



# Sicherheit angesichts von Ungewissheit

## Ungewissheiten im Safety Case

Anne Eckhardt

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Gefördert im  
Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung



Förderkennzeichen: 02E11849A-J

## Impressum

Mit dem vom BMWi und vom NMWK im Vorab der Volkswagenstiftung geförderten Verbundvorhaben TRANSENS wird erstmalig in Deutschland transdisziplinäre Forschung zur nuklearen Entsorgung in größerem Maßstab betrieben. TRANSENS ist ein Verbundvorhaben, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten.

Kontakt: Dr. Anne Eckhardt, risicare GmbH, Bühlstrasse 19, 8125 Zollikerberg, Schweiz, [anne.eckhardt@risicare.ch](mailto:anne.eckhardt@risicare.ch)

TRANSENS-Bericht eingereicht am 20. September 2020, veröffentlicht am 8. Februar 2021

Reviews: Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig, Dr. Peter Hocke

Zitierweise: Eckhardt, Anne (2020): Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case. Literaturstudie. Zollikerberg. TRANSENS-Bericht-01. ISSN (Online): 2747-4186

Titelbild: A. Eckhardt

# Vorwort

Der Anspruch, den das deutsche Recht an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle stellt, ist hoch. Die Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sieht einen Bewertungszeitraum von einer Million Jahre für ein verschlossenes Endlager in tiefen geologischen Formationen vor.

Das Endlager soll gewährleisten, dass Menschen dauerhaft vor schädlichen Auswirkungen der ionisierenden Strahlung geschützt werden, die von hochradioaktiven Abfällen ausgeht. Gestaffelte Sicherheitsbarrieren sollen dem Austreten von Radionukliden in die Biosphäre aber auch dem Eindringen von Menschen in ein verschlossenes Endlager entgegenwirken.

Auf dem Entsorgungspfad, der vom Beginn des Standortauswahlverfahrens bis zur Stilllegung des Endlagers führt, wird die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen mehrfach anhand von Sicherheitsberichten – im internationalen Sprachgebrauch Safety Cases – überprüft. Die Gestaltung eines Safety Case richtet sich unter anderem daran aus, welcher Entscheidung er zugrunde gelegt werden soll. Beispiele für solche Entscheidungen sind, einen Untersuchungsraum im Standortauswahlverfahren weiter zu verfolgen oder eine Betriebsgenehmigung zu erteilen. Auf dem Entsorgungspfad verändert sich auch der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case. Durch die Konkretisierung des Endlagerprojekts und wachsenden Erkenntnisgewinn werden Ungewissheiten abgebaut. Aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und der Fokussierung auf konkretere Fragestellungen ist allerdings auch damit zu rechnen, dass weitere Ungewissheiten erkennbar werden.

Auf dem gesamten Entsorgungspfad nehmen Ungewissheiten eine wichtige Rolle im Safety Case ein. Die Vielfalt der Ungewissheiten, die im Safety Case zu betrachten sind, ist über den gesamten Bewertungszeitraum groß.

Der TRANSENS-Bericht «Ungewissheiten im Safety Case» beruht auf einer Analyse von Fachliteratur zu Ungewissheiten im Safety Case und verwandten Themen. Der Bericht stützt sich auf Empfehlungen der International Atomic Energy Agency (IAEA) und der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD. Zu rechtlichen und behördlichen Vorgaben in Deutschland, Finnland und der Schweiz werden regelmäßig Bezüge hergestellt. Als Beispiele für Safety Cases werden vor allem die «Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben» und der Safety Case für das Endlager ONKALO für hochradioaktive Abfälle in Finnland beigezogen.

Die Literaturstudie zielt darauf ab, sich den unterschiedlichen Ungewissheiten im Safety Case aus einer breiten interdisziplinären Perspektive anzunähern. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt im ganzheitlichen Blick auf die Ungewissheiten im Safety Case und darin, dass der eine oder andere Aspekt auf neue Art und Weise ausgeleuchtet werden kann. Ein Nachteil besteht darin, dass viele Überlegungen grundsätzlicher Natur sind und keine der disziplinären Sichtweisen, zum Beispiel aus Ethik, Geologie, Organisationspsychologie oder Kerntechnik, vertieft wird. Insbesondere wird nicht vertieft auf mathematische Verfahren zum Umgang mit Ungewissheiten eingegangen.

Im Vorhaben TRANSENS wird transdisziplinär zur nuklearen Entsorgung geforscht. Die interessierte Öffentlichkeit und andere außerakademische Akteure werden dabei planvoll in Forschungskontexte eingebunden. Das bedeutet, dass TRANSENS das vielfach interdisziplinäre Wissen und die Erfahrungen der interessierten Öffentlichkeit und anderer außerakademischer Akteure in die Forschung einbezieht. Der TRANSENS-Bericht «Ungewissheiten im Safety Case» soll eine interdisziplinäre Grundlage bilden, auf der in TRANSENS transdisziplinär weitergearbeitet werden kann, die aber auch Impulse für die interdisziplinäre und disziplinäre Forschung geben kann.

