der Entsorgungskommission (ESK) zur Verfügung gestellt. Die ESK hat bereits im Juni 2012 die erste Fassung und im November 2012 eine revi-

dierte Fassung der Leitlinie zur Einordnung von Entwicklungen in Wahrscheinlichkeitsklassen herausgebracht /ESK 12/.

Nach der Darstellung der Methodik erfolgt in Kap. 4 beispielhaft eine Anwendung der Methode auf ein definiertes Szenarium.

2 Randbedingungen/Voraussetzungen

Die in diesem Bericht beschriebene Methodik setzt voraus, dass die in Wahrscheinlichkeitsklassen einzuordnenden Szenarien vorliegen. D. h., dass eine entsprechende Ableitung bzw. Entwicklung von Szenarien dem Schritt der Zuordnung in die Wahrscheinlichkeitsklassen vorausgegangen sein muss. Darüber hinaus gilt die Voraussetzung, dass alle diejenigen FEP identifiziert sind, die ein bestimmtes Szenarium definieren. Hierbei ist es für das Ergebnis der Zuordnung entscheidend, die genaue Zusammensetzung an FEP, die das Szenarium bestimmen, zu berücksichtigen. Neben den genannten Voraussetzungen muss die Bedingung erfüllt sein, dass die definierenden FEP voneinander stochastisch unabhängig sind. In Kap. 3.3 wird auf diesen Sachverhalt näher eingegangen.

Neben den methodischen Voraussetzungen macht eine abschließende Zuordnung von Szenarien nur dann Sinn, wenn die ermittelten Entwicklungen, die das Endlagersystem im Nachweiszeitraum erfahren kann, an konkreten standortspezifischen Gegebenheiten und konzeptspezifischen Planungen ausgerichtet sind. D. h., der Standort wurde festgelegt und entsprechend erkundet und es muss eine geowissenschaftliche Langzeitprognose durchgeführt worden sein. Darüber hinaus muss das Endlagerkonzept vorliegen.

Die Grundlage der Szenarientwicklung bilden somit die Standortcharakterisierung, die Langzeitprognose sowie Charakterisierung des Endlagersystems mit seinen Teilsystemen. Ausgangspunkt der Betrachtungen ist der Zustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachbetriebsphase. Das bedeutet allerdings nicht, dass entsprechende FEP, die bereits vor der Nachbetriebsphase wirken und in der Nachbetriebsphase auf die Entwicklung des Endlagersystems Einfluss nehmen können, aus den weiteren beurteilenden Betrachtungen ausgeschlossen sind oder unberücksichtigt bleiben.

3 Beschreibung der Methodik zur Szenarienklassifizierung

Die in diesem Kapitel beschriebene Methodik zur Klassifizierung von Szenarien gilt allgemein und ist daher nicht auf einen bestimmten Standort, Endlagerkonzept oder geologische Formation ausgerichtet. Jedoch werden zur Verdeutlichung der Methodik an verschiedenen Verfahrensschritten Beispiele herangezogen, die sich an ein Endlager in der Wirtsf ormation Steinsalz orientieren.

3.1 Abgrenzung

In der Szenarienentwicklung wird unterschieden zwischen Szenarien, die menschliche Aktivitäten zum Gegenstand haben, hierzu zählt insbesondere menschliches Eindringen (Human Intrusion) in das Endlager, und alle anderen Szenarien die auf natürliche Entwicklungen sowie auf Abfall oder Endlager induzierte Entwicklungen zurückzuführen sind. Nur die letztgenannten Szenarien (alle anderen Szenarien), die als "potenzielle Entwicklungen" bezeichnet werden, sind Gegenstand der Szenarienentwicklung und relevant für die Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen. Die erstgenannten Szenarien (menschliche Aktivitäten) werden separat, d. h. außerhalb der systematischen Szenarienentwicklung behandelt. Die Begründung hierfür ist, dass zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können /BMU 10/. Es besteht international Konsens, dass es für eine belastbare Prognose der langfristigen Entwicklung der menschlichen Gesellschaft, ihrer Handlungsweisen und ihrer technologischen Fähigkeiten, keine wissenschaftliche Grundlage gibt /BEU 12a/.

3.2 Szenarienklassen

In der Szenarienentwicklung werden die potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems identifiziert. Das Eintreten von Szenarien der potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems ist je nach Kombination der relevanten Faktoren (FEP) als mehr oder weniger wahrscheinlich einzustufen. Für das Endlagersystem können Szenarien identifiziert werden, deren Eintreten auf Grund der Standortgegebenheiten mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet werden kann, während andere Entwicklungen eher als unwahrscheinlich eingestuft werden müssen.

Für die Einstufung potenzieller Entwicklungen werden hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit gemäß /BMU 10/ folgende Klassen und Wertebereiche für eine quantifizierbare Eintrittswahrscheinlichkeit (W [%] bzw. p [-]) über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren definiert:

- Die Klasse „wahrscheinliche Szenarien“ umfasst die potenziellen Entwicklungen, die mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit behaftet sind. Diese Klasse beinhaltet die für das Endlagersystem erwartete Entwicklung über den Prognosezeitraum.
Wertebereich: $10 \% \leq W \leq 100 \%$ ($0,1 \leq p \leq 1$)
- Entwicklungen des Endlagersystems, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik nicht auszuschließen sind und denen eine geringe Wahrscheinlichkeit über den Prognosezeitraum zugeordnet wird (im Vergleich zu den wahrscheinlichen Szenarien) oder deren Eintreten hypothetisch ist, werden der Klasse „weniger wahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet. Beispiele für diese Szenarienklasse sind das Entstehen neuer Wegsamkeiten in Folge des Wärmeeintrags oder in Folge von Gasentwicklung durch die Abfalleinlagerung oder aufgrund tektonischer Ereignisse.
Wertebereich: $1 \% \leq W < 10 \%$ ($0,01 \leq p < 0,1$)
- Entwicklungen, die sehr wenig wahrscheinlich sind, werden der Klasse „unwahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet. Unwahrscheinliche Szenarien werden im Verfahren nicht weiter betrachtet. Beispiele für diese Klasse sind Vulkanismus, der aus den erdgeschichtlichen Standortgegebenheiten nicht ableitbar ist, oder der Einschlag eines großen Meteoriten. Solche Szenarien führen zu Situationen außerhalb der erwarteten Entwicklung des Endlagersystems und können die Konsequenzen der erwarteten Entwicklung deutlich überschreiten. Die Standortauswahl muss Sorge dafür tragen, dass derartige Szenarien, sofern sie standortbedingt sind, als ausreichend unwahrscheinlich eingestuft, d. h. nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden können.
Wertebereich: $0 \% \leq W < 1 \%$ ($0 \leq p < 0,01$)

Den beschriebenen Sachverhalt hinsichtlich der Abgrenzung von Szenarien (Kap. 3.1) und der Festlegung von Klassen für die Zuordnung von Szenarien nach Wahrscheinlichkeiten gibt die Abb. 3.1 wieder.

