

## **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.*

#### Inhalt

1	Einleitung und regulatorische Vorgaben.....	2
1.1	Einleitung.....	2
1.2	Entwicklungen und Szenarien.....	2
2	Vorgehensweise bei der Klassifizierung von Entwicklungen und Szenarien .....	2
2.1	Rahmenbedingungen.....	2
2.2	Vorgehensweise .....	3
2.2.1	Prämissen .....	3
2.2.2	Wahrscheinlichkeitsklassifizierung der FEP.....	4
2.2.2.1	Wahrscheinlichkeitsklassifizierung von Eigenschaften/Merkmalen.....	5
2.2.2.2	Wahrscheinlichkeitsklassifizierung von Ereignissen und Prozessen .....	6
2.2.3	Klassifizierung von Entwicklungen und Szenarien .....	10
3	Literatur.....	12

## **1 Einleitung und regulatorische Vorgaben**

### **1.1 Einleitung**

In den „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ (Stand 30. 09. 2010) [1] sind in Kapitel 6 „Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen“ für den Nachweis der Sicherheit in der Nachverschlussphase Bewertungskriterien für den Indikator Dosis niedergelegt. Ausgehend von der Ungewissheit bezüglich der Entwicklung des Endlagersystems nach Verschluss werden die potenziellen Systementwicklungen in die Klassen wahrscheinliche, weniger wahrscheinliche und unwahrscheinliche Entwicklungen eingeordnet. Weiterhin wird in Kapitel 7.2.2 „Radiologische Langzeitaussage“ gefordert, dass für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen nachzuweisen ist, dass die in den Kapiteln 6.2 und 6.3 aufgeführten Kriterien eingehalten werden.

### **1.2 Entwicklungen und Szenarien**

Durch die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ des BMU [1] werden sowohl zum Verständnis des Begriffs Szenarium wie auch hinsichtlich der Klassifizierung von Entwicklungen auf Grundlage ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit Vorgaben gemacht. Die Begriffe Szenarium und Entwicklung werden in den Sicherheitsanforderungen weitgehend synonym verwendet. Innerhalb dieser Leitlinie wird zwischen beiden Begriffen folgendermaßen unterschieden:

Potenzielle Entwicklungen des Endlagersystems werden durch die Ausgangssituation sowie durch das Zusammenwirken von Eigenschaften/Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (nach den englischen Begriffen *features, events and processes* zusammenfassend als FEP bezeichnet) in jeweils festgelegten Ausprägungen eindeutig charakterisiert. Eine solche Entwicklung stellt entweder bereits für sich genommen ein Szenarium dar oder es werden, falls für die Sicherheitsanalyse zweckmäßig, mehrere potenzielle Entwicklungen zu einem Szenarium zusammengefasst. Aus bestimmten Szenarien werden dann Rechenfälle für die Konsequenzenanalyse abgeleitet.

## **2 Vorgehensweise bei der Klassifizierung von Entwicklungen und Szenarien**

### **2.1 Rahmenbedingungen**

In [1] werden die Entwicklungen Wahrscheinlichkeitsklassen zugeordnet. Da sich quantitative Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Entwicklungen nur schwer angeben lassen, erfolgt die Zuordnung in der Regel verbal argumentativ. Falls eine Quantifizierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten möglich ist, lassen sich aus den Sicherheitsanforderungen für ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen folgende Bedingungen ableiten:

## **Wahrscheinliche Entwicklungen**

Die Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) einer wahrscheinlichen Entwicklung wird mit  $p \geq 0,1$  über einen Zeitraum von  $10^6$  Jahren angesetzt.

## **Weniger wahrscheinliche Entwicklungen**

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer weniger wahrscheinlichen Entwicklung wird mit  $0,01 \leq p < 0,1$  über einen Zeitraum von  $10^6$  Jahren angesetzt.

## **Unwahrscheinliche Entwicklungen**

Diese Gruppe umfasst Entwicklungen,

- a deren Eintreten eine Eintrittswahrscheinlichkeit mit  $p < 0,01$  zuzuordnen ist oder
- b deren Auftreten innerhalb des Nachweiszeitraums nach menschlichem Ermessen auszuschließen ist.