Um den Zugang zu einzelnen Aspekten des Themas «Ungewissheiten im Safety Case» zu erleichtern, ist der Bericht aus 18 Arbeitspapieren aufgebaut. In den Arbeitspapieren werden spezifische Aspekte, die für den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case wichtig sind, in übersichtlicher Form behandelt. Arbeitspapiere zu einzelnen Themen können ausgewählt, der Bericht aber auch als Ganzer gelesen werden. Um zu gewährleisten, dass die Arbeitspapiere auch einzeln verständlich sind, war ein gewisses Maß an Redundanzen zwischen den Papieren unvermeidlich. Der TRANSENS-Bericht enthält eine Zusammenfassung und schließt mit Folgerungen zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case ab.

# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Sicherheit	7
2. Entsorgungskonzept	12
3. Der Safety Case	19
4. Ungewissheit und Unsicherheit	27
5. Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität	31
6. Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität	35
7. Klassifikation von Ungewissheiten	41
8. Anthropogene Ungewissheiten	49
9. Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager	55
10. Human Factor-Ungewissheiten	67
11. Normative Ungewissheiten	75
12. Grundlagen der Regulierung von Ungewissheiten	83
13. Psychologische Einflüsse	95
14. Identifizieren von Ungewissheiten	99
15. Beschreiben von Ungewissheiten	109
16. Beurteilen von Ungewissheiten	115
17. Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten	127
18. Verifikation und Objektivierung des Umgangs mit Ungewissheiten	135
Folgerungen	138

# Zusammenfassung

Die Literaturstudie «Ungewissheiten im Safety Case» wurde mit dem Ziel erstellt, einen grundlegenden und systematischen Überblick über den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case zu vermitteln und einzelne Aspekte interdisziplinär auszuleuchten. Aus der Analyse der Fachliteratur resultieren Folgerungen, die Impulse für die künftige Entwicklung des Safety Case geben können.

## Sicherheit und Ungewissheit

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird vom Ziel geleitet, Menschen und Umwelt vor den schädigenden Auswirkungen der Abfälle zu schützen. Die Abfälle sollen sicher entsorgt werden.

Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept. Ob ein Endlagersystem als sicher beurteilt werden kann, muss daher aus unterschiedlichen Perspektiven und mit unterschiedlichen Ansätzen geprüft werden, die Menschen, Organisation und Gesellschaft sowie Technik und Umwelt einbeziehen.

Ungewissheit besteht, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um Aussagen zur Möglichkeit eines Schadens zu machen.

Ungewissheiten bestimmen die Einschätzung und Beurteilung der Sicherheit eines Endlagersystems wesentlich mit. Wichtige Gründe dafür sind die langen Zeiträume, über die die Sicherheit des Endlagersystems bewertet werden soll, die Komplexität des soziotechnischen Endlagersystems und räumliche Heterogenitäten.

In die Beurteilung der Sicherheit eines Endlagersystems müssen Ungewissheiten daher transparent und differenziert einbezogen werden. Insbesondere sind, wenn Sicherheit durch das Einhalten von Sicherheitsanforderungen oder -kriterien belegt wird, auch die dabei verwendeten Annahmen, Vereinfachungen, Konservativitäten und Modelle darzulegen und zu beurteilen und verbleibende bereits erkennbare Ungewissheiten systematisch darzulegen.

## Kategorien von Ungewissheiten

Ungewissheiten im Safety Case lassen sich in fünf Kategorien einordnen:

- Daten- oder Parameterungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut verwendete Parameterwerte und -verteilungen die Realität wiedergeben.
- Modellungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut das Verhalten von Elementen des Endlagersystems durch Modelle abgebildet wird.
- Systementwicklungsungewissheiten beruhen auf einem Mangel an Information darüber, wie sich das Endlagersystem und seine Rahmenbedingungen verhalten. Zu den Systementwicklungsungewissheiten zählen auch die anthropogenen Ungewissheiten,

die auf fehlende Informationen darüber zurückgehen, wie sich von Menschen direkt oder indirekt verursachte Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken.

- Human Factor-Ungewissheiten beruhen auf fehlender Information zu direkten Einflüssen von Menschen und Organisationen auf das Endlagersystem.
- Normative Ungewissheiten liegen vor, wenn Informationen fehlen oder uneindeutig sind, die benötigt werden, um zu beurteilen, ob die Möglichkeit eines Schadens akzeptabel ist oder nicht.

Diese fünf Kategorien von Ungewissheiten überschneiden sich teilweise erheblich. Im Safety Case steht ein Spektrum unterschiedlicher Methoden zur Verfügung, um mit verschiedenen Kategorien von Ungewissheiten umzugehen.