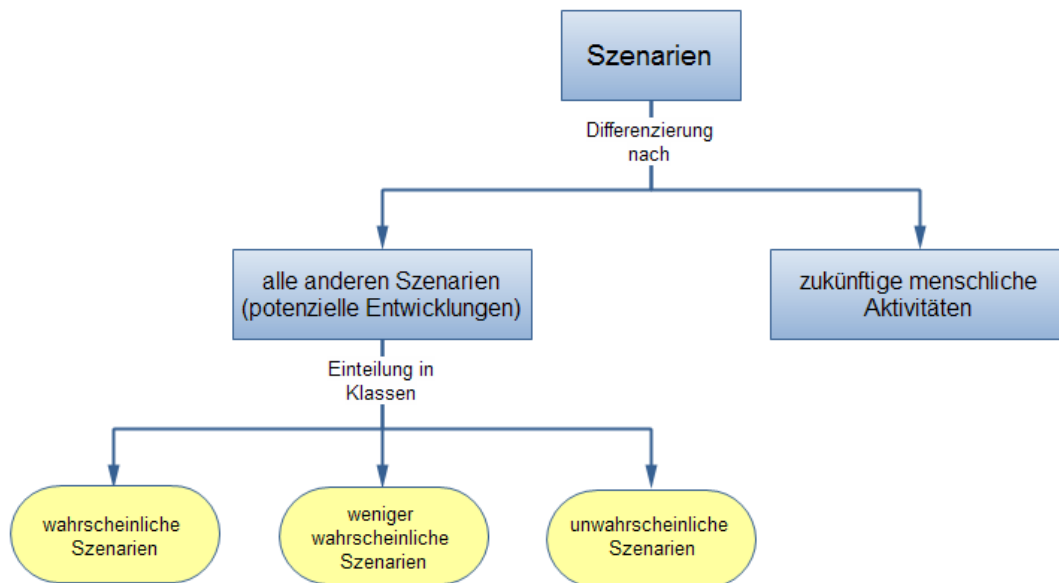


Abb. 3.1 Unterscheidung und Einstufung von Szenarien in Klassen

3.3 Methodik zur Einstufung in die Klassen

Zur Einstufung der Szenarien in die Szenarienklassen „wahrscheinliche Szenarien“, „weniger wahrscheinliche Szenarien“ und „unwahrscheinliche Szenarien“ werden diejenigen FEP herangezogen, die für den qualitativen Unterschied maßgeblich sind. Maßgeblich ist die Wahrscheinlichkeit des Eintretens und der Ausprägung dieser FEP. Zunächst werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten aller FEP, die ein Szenarium bestimmen, berücksichtigt. Das Eintreten eines FEP stellt die notwendige Bedingung für die anschließende Betrachtung der Ausprägung des entsprechenden FEP dar. Denn erst wenn das Eintreten eines FEP nicht unwahrscheinlich ist, macht es Sinn seine Ausprägung für die weitere Betrachtung der Wahrscheinlichkeitseinordnung einzubeziehen. Mit der Ausprägung wird die Wirkung, dass das jeweilige FEP ausübt oder die Intensität mit der es auftritt, beschrieben. Die Ausprägung kann hierbei qualitativ charakterisiert oder z. B. durch eine physikalische Größe mit Angabe eines quantitativen Wertes bzw. Wertebereichs ausgedrückt sein. Die FEP können im Prinzip verschiedene Ausprägungen aufweisen, die als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich eingeordnet werden können.

Es ergeben sich unter Einbeziehung der Merkmale Eintreten und Ausprägung die in Tab. 3.1 dargestellten Kombinationen von Wahrscheinlichkeiten für ein FEP und dessen Einordnung in eine Wahrscheinlichkeitsklasse.

Tab. 3.1 Darstellung der möglichen Kombinationen der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines FEP und seiner Ausprägung sowie der daraus resultierenden Einstufung des FEP in eine Wahrscheinlichkeitsklasse

| FEP | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|
| Eintreten | | | Ausprägung | | | Wahrscheinlichkeitsklasse | | |
| wahr-scheinlich | weniger wahr-scheinlich | unwahr-scheinlich | wahr-scheinlich | weniger wahr-scheinlich | unwahr-scheinlich | wahr-scheinlich | weniger wahr-scheinlich | unwahr-scheinlich |
| X | | | X | | | X | | |
| X | | | | X | | | X | |
| X | | | | | X | | | X |
| | X | | X | | | | X | |
| | X | | | X | | | | X |
| | X | | | | X | | | X |
| | | X | nicht zu betrachten | | | | | X |
| | | X | | nicht zu betrachten | | | | X |
| | | X | | | nicht zu betrachten | | | X |

zu berücksichtigen
 resultierende Wahrscheinlichkeitsklasse

Am Beispiel des FEP „glaziale Rinnenbildung“ soll die Verbindung zwischen bedingter Eintrittswahrscheinlichkeit und Wahrscheinlichkeit der Ausprägung erläutert werden:

Die Eintrittswahrscheinlichkeit des FEP „glaziale Rinnenbildung“ ist bedingt, da für das Eintreten eine vollständige Inlandvereisung in der Standortregion vorgelegen haben muss. Die Entstehungsmechanismen von glazialen Rinnen werden mit dem Rückzug von Gletschern als Folge der vollständigen Inlandvereisung in Verbindung gebracht. Die Ausprägung bezieht sich in diesem Fall auf die Abmessungen (Tiefe, Breite und Länge) und dem Verlauf der Rinne.

- Das FEP glaziale Rinnenbildung ist z. B. für die norddeutsche Standortregion über den Nachweiszeitraum wahrscheinlich.
 - Eine aus der Vergangenheit abgeleitete Bandbreite der Ausprägung ist ebenfalls wahrscheinlich.
 - Eine glaziale Rinnenbildung, die von der wahrscheinlichen Bandbreite der Ausprägung abweicht (mit Bezug auf die sicherheitstechnischen Auswirkungen, z. B. tiefere Rinne), ist als weniger wahrscheinlich einzuschätzen.
 - Eine Abweichung der Ausprägung, die nach wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht auftreten kann, ist unwahrscheinlich.
- Mit größerer Entfernung von der norddeutschen Region (in südlicher Richtung) ist eine glaziale Rinnenbildung nicht zu erwarten aber auch nicht ganz auszuschließen.

Wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit dann als weniger wahrscheinlich betrachtet wird.

- Eine glaziale Rinnenbildung, mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung ist jedoch nicht zu betrachten, da ein weniger wahrscheinliches Eintreten der glazialen Rinne und eine weniger wahrscheinliche Ausprägung als unwahrscheinlich erachtet werden.
- Bei einer noch weiteren Entfernung von der norddeutschen Region erscheint eine glaziale Rinnenbildung eher unwahrscheinlich. Eine Ausprägung braucht daher nicht weiter betrachtet werden.

Unter der Voraussetzung, dass die definierenden FEP eines Szenariums stochastisch voneinander unabhängig¹ sind, gilt die multiplikative Verknüpfung ihrer Einzelwahrscheinlichkeiten. Ein Beispiel für stochastisch unabhängige FEP sind Metallkorrosion und Diapirismus. Die Kombination der FEP Radionuklidmobilisierung und Versagen eines Brennelementbehälters stellen dagegen ein Beispiel für stochastisch abhängige FEP dar, da die Radionuklidmobilisierung erst dann einsetzt, wenn der Brennelementbehälter versagt.

Für die Einstufung eines Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse sind aufgrund eines anwendbaren Multiplikationsansatzes diejenigen FEP mit der geringsten Wahrscheinlichkeit wegweisend. Gleiches gilt für die Einordnung der FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen unter Einbeziehung der Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich Eintretens und Ausprägung eines FEP. In der Praxis ist es jedoch meist nicht möglich, für die FEP eine Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Wahrscheinlichkeit für die Ausprägung zu quantifizieren (z. B. für Ereignisse, die erst auf der Basis von nachfolgenden Analysen quantifiziert bzw. eingegrenzt werden können). Für die FEP werden daher analog zu den Szenarien (Kap. 3.2) Wahrscheinlichkeitsklassen definiert, die unter Einbeziehung qualitativer Merkmale (z. B. eintreten wird im Nachweiszeitraum erwartet) die gleiche Klassenbezeichnung („wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ und „unwahrscheinlich“) und die gleiche Wahrscheinlichkeitszuordnung für den Wertebereich erhalten.

¹ Treten z. B. zwei Ereignisse auf, dann sind sie stochastisch unabhängig, wenn sich die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses nicht ändert, wenn das andere eintritt bzw. nicht eintritt.

Das folgende Beispiel soll den o. g. Zusammenhang verdeutlichen:

Die definierenden FEP eines Szenariums seien stochastisch voneinander unabhängig und werden bis auf ein FEP nach heutigen Einschätzungen auch eintreten. Damit entspricht die Eintrittswahrscheinlichkeit (p_E) dieser FEP ($p_E = 1$). Das FEP, das die Ausnahme bildet, wird am Standort nicht erwartet kann jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden und hat demnach eine geringe Eintrittswahrscheinlichkeit die einem Wertebereich von ($0,01 \leq p_E < 0,1$) entspricht. Für alle FEP gilt, dass sie mit einer nicht von der Norm (Erwartung) abweichenden Ausprägung wirken, d. h. die Wahrscheinlichkeit für die Ausprägung (p_A) entspricht ($p_A = 1$). Die Gesamtwahrscheinlichkeit (p_G) ist bestimmt durch das Produkt aus den Einzelwahrscheinlichkeiten (Zuordnung zur Wahrscheinlichkeitsklasse) der definierenden FEP und beträgt in diesem Beispiel ($0,01 \leq p_G < 0,1$). Nach der Klasseneinteilung (Kap. 3.2) würde das Szenarium in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet.

Aus der Verknüpfung von Wahrscheinlichkeiten zwischen definierenden FEP und dem Szenarium sind folgende Zusammenhänge für die Zuordnung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen ableitbar:

- Das Szenarium wird der Klasse „unwahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet, wenn mindestens ein definierendes FEP in die Klasse „unwahrscheinlich“ eingestuft wird.
- Das Szenarium wird ebenfalls der Klasse „unwahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet, wenn mehr als ein definierendes FEP in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ eingestuft wird.
- Das Szenarium wird der Klasse „weniger wahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet, wenn ein definierendes FEP in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ eingestuft wird und kein anderes FEP der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen ist.
- Das Szenarium wird der Klasse „wahrscheinliche Szenarien“ zugeordnet, wenn ausnahmslos alle seine definierenden FEP „wahrscheinlich“ sind.

Der genannte Zusammenhang zwischen den Wahrscheinlichkeiten der definierenden FEP und der Zuordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse ist schematisch in Abb. 3.2 wiedergegeben.