## **2.2 Vorgehensweise**

### **2.2.1 Prämissen**

Die dieser Leitlinie zu Grunde liegende Methodik zur Klassifizierung von Szenarien bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit beruht auf folgenden Prämissen:

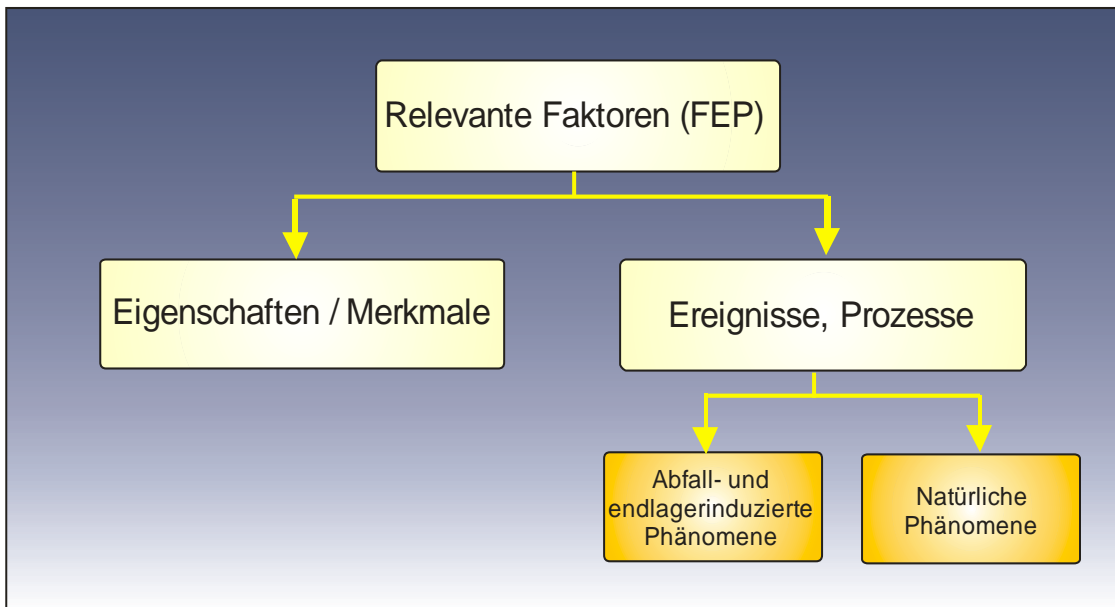
- 1 Die Entwicklungen werden – der internationalen Praxis folgend – systematisch auf der Grundlage standort- und endlagerkonzeptspezifischer Eigenschaften/Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP: *features, events and processes*) abgeleitet. FEP werden in Anlehnung an [2] folgendermaßen definiert:
  - Eigenschaften/Merkmale: Bedingungen oder Gegebenheiten, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ein bestimmtes System oder Teile davon charakterisieren,
  - Ereignisse: Vorgänge und Veränderungen, die über einen sehr kleinen Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum eintreten, d. h. kurzzeitige Phänomene sind, und
  - Prozesse: Vorgänge und Veränderungen, die über einen nennenswerten Zeitraum im Vergleich zum Nachweiszeitraum ablaufen, d. h. langzeitige Phänomene sind.
- 2 Die Grundlage der Wahrscheinlichkeitseinstufung von systematisch abgeleiteten Entwicklungen ist die Wahrscheinlichkeitseinstufung der sie definierenden FEP.
- 3 Die in dieser Leitlinie dargelegte Klassifizierung der Entwicklungen in Wahrscheinlichkeitsklassen bezieht sich auf eine systematische Ableitung von Entwicklungen des Endlagersystems. Da sich menschliche Aktivitäten über den gesamten Nachweiszeitraum einer systematischen Behandlung entziehen, wird deren Einordnung nicht in dieser Regel behandelt. Der Umgang mit Szenarien, die menschliche Aktivitäten zur Grundlage haben, ist in einer gesonderten Leitlinie geregelt [3].