Einige Ergebnisse der Literaturstudie, unter anderem auch zu psychologischen Einflüssen auf die Entscheidungsfindung unter Ungewissheit, deuten darauf hin, dass insbesondere den anthropogenen und den Human Factor-Ungewissheiten künftig im Safety Case mehr Aufmerksamkeit zukommen sollte.

## Ungewissheit im Bewertungszeitraum

Ein Entsorgungspfad ist ein spezifischer soziotechnischer Prozess, der zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen führt. Mit der Stilllegung eines Endlagers wird der Entsorgungspfad abgeschlossen. Der Bewertungszeitraum für die Lagerung hochradioaktiver Abfälle reicht weit über das Ende des Entsorgungspfads hinaus.

Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle resultieren unter anderem aus dem jahrzehntelangen Zeitraum, der bis zum Verschluss des Endlagers verstreicht, und dem Bewertungszeitraum von einer Million Jahren nach dem Verschluss des Endlagers. Mit zunehmendem Betrachtungshorizont nehmen viele Ungewissheiten zu, insbesondere Ungewissheiten, die auf menschlichen Aktivitäten beruhen, und die Aussagekraft empirischer Untersuchungen stößt an Grenzen.

Beim Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad und im Verlauf des Bewertungszeitraums verändert sich das Spektrum der Ungewissheiten, die im Safety Case zu betrachten sind. Manche Ungewissheiten, zum Beispiel zur Betriebssicherheit des Endlagers, zum Verhalten der Endlagergebäude im verschlossenen Endlager oder zum Eintreten der nächsten Kaltzeit, sind nur in bestimmten Abschnitten des Bewertungszeitraums relevant.

Zwischen Risiken und Ungewissheiten, die zu unterschiedlichen Zeiten relevant sind, können Verknüpfungen bestehen. Um die Sicherheit eines Endlagersystems zu belegen, sollte daher ein ganzheitlicher Safety Case durchgeführt werden, der perspektivisch den gesamten noch zu durchlaufenden Bewertungszeitraum umfasst.

## Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case eignet sich ein schrittweises Vorgehen, das iterativ durchlaufen wird:

- **Identifizieren der Ungewissheiten**  
Ziel dieses Schritts ist es, die Ungewissheiten, die für den Safety Case relevant sind, möglichst vollständig zu erfassen. Dies geschieht idealerweise sowohl im jeweiligen Kontext, in dem die Ungewissheiten für den Safety Case relevant sind, als auch in einem damit verknüpften zentralen Verzeichnis. Grundlagen für die Identifikation bilden unter anderem Kataloge von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen (features, events and processes, FEPs) eines Endlagersystems.
- **Beschreiben der Ungewissheiten**  
Dieser Schritt zielt darauf ab, die Ungewissheiten möglichst gut zu verstehen, umfasst also auch die Analyse der Ungewissheiten. Beschreibungen erfolgen in natürlicher Sprache und ggf. mathematisch. Die Beschreibung erfordert eine Angabe darüber, auf welchen Abschnitt des Bewertungszeitraums sich die Ungewissheit bezieht. Die Art und Weise, wie Ungewissheiten beschrieben werden, ist wesentlich dafür, welche Ansätze sich zur Beurteilung der Ungewissheiten nutzen lassen.
- **Beurteilen der Ungewissheiten**  
Ziel der Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case ist eine informierte Entscheidung dazu, ob bzw. inwieweit die Ungewissheiten zum Beurteilungszeitpunkt akzeptabel sind. Die Beurteilung einer Ungewissheit richtet sich wesentlich daran aus, wie groß die Sicherheitsrelevanz des Aspekts ist, zu dem Ungewissheit besteht, wie erheblich die Ungewissheit selbst ist und wie fundiert die Aussagen sind, die über die Ungewissheit gemacht werden können.
- **Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten**  
Die Art und Weise, wie mit Ungewissheiten, die im Safety Case verbleiben, weiter umgegangen werden soll, hängt wesentlich von der Position des Safety Case auf dem Entsorgungspfad ab. Zu Beginn des Entsorgungspfads muss der Umgang mit Ungewissheiten so erfolgen, dass im Sinn eines lernenden Verfahrens genügend Flexibilität für Anpassungen und Kurskorrekturen besteht. Mit zunehmendem Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad müssen Ungewissheiten abgebaut werden und Pfadabhängigkeiten nehmen zu. Entscheidungen zum weiteren Umgang mit Ungewissheiten, zum Beispiel zum Vermindern von Ungewissheiten durch weitere Untersuchungen oder zum Akzeptieren bestimmter Ungewissheiten, sollten ebenso wie die Beschreibung und Beurteilung der Ungewissheiten systematisch und transparent festgehalten werden.

Aus dem Safety Case wird eine Entscheidungsgrundlage abgeleitet, die sich an politische oder Verwaltungs-Instanzen richtet und eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen auf dem Entsorgungspfad enthält. In dieser Entscheidungsgrundlage muss den Ungewissheiten ein angemessener Stellenwert eingeräumt werden.