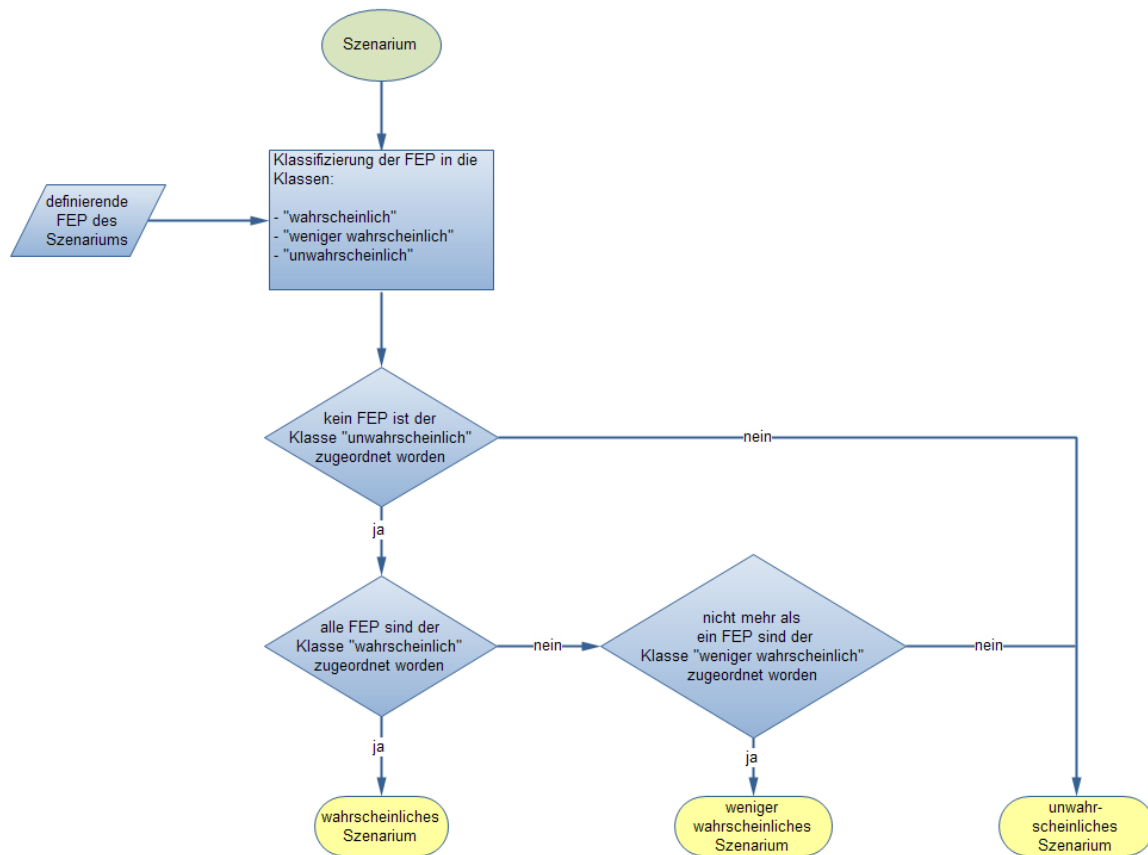


Abb. 3.2 Zuordnung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen nach Klassifizierung ihrer definierenden FEP

Im Rahmen der VSG ist ebenfalls eine Einordnung der entwickelten Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen über definierende FEP vorgenommen worden /BEU 12b/. Durch die darin zugrundeliegende Methodik der Szenarientwicklung und die im Rahmen des FEP Kataloges /WOL 12a/, /WOL 12b/ erfolgte Einschätzung der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit der FEP und teilweise auch schon der Ausprägung, ist eine Szenarientwicklung ermöglicht worden, die entweder nur Szenarien mit

- wahrscheinlichen FEP oder
- wahrscheinlichen FEP und einem weniger wahrscheinlichem FEP

ergeben. D. h., hierbei ergeben sich erst gar keine Kombinationen von FEP zwischen „wahrscheinlich“ und „weniger wahrscheinlich“ oder von Fällen, die ein FEP der Klasse „unwahrscheinlich“ beinhalten.

Für die hier vorgestellte Methodik lässt sich zur Einstufung von entwickelten Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen folgendes ausführen:

Bestimmend für die Einordnung eines Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse sind die am wenigsten wahrscheinlichen unter den das Szenarium definierenden FEP hinsichtlich ihres Eintretens und ihrer Ausprägung.

Aus dieser Ausführung lässt sich jedoch auch ableiten, dass die Nicht-Berücksichtigung von FEP die wesentlich für ein Szenarium sind, zu einer Fehleinschätzung des Szenariums hinsichtlich der Zuordnung in eine Wahrscheinlichkeitsklasse führen kann. Gleiches gilt, wenn FEP, die berücksichtigt werden, die jedoch unwesentlich für das Szenarium sind. Es kommt daher auf die genaue Zusammenstellung von FEP an, die ein bestimmtes Szenarium definieren. Aus sicherheitstechnischer Sicht ist jedoch der zweite Fall von größerer Bedeutung, da ein für das Szenarium irrelevantes FEP, das eine Zuordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“ erfährt, der alleinige Grund für einen Ausschluss des Szenariums sein kann und das Szenarium damit in der Langzeitsicherheitsanalyse nicht weiter betrachtet wird.

Aus sicherheitstechnischer Sicht ist im Zweifel das entsprechende FEP in die höhere Wahrscheinlichkeitsklasse (z. B. von „unwahrscheinlich“ nach „weniger wahrscheinlich“) einzuordnen. Darüber hinaus sind in solchen Fällen weitere Untersuchungen z. B. probabilistische Modellrechnungen auf der Basis von Bandbreiten der FEP-Ausprägungen anzustellen, die letztlich eine Zuordnung mit tolerierbaren Unsicherheiten zulässt.

3.4 Kriterien für die Zuordnung der FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen

In diesem Abschnitt werden Kriterien zur Einordnung der FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen beschrieben. Zunächst werden in Kap. 3.4.1 wie unter Kap. 3.3 beschrieben die FEP hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit behandelt. Hierbei wird unterschieden nach Merkmalen (Kap. 3.4.1.1) und Ereignissen/Prozessen (Kap. 3.4.1.2). Bei den Ereignissen/Prozessen wird wiederum unterschieden, ob deren Ursache auf abfall- und endlagerinduzierte Phänomene oder natürliche Phänomene zurückzuführen ist. Die Abb. 3.3 zeigt schematisch die genannten Unterscheidungen.

Anschließend werden in Kap. 3.4.2 diejenigen FEP, deren Eintrittswahrscheinlichkeit nicht als „unwahrscheinlich“ erachtet wurden, in Bezug auf die Wahrscheinlichkeit ihrer Ausprägung diskutiert.