- 4 Ausgeschlossen werden in den nachfolgenden Betrachtungen Ereignisse, gegen deren Einwirkungen keine zweckmäßige Auslegung erfolgen kann und deren konventionelle Auswirkungen sowohl zeitlich als auch räumlich die nuklearen Sekundärfolgen durch das Endlager bei Weitem übersteigen.
- 5 Entwicklungen stellen entweder bereits für sich genommen Szenarien dar oder werden, falls zweckmäßig, zu solchen zusammengefasst.

### 2.2.2 Wahrscheinlichkeitsklassifizierung der FEP

Die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Entwicklung wird durch die Eintrittswahrscheinlichkeiten der die Entwicklung definierenden FEP bestimmt (Abschnitt 2.2.1, Prämisse 2). Für die Bewertung einer Entwicklung ist es erforderlich, die relevanten FEP zu identifizieren. "Relevant" bedeutet, dass im Nachweiszeitraum Eigenschaften/Merkmale, Ereignisse und Prozesse in einer für die Entwicklung notwendigen Qualität bzw. Ausprägung vorliegen müssen, damit die Entwicklung eintritt.

Aufgrund der unterschiedlichen Bedeutung für die Relevanz muss im Folgenden zwischen Eigenschaften/Merkmalen (*Features*) einerseits sowie Ereignissen und Prozessen (*Events and Processes*) andererseits differenziert werden. Bei den Ereignissen und Prozessen ist es erforderlich zu unterscheiden, ob deren Ursache auf abfall- und endlagerinduzierte Phänomene oder auf natürliche Phänomene zurückzuführen ist. Abbildung 1 zeigt schematisch die genannten Unterscheidungen.



**Abbildung 1:** Differenzierung der FEP für die Klassifizierung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit

### 2.2.2.1 Wahrscheinlichkeitsklassifizierung von Eigenschaften/Merkmalen

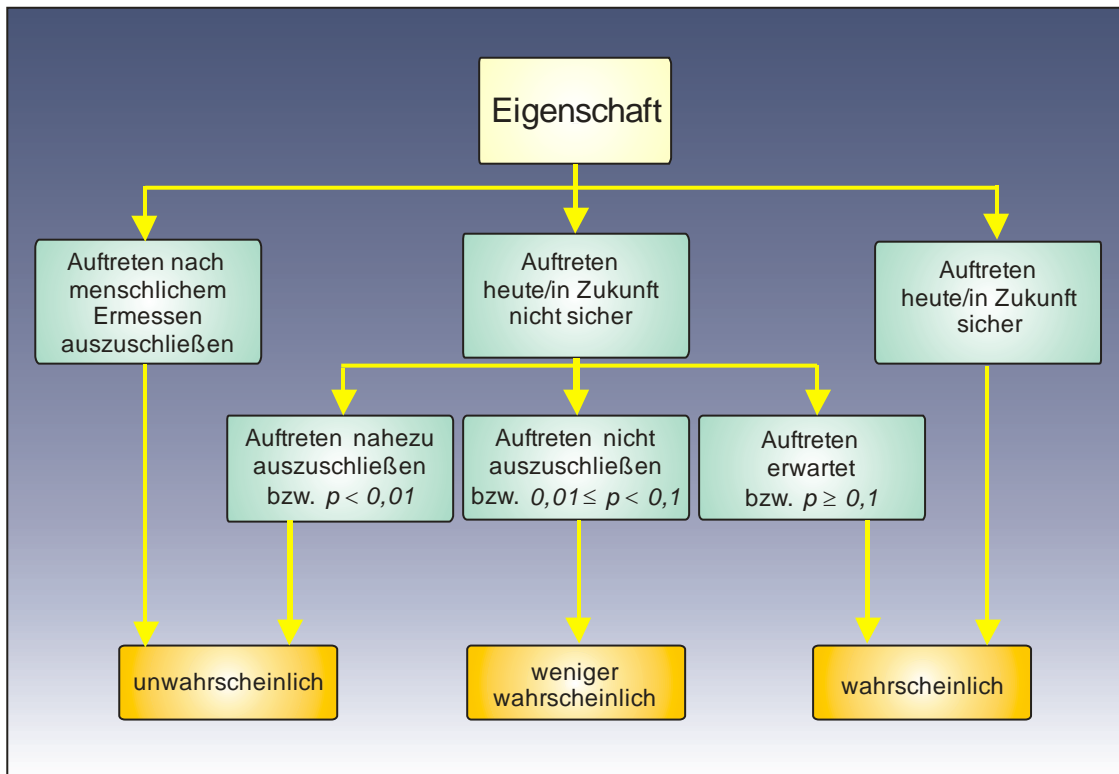
Zur Einordnung von Eigenschaften/Merkmalen in Wahrscheinlichkeitsklassen ist folgende Vorgehensweise zu wählen:

- Tritt die Eigenschaft/das Merkmal derzeit am zu bewertenden Standort nicht auf und ist ihr/sein Auftreten auch in Zukunft nach menschlichem Ermessen auszuschließen, so ist die Eigenschaft/das Merkmal als unwahrscheinlich zu betrachten.
- Aus der Standortcharakterisierung und der Systembeschreibung bereits identifizierte bzw. für die Zukunft sicher abgeleitete Eigenschaften/Merkmale (also sichere, vorhandene oder mit Sicherheit in Zukunft auftretende Eigenschaften/Merkmale) sind der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
- Ist das Auftreten einer Eigenschaft/eines Merkmals nicht sicher, so ist zu prüfen, ob für das Vorliegen dieser Eigenschaft/dieses Merkmals eine statistisch belegbare, quantitative Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) abgeleitet werden kann.
- Kann für das Vorliegen einer Eigenschaft/eines Merkmals eine statistisch belegbare, quantitative Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) abgeleitet werden (z. B. durch Heranziehen von Statistiken zu Produktionsfehlern von Behältern oder anderen Systemkomponenten oder die Aussagesicherheit geophysikalischer/geologischer Befunde), so gelten in Übereinstimmung mit den entsprechenden Ausführungen in [1] folgende Zuordnungskriterien:
  - Liegt die abgeleitete Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) im Bereich von  $p \geq 0,1$ , ist die Eigenschaft/das Merkmal der Klasse „wahrscheinlich“ zuzuordnen.
  - Liegt die abgeleitete Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) im Bereich von  $0,01 \leq p < 0,1$ , ist die Eigenschaft/das Merkmal der Klasse „weniger wahrscheinlich“ zuzuordnen.
  - Liegt die abgeleitete Eintrittswahrscheinlichkeit ( $p$ ) im Bereich von  $p < 0,01$ , ist die Eigenschaft/das Merkmal der Klasse „unwahrscheinlich“ zuzuordnen.

Ist eine Quantifizierung der Wahrscheinlichkeit nicht möglich, ist folgende Zuordnung durch begründetes und nachvollziehbar dokumentiertes Expertenurteil abzuleiten:

- Liegt eine begründete Erwartung für das Auftreten der Eigenschaft/des Merkmals innerhalb des Nachweiszeitraums vor, so ist sie/es als wahrscheinlich einzustufen.
- Wird eine Eigenschaft/ein Merkmal am Standort zwar nicht erwartet, kann jedoch auch nicht ausgeschlossen werden, so ist sie/es als weniger wahrscheinlich einzustufen.
- Kann eine Eigenschaft/ein Merkmal am Standort nach menschlichem Ermessen ausgeschlossen werden, so ist sie/es als unwahrscheinlich einzustufen.

Abbildung 2 zeigt schematisch in einem Entscheidungsbaum die beschriebene Vorgehensweise zur Einordnung von Eigenschaften/Merkmalen in Wahrscheinlichkeitsklassen.



**Abbildung 2:** Klassifizierungsschema des relevanten Faktors „Eigenschaft/Merkmal“

Aus dem in Abbildung 2 dargestellten Klassifizierungsschema wird deutlich, dass zwei Kriterien, die auf qualitativen Einschätzungen basieren, nicht durch Vergleich mit direkt vorliegenden Fakten oder Eigenschaften/Merkmalen anzuwenden sind. Das sind zum einen das Eingangskriterium, in dem abgefragt wird, ob das Auftreten einer bestimmten Eigenschaft/eines Merkmals nach menschlichem Ermessen auszuschließen ist, und zum anderen die Kriterien im Klassifizierungsschema, für die eine Zuordnung durch Experten erfolgt. Somit ist die Zuordnung für diese Art von Kriterien nicht frei von subjektiven Einflüssen. Die Gründe für die jeweils erfolgte Zuordnung sind vom Antragsteller detailliert und nachvollziehbar in der Dokumentation darzulegen.