In den Folgerungen zum vorliegenden TRANSENS-Bericht werden gute Praktiken und Empfehlungen aus der Fachliteratur zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case in einer Übersicht dokumentiert.



## Umgang mit Ungewissheiten: Vier-Felder-Schema

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case existiert eine Vielzahl von Ansätzen, deren Anwendung sich gemeinsam mit dem Safety Case entwickelt hat. Welcher Ansatz in welchen Fällen zum Einsatz kommt, ist für Betroffene und Interessierte nicht immer transparent und nachvollziehbar, und kann daher zu Kritik am Safety Case Anlass geben.

Wesentlich dafür, wie mit Ungewissheiten im Safety Case umgegangen werden soll, ist die Beantwortung der vier Fragen:

- Sicherheitsrelevanz: Betrifft die Ungewissheit einen Aspekt, der für die Sicherheit des Endlagersystems wichtig ist?
- Tragweite: Ist die Ungewissheit zum betrachteten Aspekt erheblich oder potenziell erheblich?
- Aussagenqualität: Sind die Aussagen, die über die Tragweite der Ungewissheit gemacht werden können, gut fundiert?
- Behebungspotenzial: Lässt sich die Ungewissheit mit vernünftigem Aufwand vermeiden, vermindern oder lassen sich deren Auswirkungen mit vernünftigem Aufwand begrenzen?

Das Vier-Felder-Schema,



das in den Folgerungen aus der Literaturstudie genauer dargestellt ist, stellt einen Ansatz dar, um die Beurteilung und den weiteren Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case systematischer und transparenter zu gestalten.

## Ausrichtung des Safety Case

Aus der Literaturstudie werden Vorschläge für die Ausrichtung künftiger Safety Cases abgeleitet:

1. **Integrale Sicherheit.**  
Um Verknüpfungen zwischen Risiken und Ungewissheiten, die zu unterschiedlichen Zeiten relevant sind, besser erfassen und beurteilen zu können, sollte schon früh auf dem Entsorgungspfad ein Safety Case angestrebt werden, der Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachverschlussphase eines Endlagers perspektivisch erfasst.
2. **Sicherung einbeziehen.**  
Zwischen Sicherheit und Sicherung bestehen wechselseitige Abhängigkeiten. In der Kerntechnik werden Sicherheit und Sicherung jedoch oft gesondert voneinander behandelt – unter anderem aufgrund von Geheimhaltungsvorschriften und der bei der Sicherung volatileren Bedrohungslage. Grundlegende Aspekte der Sicherung, die nicht der Geheimhaltung unterliegen, sollten vermehrt in den Safety Case einbezogen werden, um den Umgang mit sicherheitsrelevanten Verknüpfungen beider Bereiche zu verbessern.
3. **Soziotechnisches System Endlagerung.**  
Mit Blick auf die Langzeitsicherheit konzentriert sich der Safety Case bisher wesentlich auf die geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren eines Endlagersystems. Ein Safety Case, der Errichtung, Betrieb, Stilllegung und Nachverschlussphase eines Endlagers erfasst, muss unabdingbar auch Menschen, Organisation und Gesellschaft einbeziehen und eröffnet damit die Chance, das Endlagersystem über den Entsorgungspfad und weitere Abschnitte des Bewertungszeitraums vermehrt nicht mehr nur als technisches, sondern als soziotechnisches System zu behandeln.
4. **Impulse von außen.**  
Die Sicherheit des soziotechnischen Endlagersystems kann im Safety Case nur mit einem ausgeprägt interdisziplinären Ansatz belegt werden, der auch sozialwissenschaftliche Disziplinen einbezieht. Damit erweitert sich die Gemeinschaft der Spezialisten und Spezialistinnen für den Safety Case. Um einen weitsichtigen Umgang mit Ungewissheiten zu gewährleisten sollten vermehrt Impulse von Spezialistinnen und Spezialisten aus anderen Fachgemeinschaften, die Berührungspunkte mit den im Safety Case relevanten Disziplinen aufweisen, eingeholt werden. Wertvolle Impulse können auch Personen aus den im Safety Case bereits vertretenen Fachdisziplinen geben, die sich bisher nicht mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle befasst haben.
5. **Vom Berichtswerk zum informationstechnisch unterstützten System.**  
Innerhalb eines Safety Case bestehen zahlreiche inhaltliche Verknüpfungen. Diese Verknüpfungen betreffen auch Ungewissheiten. Zudem hat sich gezeigt, dass sowohl ein zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten als auch die Behandlung von Ungewissheiten im jeweiligen thematischen Kontext im Safety Case angezeigt ist. Die bisherigen umfangreichen Berichtswerke zum Safety Case kommen der Forderung nach Transparenz nur bedingt entgegen und stoßen angesichts des wachsenden Umfangs an Informationen zur Sicherheit eines soziotechnischen Endlagersystems an Grenzen. Daher ist es sinnvoll, neue informationstechnische Ansätze zu nutzen, um Safety Cases zu gestalten und zu kommunizieren. International existieren bereits entsprechende Initiativen.