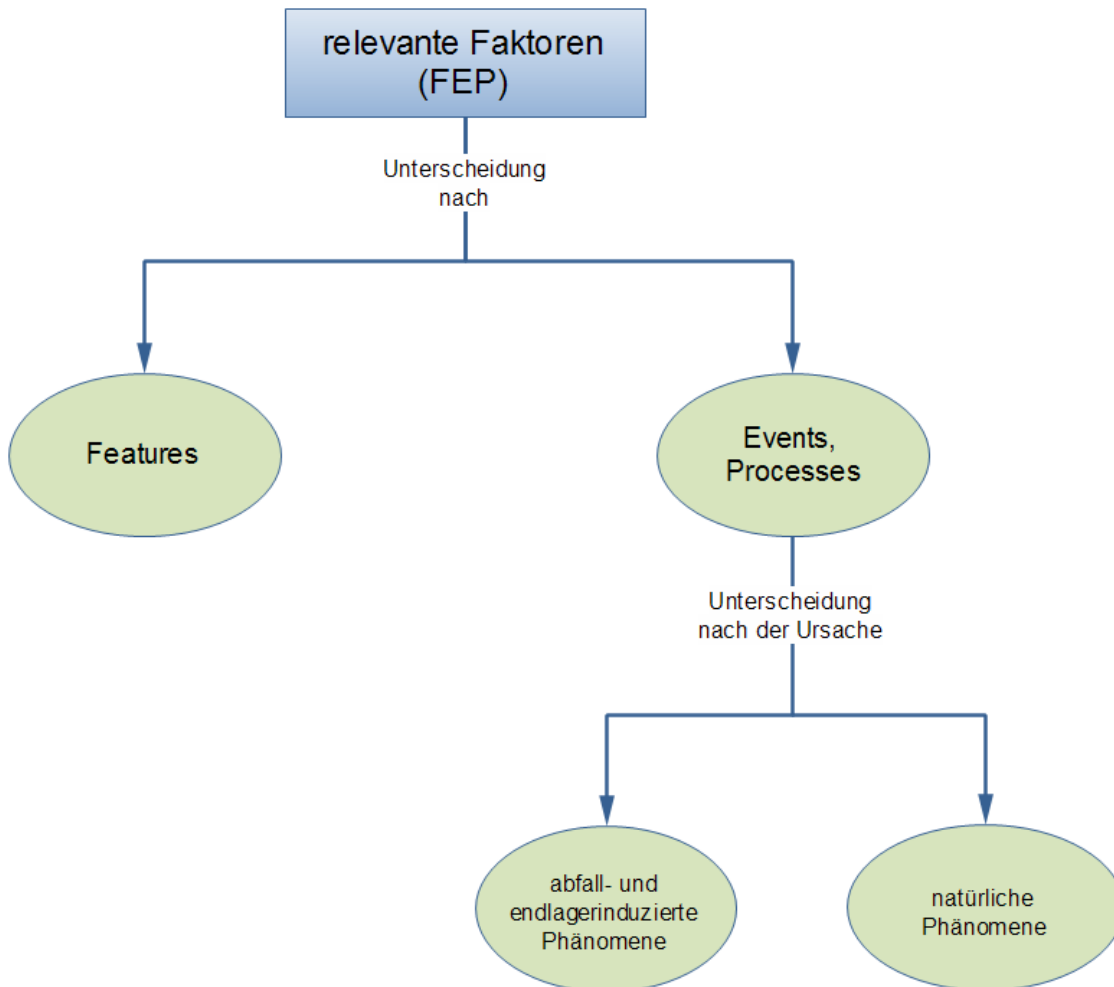


Abb. 3.3 Unterscheidungsmerkmale der FEP für die Klassifizierung

Für die Anwendung einiger der im Nachfolgenden aufgestellten Kriterien kann nicht auf unumstößliche Fakten zurückgegriffen werden, sondern es bestehen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeitseinstufung Unsicherheiten. Die Anwendung solcher Kriterien erfordert daher eine begründete Einschätzung z. B. durch Expertenbefragung. Hier werden Entscheidungen zu treffen sein, die eine subjektive Komponente in sich tragen. In Bezug auf die Entscheidungsfindung sind mögliche subjektive Einflüsse zu identifizieren und zu dokumentieren sowie ggf. auf Maßnahmen zu deren Reduzierung (z. B. Einschätzung erfolgt von mehreren unabhängigen Gruppierungen) hinzuweisen. Darüber hinaus sind mögliche Auswirkungen auf der Grundlage einer Fehleinschätzung zu diskutieren. D. h., dass die subjektiven Einflüsse dahingehend zu hinterfragen sind, in-

wieweit eine Fehleinschätzung sich auf das weitere Vorgehen bzw. auf das Ergebnis oder die Zielgröße auswirken kann.

3.4.1 Eintrittswahrscheinlichkeit

3.4.1.1 Einstufung von Merkmalen

Zur Einordnung der Merkmale (Features) wird folgende Vorgehensweise zugrunde gelegt:

- Liegt das Auftreten des betrachteten Features jenseits der Grenzen der praktischen Vernunft, ist es als unwahrscheinlich zu betrachten.
- Aus der Standortcharakterisierung und Systembeschreibung identifizierte bzw. abgeleitete Features (also „sichere“, „vorhandene“ oder „aufgefundene“ Features) sind der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
- Kann für das Vorliegen eines Features eine quantitative Eintrittswahrscheinlichkeit (W) abgeleitet werden so gelten folgende Zuordnungskriterien:
 - Liegt die abgeleitete Wahrscheinlichkeit im Bereich von $10\% \leq W \leq 100\%$, ist das Feature der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
 - Liegt die abgeleitete Wahrscheinlichkeit im Bereich von $1\% \leq W < 10\%$, ist das Feature der Klasse „weniger wahrscheinlich“ ansonsten der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen.
- Ist eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit nicht möglich, ist folgende Zuordnung durch Expertenurteil abzuleiten:
 - Liegt eine begründete Erwartung für das Auftreten des Features vor, so ist es der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
 - In dem Fall, in dem ein Feature am Standort zwar nicht erwartet wird, jedoch auch nicht ganz ausgeschlossen werden kann, so ist es als „weniger wahrscheinlich“ einzustufen.
 - Andernfalls ist das Feature der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen.

Das Merkmal einer unentdeckten Kluft, Inhomogenitäten im Wirtsgestein und anfänglich defekte Behälter stellen mögliche Beispiele dar, die nach der beschriebenen Vorgehensweise abzu prüfen sind, wenn sie ein entsprechendes Szenarium definieren.

Die Abb. 3.4 zeigt schematisch in einem Entscheidungsbaum die beschriebene Vorgehensweise zur Einordnung von Features in Wahrscheinlichkeitsklassen.

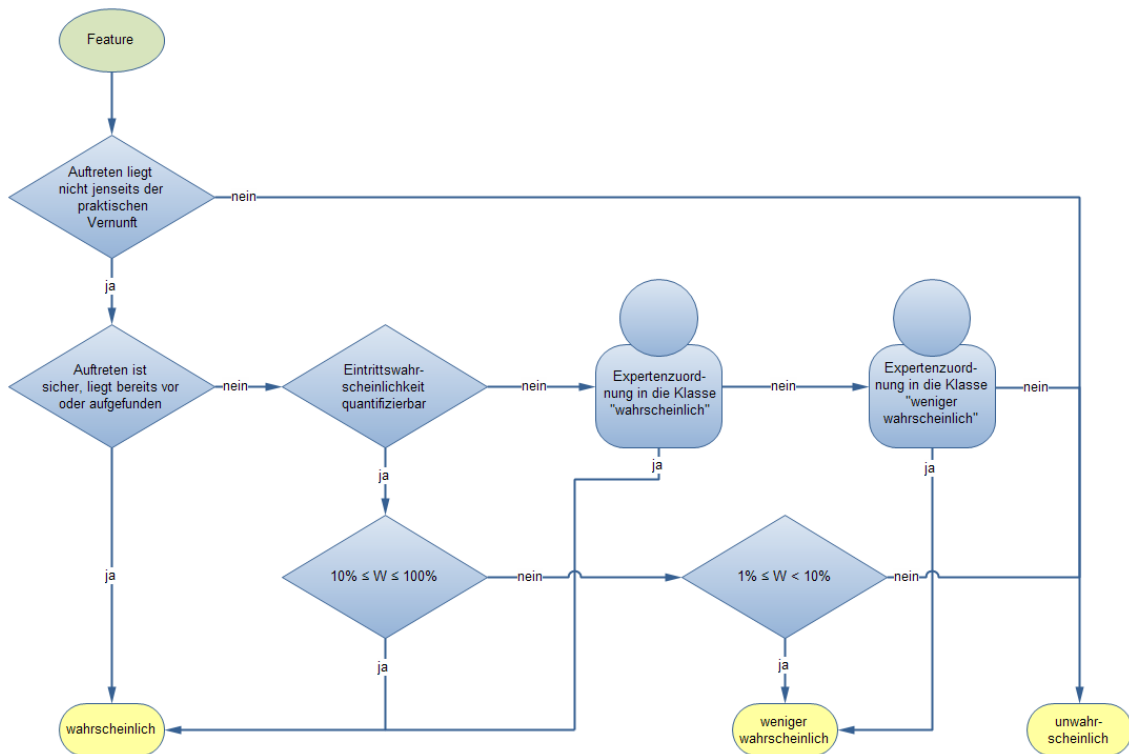


Abb. 3.4 Klassifizierungsschema des relevanten Faktors „Feature“ (Merkmal, Zustand)

Aus dem Klassifizierungsschema wird deutlich, dass im Prinzip auch Kriterien auf der Basis von qualitativen Einschätzungen also nicht durch Vergleich mit direkt vorliegenden Fakten oder Eigenschaften anzuwenden sind. Das ist zum einen das Eingangskriterium in dem abgefragt wird, ob das Auftreten eines bestimmten Features jenseits der praktischen Vernunft liegt, und zum anderen der Teil des Klassifizierungsschemas, in dem eine Zuordnung durch Experten erfolgt. D. h., die Zuordnung für diese Art von Kriterien ist nicht frei von subjektiven Einflüssen.

3.4.1.2 Einstufung von Events/Processes

Im Gegensatz zu den Features ist bei den Events/Processes eine Zuordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen ohne weitere Differenzierung nicht so einfach möglich. Der Grund hierfür liegt vor allem in den unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen und Zeitphasen zur Einschätzung des Auftretens im Nachweiszeitraum. Die hier eingebrachte zusätzliche Differenzierung bezieht sich auf die Quelle bzw. Ursache für das bestimmte Ereignis oder den Prozess. So erfolgt im Weiteren die Unterscheidung nach Events/Processes die auf abfall- und endlagerinduzierte Phänomene und natürliche Phänomene zurückzuführen sind.