#### 2.2.2.2 Wahrscheinlichkeitsklassifizierung von Ereignissen und Prozessen

Bei den Ereignissen und Prozessen muss eine zusätzliche Differenzierung hinsichtlich der Quelle bzw. der Ursache für das bestimmte Ereignis oder den Prozess erfolgen:

- a abfall- und endlagerinduzierte Phänomene und
- b natürliche Phänomene.

## **Ereignisse und Prozesse ausgelöst durch abfall- und endlagerinduzierte Phänomene**

Handelt es sich bei den Ereignissen und Prozessen um abfall- und endlagerinduzierte Phänomene, so sind folgende Fallunterscheidungen durchzuführen (siehe Abbildung 3):

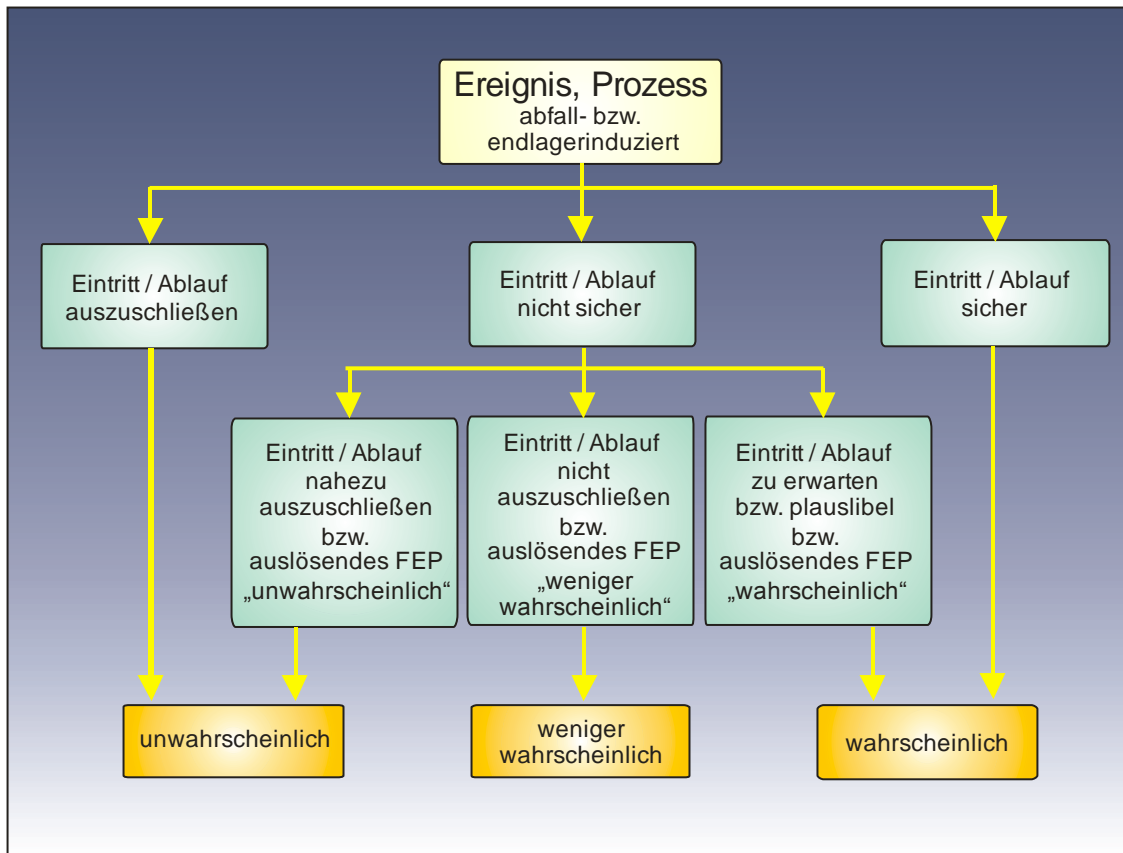
- 1 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses nach menschlichem Ermessen auszuschließen, so ist eine Zuordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“ vorzunehmen.
- 2 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses sicher, da das Ereignis/der Prozess bereits seit der Einlagerung stattfindet bzw. es unvermeidlich ist, dass das Auftreten/der Ablauf in Zukunft stattfinden wird, so ist eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ vorzunehmen (Beispiel: radioaktiver Zerfall, Wärmeentwicklung durch eingelagerte bestrahlte Brennelemente).
- 3 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses nicht sicher, so ist auf der Basis eines begründeten und nachvollziehbar dokumentierten Urteils von Experten eine weitere Fallunterscheidung durchzuführen.
- 4 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses bei dem vorliegenden Endlagersystem plausibel (wenngleich nicht völlig sicher) bzw. wurde das FEP, das den Prozess bzw. das Ereignis auslöst<sup>1</sup>, als wahrscheinlich eingestuft, so ist eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ vorzunehmen (Beispiel: auslegungskonforme Entwicklung der Permeabilität von Abdichtbauwerken).
- 5 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses bei dem vorliegenden Endlagersystem nicht zu erwarten, jedoch auch nicht auszuschließen bzw. wurde das auslösende FEP als weniger wahrscheinlich eingestuft, so ist eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ vorzunehmen (Beispiel: nicht auslegungskonforme Entwicklung der Permeabilität einzelner Abdichtbauwerke).
- 6 Ist das Eintreten eines Ereignisses bzw. der Ablauf eines Prozesses bei dem vorliegenden Endlagersystem nach menschlichem Ermessen nahezu auszuschließen bzw. wurde das auslösende FEP als unwahrscheinlich eingestuft, so ist eine Zuordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“ vorzunehmen (Beispiel: Der vollständige Ausfall eines aus mehreren Komponenten bestehenden Abdichtbauwerkes).