6. Einbeziehen von Human Factors.  
Endlagersysteme werden von Menschen konzipiert, ausgeführt, betrieben und verändert. Safety Cases werden von Menschen erstellt. In beiden Fällen wirken auf diese Menschen organisationale und gesellschaftliche Rahmenbedingungen ein. Wenn Sicherheit im Safety Case belegt werden soll, muss daher den menschlichen Einflüssen auf die Sicherheit ein höherer Stellenwert eingeräumt werden als es im typischen Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers bisher der Fall war.
7. Kriterien zur Beurteilung von Ungewissheiten.  
Die Beurteilung von Ungewissheiten ist anspruchsvoll, unter anderem deshalb, weil die Ungewissheiten im Safety Case unterschiedlich beschrieben werden. Für eine transparente Beurteilung von Ungewissheiten und eine transparente Abwägung zwischen unterschiedlichen Ungewissheiten sollten spezifischere Kriterien entwickelt werden. Insbesondere ist nachvollziehbar zu klären, wann Ungewissheiten als akzeptabel oder nicht akzeptabel beurteilt werden.
8. Transparenz stärken.  
Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept. Sicherheitsindikatoren sind nur ein Instrument unter vielen, das genutzt werden kann, um zu beurteilen, ob die Sicherheit eines Endlagersystems akzeptabel ist oder nicht. Die Entscheidungsgrundlagen, die aus dem Safety Case abgeleitet werden, müssen daher ein differenziertes Bild vermitteln, das den verschiedenen Facetten von Sicherheit und insbesondere auch den Ungewissheiten gerecht wird.
9. Diskursives Element.  
Aussagen zur Sicherheit des Endlagersystems, insbesondere zu dessen künftiger Entwicklung, sind oft nicht nur ungewiss, sondern auch normativ geprägt und umstritten. Daher sollte dem Diskurs zum Safety Case künftig ein größerer Stellenwert zukommen. Insbesondere sollte geprüft werden, ob der Vorhabenträgerin als «Anwältin», die die Sicherheit des Endlagersystems mit dem Safety Case belegt, institutionalisiert ein starker «Staatsanwalt» gegenübergestellt werden sollte, der den Safety Case einem fundierten «Stresstest» unterzieht. Die darauf gestützten politischen Entscheidungen werden von der Aufsichtsbehörde vorbereitet, die damit die Rolle der «Richterin» übernimmt.

## Einordnung in TRANSENS

Der vorliegende Bericht wurde verfasst, während die transdisziplinären Experimente bei TRANSENS konzipiert und vorbereitet wurden. Er enthält daher noch keine Ergebnisse transdisziplinärer Forschung. Ob Ungewissheiten zum Gegenstand der transdisziplinären Experimente bei TRANSENS werden, darüber werden die Forschungspartner aus der interessierten Bevölkerung und Institutionen, die sich mit dem Safety Case befassen, wesentlich mitentscheiden. Transdisziplinäre Forschung kann dazu beitragen, Wissen hervorzu- bringen, das den zukünftigen Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case mitbestimmt.

# 1. Sicherheit

Ungewissheiten sind für den Safety Case relevant, wenn sie einen Bezug zur Sicherheit des Endlagersystems aufweisen. Für die Literaturstudie ist daher wesentlich, welches Verständnis von Sicherheit dem Safety Case zugrunde liegt.

*Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird vom Ziel geleitet, Menschen und Umwelt vor den schädigenden Auswirkungen der Abfälle zu schützen. Die Abfälle sollen sicher entsorgt werden.*

*Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept, das unter anderem mittels Sicherheitskriterien beurteilt werden kann. Wenn die Einhaltung von Sicherheitsanforderungen anhand von Sicherheitskriterien belegt wird, sind auch die Annahmen, Vereinfachungen, Konservativitäten und Modelle zu beurteilen, die dabei zum Einsatz kommen.*

*Da Sicherheit ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept ist, muss sie aus unterschiedlichen Perspektiven geprüft werden, die Menschen, Organisation, Technik und Umwelt einbeziehen. Die Analyse und Beurteilung von Sicherheit erfordert Wissen und Erfahrung aus unterschiedlichen Fachdisziplinen.*

Die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird vom Ziel geleitet, Menschen und Umwelt vor den schädigenden Auswirkungen dieser Abfälle zu schützen. Sicherheit ist allen weiteren Zielen vorgelagert, wie zum Beispiel gesellschaftlicher Akzeptanz, dem effizienten Umgang mit Ressourcen oder weitgehendem Handlungsspielraum für künftige Generationen.