Events/Processes ausgelöst durch abfall- und endlagerinduzierte Phänomene:

Im Folgenden wird das in Abb. 3.5 dargestellte Klassifizierungsschema für Events/Processes auf der Basis von abfall- und endlagerinduzierten Phänomenen beschrieben:

- Als erstes wird qualitativ abgefragt, ob das entsprechende Ereignis oder der Prozess plausibel und nachvollziehbar ist (z. B. Metallkorrosion). Wird das Ereignis/der Prozess als nicht plausibel und nicht nachvollziehbar eingeschätzt erfolgt eine Zuordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“.
- Wird das entsprechende Ereignis oder der Prozess für plausibel und nachvollziehbar erachtet, so ist zu hinterfragen, ob das Ereignis oder der Prozess sicher auftreten wird oder mit einer quantifizierbaren Eintrittswahrscheinlichkeit von $10\% \leq W \leq 100\%$ belegt werden kann oder bereits seit der Einlagerung aktiv ist (z. B. radioaktiver Zerfall, Wärmeentwicklung durch eingelagerte bestrahlte Brennelemente).
 - Wenn ja, dann ist das Ereignis oder der Prozess der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
 - Wenn nein, dann ist das folgende Kriterium abzufragen.

- Ist das Ereignis oder der Prozess nicht auszuschließen und/oder kann eine Eintrittswahrscheinlichkeit mit $1\% \leq W < 10\%$ quantifiziert werden.
 - So ist das Ereignis oder der Prozess der Klasse „weniger wahrscheinlich“ zuzuordnen.
 - Andernfalls ist das Ereignis oder der Prozess der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen.

Das Klassifizierungsschema ermöglicht bei den Abfragekriterien eine Entscheidung auf der Basis qualitativer Einschätzungen. Hierbei erfährt ggf. die Zuordnung des entsprechenden Ereignisses/Prozesses eine subjektive Komponente, die in der Dokumentation detailliert zu beschreiben ist.

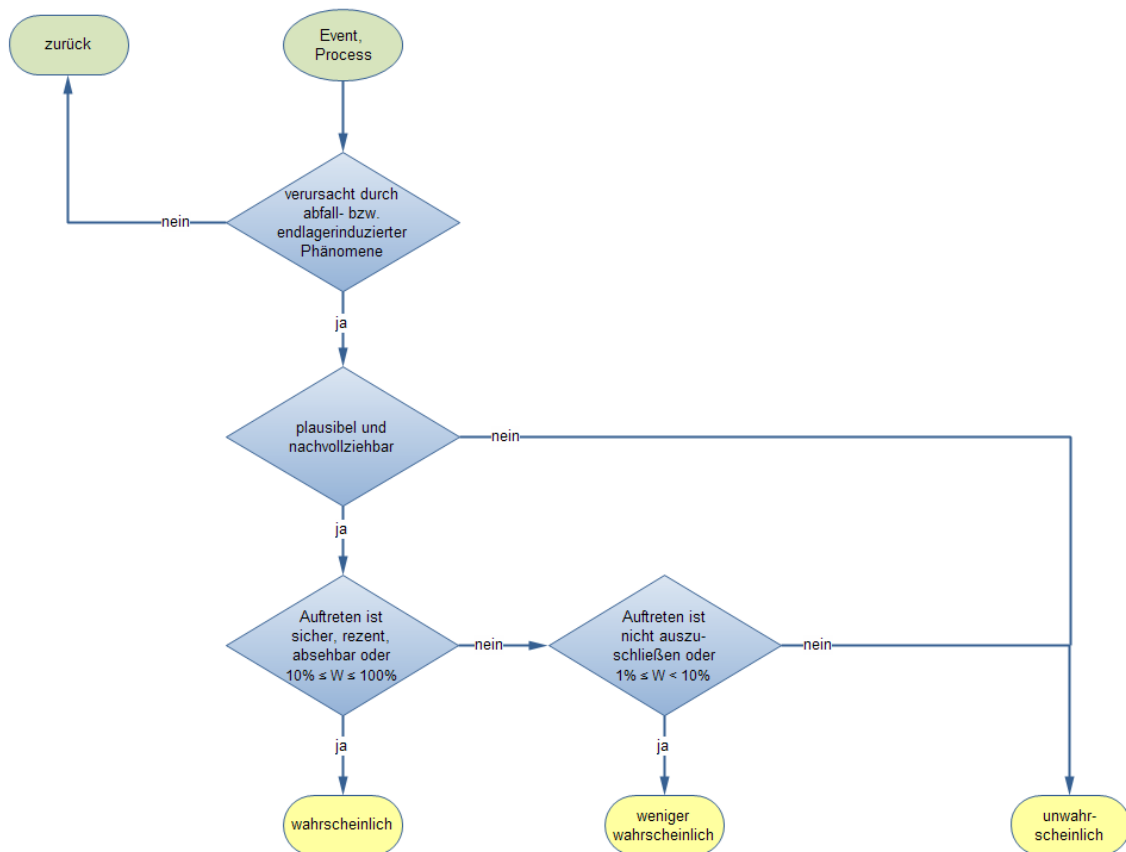


Abb. 3.5 Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei abfall- und endlagerinduzierten Phänomenen

Events/Processes ausgelöst durch natürliche Phänomene:

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Ereignisse und Prozesse, die einen natürlichen Ursprung haben. D. h. es werden natürliche Ereignisse/Prozesse mit überwiegend geologischen, klimatischen oder extraterrestrischen Ursachen betrachtet.

Nachfolgend werden die Entscheidungskriterien für eine Zuordnung von Events/Processes in Wahrscheinlichkeitsklassen aufgeführt:

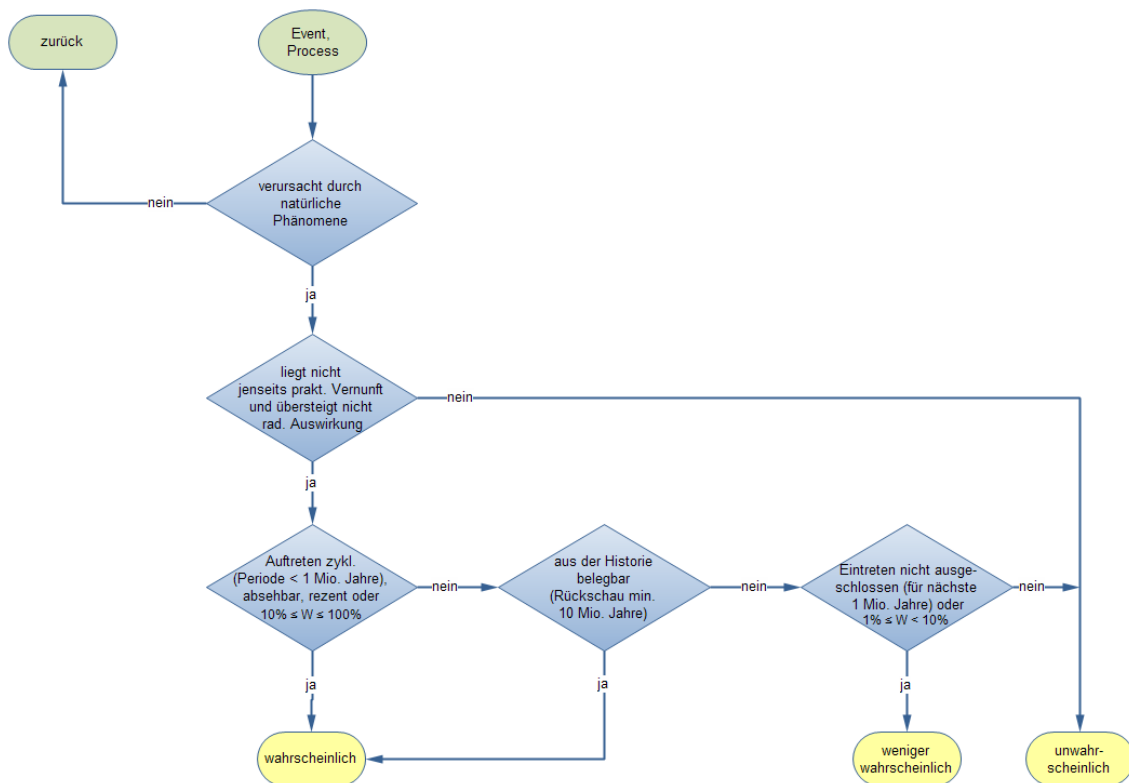
- Wenn das Eintreten des betrachteten Ereignisses/Prozesses jenseits der Grenzen der praktischen Vernunft liegt, erfolgt der Ausschluss aus dem weiteren Verfahren und wird damit der Klasse „unwahrscheinlich“ zugeordnet. Weiterhin sind jene Phänomene auszuschließen, deren primäre Auswirkungen die radiologischen Auswirkungen bei weitem übersteigen (z. B. Meteoriteneinschlag entsprechender Größe).