Das Klassifizierungsschema ermöglicht an den drei Abfragekriterien eine Entscheidung auf der Basis qualitativer Einschätzungen. Die der Klassifizierung des entsprechenden Ereignisses/Prozesses zu Grunde liegenden Experteneinschätzungen sind detailliert zu beschreiben und nachvollziehbar zu dokumentieren.

---

<sup>1</sup> Lösen FEP nachfolgende Ereignisse und Prozesse aus, so wird die Wahrscheinlichkeit der ausgelösten Ereignisse und Prozesse genauso wie die des auslösenden FEP eingestuft.

---



**Abbildung 3:** Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei abfall- und endlagerinduzierten Phänomenen

### Ereignisse und Prozesse ausgelöst durch natürliche Phänomene

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Ereignisse und Prozesse, die einen natürlichen Ursprung haben (siehe Abbildung 4):

- 1 Wenn das Eintreten des betrachteten Ereignisses/Prozesses nach menschlichem Ermessen auszuschließen ist, ist eine Zuordnung in die Klasse „unwahrscheinlich“ vorzunehmen.

Zur Einordnung aller anderen Phänomene ist zunächst eine Beurteilung nach rezent andauernden und/oder wiederkehrenden Ereignissen und Prozessen vorzunehmen. Die Entwicklungen und Ereignisse sind daraufhin zu untersuchen, ob sie derzeit und im Nachweiszeitraum weiter andauern oder ob auf Grund ihres zyklischen Charakters in der Vergangenheit ihr Auftreten auch im Nachweiszeitraum zu erwarten ist (z. B. Wechsel von Warm- und Kaltzeiten).