Wie Sicherheit zu verstehen ist, wie und woran sie gemessen werden soll und wann ausreichende Sicherheit besteht, lässt sich nicht ohne weiteres feststellen. Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept («a multi-dimensional concept», NEA 2013, S. 39)<sup>1</sup> und damit nicht im engen Sinne normier- und berechenbar (Röhlig 2007, S. 103).

Sicherheit wird als Zustand beschrieben, bei dem Schutz gegen unerwünschte Ereignisse und Entwicklungen gewährleistet ist («the condition of being protected against failure, damage, error, accidents or harm») (NEA 2013, S. 39) oder Werte, die für Personen wesentlich sind, nicht durch existenzielle Bedrohungen gefährdet sind (LPB 2020). Sie wird als dynamisches Nicht-Ereignis («Safety is a dynamic non-event») charakterisiert (Hollnagel 2014) oder – beispielsweise aus rechtlicher und behördlicher Sicht – als Zustand aufgefasst, in dem die verbleibenden Risiken akzeptabel bzw. die geltenden Sicherheitsanforderungen erfüllt sind.

---

<sup>1</sup> «Multidimensional» impliziert, dass sich die verschiedenen Dimensionen der Sicherheit gegeneinander abgrenzen lassen, was in der Realität oft nicht der Fall ist. Technische Sicherheit zum Beispiel wird von Menschen gemacht und überlagert sich deshalb mit den organisationspsychologischen Aspekten von Sicherheit. Menschen, die Sicherheit als «Abwesenheit von Risiken» verstehen, sind oft doch bereit, bestimmte Risiken, die als weniger bedrohlich wahrgenommen werden, zu tolerieren. Deshalb wird Sicherheit hier als «vielgestaltig und vielschichtig» beschrieben.

Zu den vielfältigen Aspekten der Sicherheit zählen sowohl solche, die vor allem naturwissenschaftlich-technisch als auch solche, die vor allem geistes- und sozialwissenschaftlich zu betrachten sind, wenn Sicherheit analysiert, beurteilt und gewährleistet werden soll.

## Schutzziele

Die Entsorgungsoption «Endlagerung» ist auf darauf ausgerichtet, hochradioaktive Abfälle einzuschließen und von der Biosphäre zu isolieren (IAEA 2011, S. 2). Auf diese Weise werden Menschen und Umwelt vor Auswirkungen der Abfälle geschützt und die Abfälle gegenüber menschlichen Einwirkungen abgeschirmt.

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) formulierte als übergeordnetes Ziel für die Langzeitsicherheit (IAEA 2011, S. 13), dass ein Endlager so platziert, errichtet, betrieben und verschlossen werden soll, dass der Schutz von Menschen und Umwelt unter Einbezug sozialer und wirtschaftlicher Faktoren optimiert wird.

Im Standortauswahlgesetz (StandAG) ist festgehalten, dass der Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen der Abfälle über einen Zeitraum von einer Million Jahren sichergestellt werden soll (§1 Stand AG 2017). Orientierung dafür, welche radiologischen Belastungen zulässig sind, bietet die natürliche Strahlenexposition (§26 Stand AG 2017). Auf diese Vorgabe nimmt die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV) Bezug: «Es ist zu prüfen und darzustellen, dass Expositionen auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen geringfügig im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition sind» (§7 EndLSiAnfV 2020).

Im schweizerischen Kernenergiegesetz wird gefordert, radioaktive Abfälle so zu entsorgen, dass «der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist» (§30 KEG 2004). Dieses Schutzziel wird durch den Entwurf der entsprechenden behördlichen Richtlinie auf ionisierende Strahlung fokussiert und um eine zusätzliche ethisch motivierte Verpflichtung erweitert: «Mit der geologischen Tiefenlagerung sind radioaktive Abfälle so zu entsorgen, dass der Schutz von Mensch und Umwelt vor deren ionisierender Strahlung dauerhaft gewährleistet ist, ohne dass künftigen Generationen unzumutbare Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden» (ENSI 2020, S. 2). Auch im StandAG ist festgehalten, dass unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen vermieden werden (§1 Stand AG 2017) und für den langfristigen sicheren Einschluss der Abfälle keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich sein sollen (§26 StandAG 2017).

Der Bewertungszeitraum für die Langzeitsicherheit, hier Nachweiszeitraum genannt, beträgt in der Schweiz bis zu eine Million Jahre (ENSI 2020, S. 15). In Finnland soll der Bewertungszeitraum so weit reichen, wie die Strahlenexposition von Menschen mit ausreichender Zuverlässigkeit eingeschätzt werden kann, und mindestens einige tausend Jahre betragen (STUK 2018, S. 8).

## Sicherheitskriterien

Ob Schutzziele eingehalten werden, lässt sich unter anderem anhand von Sicherheitskriterien überprüfen. Die Parameter, auf die sich Sicherheitskriterien beziehen, können das Endlager betreffen oder dessen Umgebung.