Zur Einordnung aller anderen Phänomene wird zunächst eine Beurteilung nach andauernden und/oder wiederkehrenden Events/Processes vorgenommen. Es sind die Entwicklungen und Ereignisse daraufhin zu untersuchen, ob sie im Nachweiszeitraum weiter andauern oder ob sie eine Wahrscheinlichkeit der Wiederholung aufweisen. Anhand der folgenden Vorgehensweise soll die Einordnung der Ereignisse/Prozesse vorgenommen werden:

- Wenn das Ereignis oder der Prozess rezent ist (z. B. Hebungs- und Senkungsprozesse) und/oder zyklisch auftritt sowie die nächste Periode im Nachweiszeitraum liegt (z. B. Kaltzeiten) oder mit einer quantifizierbaren Eintrittswahrscheinlichkeit von $10\% \leq W \leq 100\%$ belegt werden kann, erfolgt eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“.
- Wenn das Ereignis oder der Prozess keine derartigen rezenten und/oder zyklischen oder quantifizierbaren Charakterzüge zeigt, dann wird im Rahmen einer Untersuchung der historischen Entwicklung des Standortes, die mindestens 10 Mio. Jahre in die Vergangenheit zurückreichen soll, zu klären sein, ob das entsprechende Phänomen schon einmal aufgetreten ist (z. B. Vulkanismus).
 - Kann durch die Untersuchung der historischen Entwicklung belegt werden, dass das entsprechende Ereignis oder der Prozess am Standort eingetreten ist, dann erfolgt eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“.
 - Bei fehlenden Anzeichen aus der Vergangenheit ist folgendes Kriterium abzu prüfen.

- Ist trotz fehlendem Befund aus der Vergangenheit ein Eintritt des Ereignisses/ Prozesses in den nächsten 1 Mio. Jahren nicht auszuschließen und/oder kann eine Eintrittswahrscheinlichkeit mit $1\% \leq W < 10\%$ quantifiziert werden, dann erfolgt eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“. Ansonsten wird das Ereignis oder der Prozess der Klasse „unwahrscheinlich“ zugeordnet.

Die Abb. 3.6 zeigt schematisch in einem Entscheidungsbaum die beschriebene Vorgehensweise zur Einordnung von Events/Processes natürlichen Ursprungs in Wahr-



scheinlichkeitsklassen.

Abb. 3.6 Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei natürlichen Phänomenen

Es ist nicht auszuschließen, dass die Untersuchung der historischen Entwicklung des Standortes, die mindestens 10 Mio. Jahre in die Vergangenheit zurückreichen soll, gänzlich auf der Basis eindeutiger Fakten erfolgt sondern auch eine geologische Interpretation erfordert, die durch subjektive Einflüsse begleitet ist.

3.4.2 Wahrscheinlichkeit der Ausprägung

Im Gegensatz zur Eintrittswahrscheinlichkeit eines FEP ist die Angabe der Wahrscheinlichkeit hinsichtlich seiner Ausprägung ungleich schwieriger. Zunächst sind gemäß Kap. 3.3 nur diejenigen Ausprägungen von FEP zu betrachten, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht als „unwahrscheinlich“ eingestuft wurden. Für FEP mit wahrscheinlichem Eintreten ist zu hinterfragen ob die zugrundeliegenden Ausprägungen „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ sind. Für FEP deren Eintreten „weniger wahrscheinlich“ sind, ist nur zu prüfen, ob die entsprechende Ausprägung „wahrscheinlich“ ist. Ansonsten erfährt das FEP eine Einordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“.

Die Schwierigkeit liegt nun darin, für die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer Ausprägung über den zugrundeliegenden Nachweiszeitraum, einen geeigneten Maßstab zu finden.

Für einige FEP erscheint die Ableitung eines Beurteilungsmaßstabs möglich zu sein, wie z. B. für das FEP Diapirismus und Subrosion, wobei die möglichen Aufstiegsraten bzw. Subrosionsraten aus einer entsprechenden geologischen Befundlage ermittelt werden könnten. Ein derartiger abgeleiteter Wert oder Wertebereich stellt dann den Maßstab für die wahrscheinliche Ausprägung dar. D. h., die vorgegebene Ausprägung des entsprechenden FEP kann im Idealfall durch den Vergleich mit einem Wert oder einer abgeleiteten wahrscheinlichen Bandbreite geprüft werden. Liegt die vorgegebene Ausprägung innerhalb des Wertebereiches oder weicht im tolerierbaren Rahmen von einem abgeleiteten Wert ab, so ist diese Ausprägung als „wahrscheinlich“ einzuordnen. Bei negativem Befund ist zu hinterfragen, ob die Abweichung der Ausprägung als „weniger wahrscheinlich“ oder „unwahrscheinlich“ einzustufen ist. Im Zweifel ist die nächsthöhere Klasse zu wählen. In diesem Fall würde dann die Einordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ erfolgen.

Einige FEP lassen sich hinsichtlich ihrer Ausprägung nur schwer bzw. nicht in eine Wahrscheinlichkeit einordnen. In solchen Fällen ist entweder ein repräsentativer Vergleichswert oder eine übertragbare qualitative Vergleichsbasis abzuleiten, die eine Wahrscheinlichkeitseinordnung der Ausprägung erlaubt. Manche Ausprägungen ergeben sich wiederum erst aus der jeweils betrachteten Systementwicklung. Hierbei können möglicherweise nur die Ergebnisse aus nachgeschalteten Integritäts- und/oder

Konsequenzenanalysen weiterhelfen. D. h., es wird rückwirkend aus den Analysen auf die Wahrscheinlichkeit der Ausprägung geschlossen.

Bei der Ableitung von Vergleichsmaßstäben und der Beurteilung, insbesondere bei einer qualitativen Charakterisierung der Ausprägung, hinsichtlich der Einordnung zu einer Wahrscheinlichkeit sind fachkundige Expertenmeinungen einzuholen. Hierdurch sind bei der Einschätzung der Wahrscheinlichkeiten zu den Ausprägungen subjektive Einflüsse unvermeidbar.

3.5 Bündelung von Szenarien und repräsentatives Szenarium

Das Endlagersystem durchläuft in der Realität nur genau eine Entwicklung. Diese eine Entwicklung lässt sich nicht mit der gebotenen Genauigkeit voraussagen. Die Szenarientwicklung beschreibt daher die potenziellen Entwicklungen, die ein Endlagersystem je nach Kombination seiner relevanten Faktoren, welche das Endlagersystem charakterisieren oder beeinflussen, durchlaufen kann. Die Anzahl dieser potenziellen Entwicklungen ist im Prinzip unbeschränkt. Aufgrund beschränkter Ressourcen und terminlichen Vorgaben, wird man sich in der Praxis auf eine bestimmte Anzahl von Szenarien verständigen, die der Konsequenzenanalyse zuzuführen sind. Aus diesem Grund ist in der Szenarientwicklung die Zusammenfassung von Szenarien mit ähnlichen Entwicklungsabläufen zu Gruppen vorgesehen. Zur Bewertung der Langzeitsicherheit werden ausgewählte Szenarien herangezogen, die repräsentativ sind für eine Gruppe von potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems. Es ist dabei sicherzustellen, dass die repräsentativen Szenarien die Szenarien in der entsprechenden Gruppe, hinsichtlich der zu erwartenden sicherheitstechnischen Auswirkungen abdecken.

Für die Bündelung bzw. Gruppierung von Szenarien wird gefordert, dass die damit verbundenen Entwicklungen einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Eine weitere Forderung ist die, dass die Szenarien einer Gruppe der gleichen Wahrscheinlichkeitsklasse zugeordnet wurden. Eine Vermischung von Szenarien mit unterschiedlicher Zuordnung in die Wahrscheinlichkeitsklasse ist nicht zulässig.

4 **Anwendungsbeispiel zur Klassifizierung von Szenarien**

Im Folgenden wird anhand eines Beispiels die Klassifizierung eines Szenariums entlang der beschriebenen Methodik in Kap. 3 durchgeführt und diskutiert:

4.1 **Beschreibung des Szenariums**

Radionuklidtransport durch das Endlagersystem über eine unentdeckte Kluft.

Die Beschreibung des Szenariums (S_1) genügt im Prinzip der gegebenen Definition nach /BAL 07/:

„Ein Szenarium beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen.“

Die postulierte Entwicklung ist in S_1 der Radionuklidtransport im Endlagersystem durch eine unentdeckte Kluft. Diese Entwicklung ist definiert durch die Kombination der relevanten Faktoren „unentdeckte Kluft“ und „Radionuklidtransport“. Eine solche Entwicklung könnte die Sicherheitsfunktion „Radionuklidrückhaltung“ des Endlagersystems beeinflussen.

Relevante Faktoren (FEP) aus der GRS FEP-Datenbasis /BEU 10/, die einen Bezug zu dem Szenarium S_1 haben, sind im Folgenden aufgeführt:

- Merkmal „unentdeckte Kluft“:
 - 2_4_5 Informations- und Wissensverlust,
 - 2_5_1 Undetektierte Merkmale,
 - 2_5_2 Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen,

- Prozess „Radionuklidtransport“:
 - 1_6_4 Gasinduzierter Transport,
 - 1_6_6 Mehrphasenfluss,
 - 1_7_3 Radionuklidtransport,
 - 1_7_8 kolloidaler Radionuklidtransport.