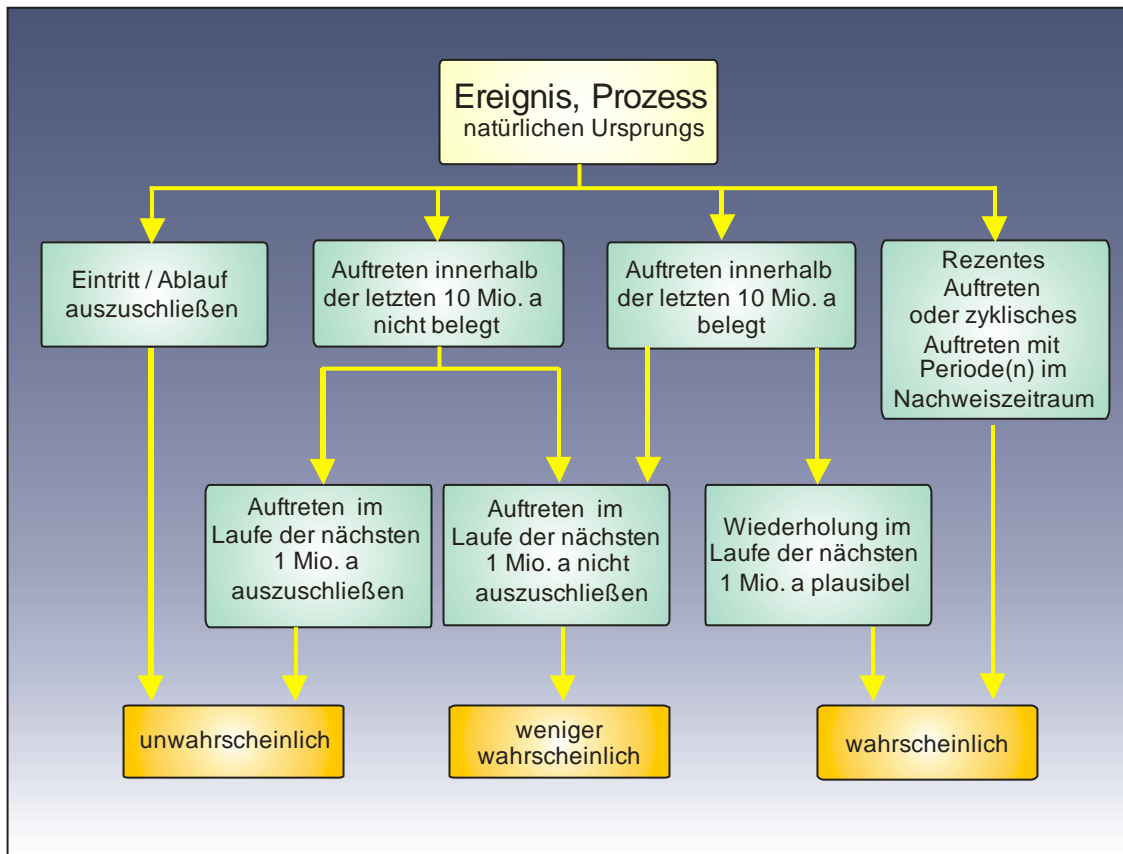
- 2 Wenn das Ereignis oder der Prozess rezent andauert (z. B. Subsidenzprozesse) und/oder zyklisch auftritt sowie die nächste Periode im Nachweiszeitraum liegt (z. B. Inlandvereisungen), ist eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ vorzunehmen.
- 3 Wenn das Ereignis oder der Prozess keine derartigen rezenten und/oder zyklischen Merkmale zeigt, so ist im Rahmen einer Untersuchung der geologischen Entwicklung des Standortes zu klären, ob das entsprechende Phänomen in den letzten 10 Mio. Jahre schon einmal aufgetreten ist (z. B. Vulkanismus).
  - Kann durch die Untersuchung der bisherigen Entwicklung belegt werden, dass in den letzten 10 Mio. Jahren<sup>2</sup> das entsprechende Ereignis oder der entsprechende Prozess am Standort eingetreten ist und eine Wiederholung im Laufe der kommenden 1 Mio. Jahre plausibel ist, dann ist eine Zuordnung in die Klasse „wahrscheinlich“ vorzunehmen. Andernfalls erfolgt eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“.
  - Bei fehlenden Anzeichen aus der Vergangenheit in den letzten 10 Mio. Jahren ist zu prüfen, ob ein Eintritt des Ereignisses/Prozesses in den nächsten 1 Mio. Jahren aus wissenschaftlichen Gründen auszuschließen ist. Sollte dies nicht der Fall sein, so ist eine Zuordnung in die Klasse „weniger wahrscheinlich“ vorzunehmen (z. B. Inlandeisvorstöße, die weiter nach Süden reichen als bei sämtlichen Eisvorstößen in der Vergangenheit).