Die Sicherheitskriterien, die von der International Atomic Energy Agency (IAEA) empfohlen werden, sind Dosisgrenzwerte. Ein Grenzwert von 1 mSv/Jahr für die effektive Dosis für Einzelpersonen bezieht sich auf alle geplanten Expositionssituationen. Aufgrund erwarteter Prozesse dürfen Einzelpersonen einer maximalen Dosis von 0.3 mSv/Jahr ausgesetzt werden, die auf eine Entsorgungsanlage für radioaktive Abfälle zurückgeht (IAEA 2011, S. 13). Dafür, dass die Sicherheitskriterien langfristig nicht überschritten werden, muss angemessene Gewähr geboten werden (IAEA 2011, S. 13). Den Sicherheitskriterien der IAEA liegt eine Empfehlung der International Commission on Radiological Protection (ICRP) zugrunde, einen Dosisgrenzwert von 0.3 mSv/Jahr für Personen anzusetzen, die in der Umgebung eines Endlagers leben (NEA 2020, S. 11).

In Deutschland gelten zwei Sicherheitskriterien, die sich ebenfalls auf die effektive Dosis für Einzelpersonen beziehen (§7 EndlSiAnfV 2020). Demnach darf die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung für zu erwartende Entwicklungen höchstens im Bereich von 10 µSv/Jahr liegen und für die abweichenden Entwicklungen 100 µSv/Jahr nicht überschreitet. Vorgelagert sind zwei Sicherheitskriterien, die auf die Barrieren des Endlagers ausgerichtet sind, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht (§4 EndlSiAnfV 2020), die «wesentlichen Barrieren». Demnach ist sicherzustellen, dass für die erwarteten Entwicklungen des Endlagers insgesamt höchstens ein Anteil von  $10^{-4}$  und jährlich höchstens ein Anteil von  $10^{-9}$  sowohl der Masse als auch der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide ausgebracht wird.

In der Schweiz wird die Beurteilung anhand quantitativer Kriterien gefordert, die sich für die Langzeitsicherheit an den Kriterien der IAEA ausrichten. Nachdem der Bewertungszeitraum abgelaufen ist, «dürfen die Auswirkungen an der Oberfläche nicht wesentlich höher sein als die durchschnittliche heutige Strahlenexposition der Schweizer Bevölkerung» (ENSI 2020, S. 3). In Finnland hat die Aufsichtsbehörde eine repräsentative Person definiert. Die repräsentative Person ist ein Individuum aus der Bevölkerungsgruppe, die gegenüber einer Strahlungsquelle am stärksten exponiert ist. Die Strahlendosen, die dieses Individuum erhält, sind repräsentativ für die gesamte Bevölkerungsgruppe, der es angehört (STUK 2018, Definitions). Mit Bezug auf die Langzeitsicherheit soll die jährliche Strahlendosis für die repräsentative Person unter 0.1 mSv liegen und die durchschnittlichen Strahlendosen für andere Personen sollen unbedeutend bleiben (STUK 2018, S. 8).

Sicherheitskriterien sind ein wichtiges Instrument, um die Sicherheit eines Endlagers einzuschätzen und zu prüfen. Da Sicherheit ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept ist, sind numerischen Sicherheitskriterien aber nur ein Instrument unter anderen, das dazu beiträgt, die Sicherheit eines Endlagersystems zu beurteilen.

## Einhaltung der Sicherheitskriterien

Um zu prüfen, ob die Sicherheitskriterien eingehalten sind, muss das künftige Verhalten des Endlagersystems und seiner Umgebung prognostiziert werden. Prinzipiell wäre dies möglich, indem die zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems und seiner Umgebung modelliert werden. Begrenzte Informationen und Ressourcen führen jedoch dazu, dass eine solche umfassende und aussagekräftige Modellierung nicht möglich ist.

Daher müssen Annahmen getroffen und es muss mit Vereinfachungen gearbeitet werden. Ungewissheiten werden beispielsweise mit Konservativitäten abgefangen, also dem Bestreben, die Sicherheit systematisch zu unterschätzen. Um die Einhaltung von Sicherheitskriterien vergleichend beurteilen zu können, beispielsweise in einem Standortauswahlprozess, ist es erforderlich, die verwendeten Verfahren zu standardisieren. Wenn also geprüft werden soll, ob Sicherheitskriterien erfüllt werden, sind neben den ermittelten Zahlenwerten immer auch die Annahmen, Vereinfachungen, Konservativitäten, die gewählten Szenarien und die verwendeten Modelle mit zu beurteilen.