4.2 Voraussetzungen

Das Szenarium S_1 ist durch eine Vielzahl von alternativen Entstehungs- und Ablaufvorgängen konstruierbar. Zudem beinhaltet es zwei Voraussetzungen:

- Es findet ein „Radionuklidtransport“ statt.
- Es liegt eine „unentdeckte Kluft“ vor, in der der Radionuklidtransport erfolgt.

Ohne Kombination dieser Voraussetzungen („UND Verknüpfung“) wäre das Szenarium nicht zu berücksichtigen. Im Gegensatz zur unentdeckten Kluft wird in dem Szenarium keine Auskunft darüber gegeben, warum von einem Radionuklidtransport ausgegangen wird. Darüber hinaus erfolgt bei beiden Voraussetzungen keine Beschreibung zu den Prozessen und Mechanismen die zu diesem Zustand geführt haben. D. h., bevor dieses Szenarium zu diskutieren bzw. zu analysieren ist muss geklärt werden, welche Umstände zu den beiden genannten Voraussetzungen führen. Für das betrachtete Anwendungsbeispiel wird darauf verzichtet, da hier die Methodik für die Einteilung von Szenarien in Klassen illustriert werden soll.

4.3 Transportbedingungen

Zur Initiierung bzw. Aufrechterhaltung eines Stofftransportes müssen folgende Bedingungen vorliegen /BEU 10/:

- Transportpfad (Kluft, Riss, hydraulisch wirksame Diskontinuität, zusammenhängende Porenräume usw.),
- Transportmedium (z. B. Flüssigkeit, Gas, Kolloid),
- Transportierbarer Stoff (z. B. Radionuklid) und
- Gradient (Druckdifferenz, Temperaturgefälle, Konzentrationsgefälle usw.).

Definierende FEP eines Szenariums, die auf den Stofftransport ausgerichtet sind, müssen auf die o. g. Transportbedingungen abgefragt werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Bedingungen kurz beschrieben:

Transportpfad:

Hauptmerkmal des Szenariums S_1 ist eine unentdeckte Kluft. Die Entstehungsmechanismen für eine Kluft können vielfältig sein, wie z. B. aufgrund vergangener seismischer Aktivität am Standort, Setzungs- oder Hebungsvorgänge, anderweitigen Spannungsumlagerungen, anthropogenen Ursprungs durch Bergbau, Aktivitäten bei der Standortuntersuchung oder Exploration des Standortes.

Die Kluft weist wiederum Eigenschaftsmerkmale auf, die für einen Transport von Radionukliden jedoch auch für die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Kluft maßgebend sein können. Zu nennen sind hier die hydraulische Wirksamkeit der Kluft, die Abmessungen, der Verlauf sowie Anfangs- und Endpunkt und der Abstand zu den Einlagerungsbereichen.

Auch das "Übersehen" einer bestehenden Kluft kann mehrere Ursachen haben, wie die Fehlinterpretation von Untersuchungsergebnissen, Informationsverlust, unberücksichtigte Messergebnisse bei der Standortcharakterisierung, der Einsatz von nicht geeigneten Verfahren, die Region in der sich die Kluft befindet wurde nicht untersucht, Fehlfunktionen von Messgeräten und zu geringes Auflösungsvermögen des Messverfahrens. Hier ist anzumerken, dass die Identifizierung einer Kluft wie bereits oben ausgeführt von den Eigenschaftsmerkmalen der Kluft und den Standortgegebenheiten abhängt.

Transportierbarer Stoff:

Für den Radionuklidtransport müssen die Radionuklide transportierbar sein, z. B. in flüchtiger, gelöster oder suspendierter Form, d. h. außerhalb ihrer ursprünglichen eingebundenen Umgebung (Behälter, Matrix, Einlagerungsstrecke, Einlagerungsbohrloch). Das wiederum impliziert eine Reihe von Prozessen, die zu einer solchen Voraussetzung führen.

Transportmedium:

Weiterhin ist für den Transport gelöster oder kolloidaler Radionuklide ein sog. Transportmedium essenziell. So könnten Radionuklide z. B. in gelöster Form im Medium Wasser bzw. Lösung vorliegen oder an Feststoffpartikeln haften, die mit dem Medium Wasser bzw. Lösung transportiert werden.

Bei flüchtigen Radionukliden, ist der transportierbare Stoff gleichzeitig Transportmedium.

Gradient:

Weiterhin ist für den Transport ein Antriebsmechanismus notwendig. Die Bewegungsrichtung erfolgt vom höheren zum niedrigeren Niveau. Solche Antriebsmechanismen oder auch Gradienten sind z. B. durch den vorliegenden natürlichen Temperaturgradienten (Konvektion) und Druckgradienten (Advektion) oder durch Konzentrationsunterschiede (Diffusion) gegeben.

4.4 Varianten

Hinsichtlich des Szenariums S_1 , lassen sich wie bereits oben ausgeführt eine Reihe von Varianten konstruieren. Nachfolgend sind einige Beispiele aufgeführt:

Die Radionuklide liegen in gelöster Form (Variante: frei „radioaktives Gas“, suspendiert Feststoff im Medium „Schwebeteilchen“, anhaftend an Kolloid) im Transportmedium Wasser vor und werden durch eine unentdeckte hydraulisch wirksame Kluft transportiert. Der Verlauf der Kluft reicht vom Einlagerungsbereich (Varianten: Streckenlagerungsfeld, Bohrlochlagerungsfeld) durch das Wirtsgestein bis zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Varianten: Infrastrukturbereich, Schacht).

Neben den Varianten sind wiederum eine Reihe von Eigenschaften hinsichtlich des Transportes und der Kluft zu parametrisieren. Zu nennen sind hier beispielhaft der Zeitpunkt des einsetzenden Radionuklidtransportes, der Druckgradient, der Temperaturgradient, die hydraulische Leitfähigkeit der Kluft und der Querschnitt der Kluft.

Es ist daher zwischen Varianten von Szenarien und Parametervariationen zu unterscheiden. Darüber hinaus ist zu klären, ob ein gleichlautendes Szenarium wirklich eine

Variante zum betrachteten Szenarium darstellt oder sich eher in eine andere Gruppe von Szenarien einordnen lässt. So ist es durchaus vorstellbar, dass die hier betrachtete Entwicklung, z. B. in Abhängigkeit des Verlaufes oder Ausprägung der unentdeckten Kluft, als wahrscheinliches, weniger wahrscheinliches oder unwahrscheinliches Szenarium eingeordnet werden kann.

4.5 Wahrscheinlichkeitseinteilung der FEP und des Szenariums

Weitere Szenarien könnten hier mit den oben beschriebenen Varianten belegt werden. In diesem Beispiel wird jedoch nur das Szenarium S_1 betrachtet. Die Menge an FEP besteht für das Szenarium S_1 aus einem Merkmal $F_{1,1}$ und einem Prozess $P_{1,1}$.

- $F_{1,1}$ beinhaltet die unentdeckte Kluft
- $P_{1,1}$ beinhaltet den Radionuklidtransport

Nach Anwendung des Entscheidungsbaumes (siehe Abb. 3.4) für das Merkmal $F_{1,1}$ ergeben sich folgende Einteilungsklassen für das Szenarium S_1 :

Für das Merkmal $F_{1,1}$ „unentdeckte Kluft“ ist die Einschätzung die, dass ein solches Merkmal (Vorliegen, Auftreten) nicht jenseits der praktischen Vernunft liegt. Insbesondere eine Fehlinterpretation von Untersuchungsergebnissen, Fehlfunktionen von Messgeräten und ein zu geringes Auflösungsvermögen des Messverfahrens in bestimmten vorliegenden Situationen scheinen nicht abwegig zu sein. Erschwerende geologische Verhältnisse für eine Messung, zunehmender Abstand vom Einlagerungsbereich, ungünstige Ausrichtung sowie geringer Querschnitt der Kluft sind zusätzliche Umstände, die diese Einschätzung stützen. Jedoch ist die zweite Abfrage im Entscheidungsbaum mit „nein“ zu beantworten, da ein solches Merkmal nicht sicher auftritt.

Die nächste Abfrage, die sich auf eine mögliche Quantifizierbarkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit abstützt ist ebenfalls zu verneinen. Es bleibt daher die Einschätzung der Experten, ob das Merkmal der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen ist. An dieser Stelle soll die Zuordnung nicht präjudiziert werden. Jedoch scheint aufgrund der mit der Standortcharakterisierung verbundenen hohen Qualitätssicherung und Prüfmechanismen das Merkmal „unentdeckte Kluft“ als nicht „wahrscheinlich“. Die Experten haben nun zu entscheiden ob das Feature der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen ist oder das Attribut „weniger wahrscheinlich“ erhält. Hierbei wird die Zuordnung durch eine

Expertenentscheidung u. a. auch zu berücksichtigen haben, unter welchen Bedingungen eine Detektierung von Klüften mit einer hohen bzw. niedrigen Wahrscheinlichkeit gegeben ist. Neben den möglichen Eigenschaften der Kluft spielt hier vor allem das zugrundeliegende Endlagerkonzept, die geologische Situation am Standort und der Stand der Technik hinsichtlich Einsatz und Leistungsvermögen von Messmethoden eine wesentliche Rolle.