Abbildung 4 zeigt schematisch in einem Entscheidungsbaum die beschriebene Vorgehensweise zur Einordnung von Ereignissen/Prozessen natürlichen Ursprungs in Wahrscheinlichkeitsklassen.

---

<sup>2</sup> Der gewählte Zeitraum von 10 Mio. Jahren ist deutlich größer als der Nachweiszeitraum (1 Mio. Jahre). Er ist auch aus geologischer Sicht ein Zeitraum, über den in einem geologisch ruhigen Gebiet verlässliche Aussagen über die Entwicklungen im tiefen Untergrund gemacht werden können.

---



**Abbildung 4:** Klassifizierungsschema der relevanten Faktoren „Ereignisse und Prozesse“ bei natürlichen Phänomenen

### 2.2.3 Klassifizierung von Entwicklungen und Szenarien

Der Antragsteller hat die Ableitung von Entwicklungen des Endlagersystems schrittweise durchzuführen und nachvollziehbar zu dokumentieren. Hierbei sind insbesondere folgende Dokumentationen vorzulegen:

- Zusammenstellung einer Universalliste (FEP-Katalog) von Eigenschaften/Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (FEP), die an dem Endlagerstandort vorkommen können,
- Identifizierung relevanter FEP zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems (FEP-Screening),
- Wahrscheinlichkeitsklassifizierung der relevanten FEP bzw. ihrer Ausprägung,
- Ableitung der dem Sicherheitsnachweis zu Grunde zu legenden Entwicklungen durch Festlegung der Ausgangssituation und das Zusammenwirken von Eigenschaften/Merkmalen, Prozessen und Ereignissen in jeweils festgelegten Ausprägungen,
- Zuordnung von Entwicklungen zu Wahrscheinlichkeitsklassen.

Bei der Zuordnung von Entwicklungen zu Wahrscheinlichkeitsklassen gilt generell:

- a Die relevanten FEP mit ihren Ausprägungen mit den geringsten Wahrscheinlichkeiten bestimmen die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Entwicklungen, soweit die FEP voneinander unabhängig sind.<sup>3</sup>
- b Die Zusammenfassung von Entwicklungen zu Szenarien darf nur innerhalb einer Wahrscheinlichkeitsklasse erfolgen. Das daraus resultierende Szenarium wird in die gleiche Wahrscheinlichkeitsklasse eingestuft.

Der Antragsteller hat bei der Kombination mehrerer voneinander unabhängiger weniger wahrscheinlicher FEP zu begründen, warum er die resultierende Entwicklung als unwahrscheinlich ansieht.

Für Entwicklungen, für die eine Zuordnung nicht eindeutig vorgenommen werden kann, muss die Zuordnung im Hinblick auf das einzuhaltende Schutzziel in die Klasse mit der höheren Wahrscheinlichkeit, d. h. mit der schärferen Schutzzielanforderung, erfolgen.

---

<sup>3</sup> Da das gemeinsame Eintreten aller relevanten FEP in den jeweiligen Ausprägungen für das Eintreten der Entwicklung notwendig sind („und“-Verknüpfung), also beim Nicht-Eintreten auch nur eines relevanten FEP mit seiner Ausprägung die betrachtete Entwicklung nicht zustande kommt, ist diese Vorgabe gerechtfertigt.

### **3 Literatur**

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver  
Abfälle – Stand 30. September 2010 (Endfassung)
  
- [2] 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), Gemeinsamer Bericht von  
DBE TECHNOLOGY GMBH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GMBH  
Peine, April 2010
  
- [3] Empfehlung der Entsorgungskommission vom 26.04.2012:  
Leitlinie zum menschlichen Eindringen in ein Endlager für radioaktive Abfälle.  
Anlage zum Ergebnisprotokoll der 26. ESK-Sitzung am 26.04.2012