Weitere Indikatoren für eine Einschätzung der Experten könnten sein:

- Häufigkeit von bekannten Klüften in vergleichbaren Formationen und am Standort,
- Ausprägung und Eigenschaften identifizierter Klüfte,
 - bevorzugte Verlaufsrichtung,
 - Querschnitte, Länge und
 - Wasser führend.

Für dieses Beispiel erhält das Feature hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“. Ansonsten wäre das Feature in die Klasse „unwahrscheinlich“ eingeordnet worden, womit auch die Zuordnung für das Szenarium S_1 bestimmt ist. Das nächste FEP „Radionuklidtransport“ hätte damit auch nicht mehr klassifiziert werden müssen.

Damit sollten die Ausprägungen der Kluft keine Dimensionen einnehmen, die eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ oder „unwahrscheinlich“ ergeben. Ansonsten würde das FEP bzw. Merkmal $F_{1,1}$ aufgrund der „weniger wahrscheinlichen“ Eintrittswahrscheinlichkeit insgesamt in die Klasse „unwahrscheinlich“ eingestuft. Somit würde dann auch das Szenarium in diese Klasse eingeordnet. Demnach sollten für die Kluft Abmessungen und ein Verlauf zugrunde liegen, die eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ ergeben. D. h., die Abmessungen und der Verlauf sollten keine Dimensionen annehmen, die z. B. mit Sicherheit detektiert würden. Unter Einbeziehung einer „weniger wahrscheinlichen“ Eintrittswahrscheinlichkeit und einer „wahrscheinlichen“ Ausprägung wird das FEP in die Wahrscheinlichkeitsklasse „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet.

Der Prozess $P_{1,1}$ „Radionuklidtransport“ ist als „wahrscheinlich“ einzustufen, wenn die o. g. Transportbedingungen (Kap. 4.3) erfüllt sind. Der Radionuklidtransport ist eine

Voraussetzung für den Ablauf des Szenariums S_1 . Daher wird in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass die Transportbedingungen gegeben sind, ansonsten ist der Radionuklidtransport unwahrscheinlich und somit auch das Szenarium in die Klasse „unwahrscheinlich“ einzuordnen.

Für den Radionuklidtransport ist ebenfalls von einer Ausprägung auszugehen, die eine Einordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ ergibt. Jede andere Klasseneinordnung für die Ausprägung des FEP Radionuklidtransport führt dann letztendlich aufgrund des „weniger wahrscheinlichen“ FEP „unentdeckte Kluft“ zu einer Einordnung des Szenariums in die Wahrscheinlichkeitsklasse „unwahrscheinlich“. Eine Angabe für die Ausprägung (z. B. Transportrate) des Radionuklidtransportes wird vermutlich schwierig bzw. nicht möglich sein, da eine Reihe weiterer Parameter vorliegen müssen. Hier werden entsprechende nachgeschaltete Analysen Aufschluss über die mögliche Ausprägung geben.

Diejenigen FEP, aus der Menge der definierenden FEP für das Szenarium S_1 , mit der geringsten Wahrscheinlichkeit sind bestimmend für die Einordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse. Für das Szenarium S_1 ist nach obigen Ausführungen das Merkmal $F_{1,1}$ ausschlaggebend. Demnach wird das Szenarium S_1 in diesem Beispiel der Klasse „weniger wahrscheinlich“ zugeordnet.

4.6 Gruppierung und Bündelung

Die oben beschriebenen Varianten des Szenariums S_1 weisen ähnlich ablaufende Entwicklungen auf und sind der Klasse „weniger wahrscheinliche Szenarien“ zuzuordnen. Demnach dürfen die Szenarien zu einer Szenariengruppe zusammengefasst und durch ein repräsentatives Szenarium abgebildet werden. Das repräsentative Szenarium muss allerdings die Voraussetzung erfüllen, dass die Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems abdeckend für die Gruppe sind.

5 Zusammenfassung

Der hier vorliegende Bericht ist im Rahmen des Vorhabens 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“ erstellt worden. Der Bericht befasst sich mit der Beschreibung und Anwendung einer Methodik zur Einstufung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen, die orientierend auf einen bestehenden Ansatz der GRS aufbaut /BAL 04/.

Voraussetzung für die Anwendung der Methodik ist, dass im Rahmen der Szenarientwicklung die einzuordnenden Szenarien und deren definierenden FEP vorliegen. Die Methodik berücksichtigt dabei alle potenziellen Szenarien außer denen, die sich auf menschliche Aktivitäten, z. B. das menschliche Eindringen in das Endlagersystem, beziehen.

Der grundlegende Ansatz der Methodik ist der, dass für die potenziellen Szenarien und für FEP Wahrscheinlichkeitsklassen festgelegt werden. Die Szenarien und FEP haben dabei die gleichen Klassenbezeichnungen „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ und „unwahrscheinlich“. Die Zuordnung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen erfolgt im Prinzip durch die Zuordnung seiner definierenden FEP in adäquate Klassen. Hierbei ist für die Zuordnung eines Szenariums die Wahrscheinlichkeit der am wenigsten wahrscheinlichen unter den das Szenarium definierenden FEP bestimmend.

Bei der Zuordnung der definierenden FEP eines Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse sind die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten des FEP und seiner Ausprägung zu berücksichtigen.

Für die Ableitung von Eintrittswahrscheinlichkeiten der FEP sind Entscheidungskriterien entwickelt worden. Es wird hierbei zwischen den relevanten Faktoren „Features“ und „Events/Processes“ unterschieden. Eine weitere Differenzierung erfahren die relevanten Faktoren „Events/Processes“ nach deren Ursache. So wird zwischen „Events/Processes“ unterschieden die auf abfall- und endlagerinduzierte Phänomene und natürliche Phänomene zurückzuführen sind.

Neben den Entscheidungskriterien für die Eintrittswahrscheinlichkeiten sind die Möglichkeiten für die Einordnung der Ausprägungen der FEP in Wahrscheinlichkeiten erläutert worden.

Darüber hinaus wird auch auf die Gruppierung bzw. Bündelung von Szenarien mit ähnlichen Entwicklungsabläufen und der Ableitung eines repräsentativen Szenariums einer Gruppe eingegangen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Berichtes bezieht sich auf die Beschreibung der Anwendung der Methodik auf das bestimmte Szenarium „Radionuklidtransport durch eine unentdeckte Kluft“. Ausgehend von diesem Szenarium und seiner definierenden FEP erfolgt die Zuordnung über die Entscheidungsbäume bzw. Entscheidungskriterien der FEP in eine Wahrscheinlichkeitsklasse.

Begleitend zu jedem Schritt bzw. Entscheidungskriterium werden in der Beschreibung zur Methodik und seiner Anwendung auf mögliche subjektive Einflüsse, bei der Entscheidungsfindung für eine Zuordnung des Szenariums in eine Wahrscheinlichkeitsklasse, hingewiesen.

Literaturverzeichnis

- /BAL 04/ Baltes, B.: Sicherheitstechnische Leitlinie für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in der Nachbetriebsphase (Leitlinie Langzeitsicherheit), Entwurf. unveröffentlicht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 31.03.2004.
- /BAL 07/ Baltes, B., Röhlig, K.J., Kindt, A.: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen - Entwurf der GRS-, Vorhaben SR 2532. GRS-A-3358, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Januar 2007.
- /BEU 12a/ Beuth, T., Baltes, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübél, A., Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, ISBN: 978-3-939355-56-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BEU 12b/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BEU 10/ Beuth, T., Bracke, G.: VerSi, Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02580 „Szenarienentwicklung“. GRS-A-3525, GRS.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.

/ESK 12/ Entsorgungskommission (ESK): Empfehlung der Entsorgungskommission; Leitlinie zur Einordnung von Entwicklungen in Wahrscheinlichkeitsklassen; Revidierte Fassung vom 13.11.2012 nach Verabschiedung durch die ESK im Umlaufverfahren (diese Fassung ersetzt die Fassung vom 21.06.2012). Bonn, 13.11.2012.

/WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

/WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----|
| Abb. 3.1 | Unterscheidung und Einstufung von Szenarien in Klassen | 9 |
| Abb. 3.2 | Zuordnung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen nach Klassifizierung ihrer definierenden FEP | 13 |
| Abb. 3.3 | Unterscheidungsmerkmale der FEP für die Klassifizierung | 15 |
| Abb. 3.4 | Klassifizierungsschema des relevanten Faktors „Feature“ (Merkmal, Zustand) | 17 |
| Abb. 3.5 | Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei abfall- und endlagerinduzierten Phänomenen | 19 |
| Abb. 3.6 | Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei natürlichen Phänomenen | 21 |

Tabellenverzeichnis

- Tab. 3.1 Darstellung der möglichen Kombinationen der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten eines FEP und seiner Ausprägung sowie der daraus resultierenden Einstufung des FEP in eine Wahrscheinlichkeitsklasse 10

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

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

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de