Die EndlSiAnfV und die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) enthalten gewisse Vorgaben zur Art und Weise, wie die Erfüllung der Sicherheitskriterien nachgewiesen werden muss, zum Beispiel: Als Referenzentwicklungen für zukünftige menschliche Aktivitäten dienen Entwicklungen, die durch derzeit übliche menschliche Aktivitäten ausgelöst werden können (§3 EndlSiAnfV 2020). Bei der Abschätzung der Strahlenexposition sind die Lebensbedingungen zum Zeitpunkt der Antragstellung für den gesamten Bewertungszeitraum zu unterstellen (§7 EndlSiAnfV 2020). Bei den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ist auf eine konsistente Vorgehensweise zu achten und insbesondere bei den weiterentwickelten und umfassenden Untersuchungen eine einheitliche Berechnungsgrundlage für die Dosisabschätzung anzuwenden (§4 EndlSiUntV 2020).

## Anmerkung zum Schutz der Umwelt

Der Schutz der Umwelt ist ein Thema, das derzeit wissenschaftlich eingehender untersucht und mit Bezug zum Strahlenschutz diskutiert wird. Organisationen wie die ICRP entwickeln Grundlagen für den Schutz der Umwelt vor ionisierender Strahlung. Angesichts der großen Vielfalt von Lebensformen und der Komplexität natürlicher Lebensgemeinschaften steht zunächst im Vordergrund, die Auswirkungen ionisierender Strahlung auf einige typische Lebensformen zuverlässig abzuschätzen. Diese Entwicklungen könnten dazu führen, dass mittelfristig konkretere Sicherheitsvorgaben formuliert werden, die auf den Schutz der Umwelt abzielen.

Als «Biosphäre» werden alle Räume der Erde bezeichnet, die von Organismen besiedelt sind. Dazu zählen auch Räume, die sich in geologischen Schichten befinden. Seit einigen Jahren befasst sich unter anderem eine Initiative, «Deep Life», innerhalb der internationalen Forschungsplattform «Deep Carbon Observatory» mit der Biosphäre im geologischen Untergrund. Bisher zeigt diese Initiative sowohl eine große Menge als auch eine große Vielfalt an unterirdischen Lebensformen, darunter überwiegend Mikroorganismen, auf (Deep Life 2020).

Aufgrund der vielfältigen Lebensformen im Untergrund, die erst ansatzweise bekannt sind, kann nicht davon ausgegangen werden, dass hochradioaktive Abfälle in einem Endlager

von der gesamten Biosphäre isoliert sind. Die Isolierung bezieht sich lediglich auf die «zugängliche Biosphäre» («accessible biosphere», IAEA 2011, S. 24). Dies ist zu berücksichtigen, wenn die Einhaltung von Schutzzielen geprüft wird, die sich auf die Umwelt beziehen.

Deep Life 2020: Deep Life. Dedicated to assessing the nature and extent of the deep microbial and viral biosphere. <https://deepcarbon.net/community/deep-life>. Abgerufen am 30.6.2020.

EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

EndlSiUntV – Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung 2020: Verordnung über die Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

Hollnagel, E. 2014: Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management. CRC Press. Boca Raton.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.

Kernenergiegesetz – KEG 2004: Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (Stand am 1. Januar 2018). SR 732.1

LPB – Landeszentrale für politische Bildung Baden-Württemberg 2020: Was ist Sicherheit? <https://www.lpb-bw.de/was-ist-sicherheit>. Abgerufen am 17.8.2020.

NEA – Nuclear Energy Agency 2020: Management and disposal of high-level radioactive waste: Global progress and solutions. NEA No. 7532. Paris.

NEA 2013: Stakeholder confidence in radioactive waste management. An annotated glossary of key terms. NEA No. 6988. Paris.

Röhlig, K.J. 2010: Das Konzept des Safety Case – Internationale Entwicklungen zur Demonstration der Langzeitsicherheit von Endlagern. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe.

Stand AG – Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr.26, S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808).

STUK – Säteilyturvakeskus 2018: Guide YVL D.5, Disposal of nuclear waste (13/2/2018). Helsinki.



## 2. Entsorgungskonzept

Welche Ungewissheiten für den Safety Case relevant sind, hängt wesentlich vom gewählten Entsorgungskonzept ab. Daher werden wesentliche Elemente eines Entsorgungskonzepts, die gewählte Entsorgungsoption, das Sicherheitskonzept und die Auslegung vorgestellt.

*Ein Entsorgungspfad ist ein spezifischer soziotechnischer Prozess, der zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen führt. Der Bewertungszeitraum, über den die Sicherheit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle untersucht werden muss, reicht weit über das Ende des Entsorgungspfads hinaus.*

*Für die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland wurde die Entsorgungsoption Endlagerung mit Reversibilität gewählt. Die technische Gestaltung eines Endlagers, die Auslegung, beruht auf einem Sicherheitskonzept. Sicherheitskonzept und Auslegung sollen auf dem Entsorgungspfad konkretisiert und optimiert werden.*

*Bis zur Stilllegung eines Endlagers nähern sich Auslegung und Safety Case auf dem Entsorgungspfad in einem iterativen Vorgehen einander an, wobei sich beide weiterentwickeln und ihr Detaillierungsgrad zunimmt.*

Die Sicherheit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle muss entlang eines bestimmten Entsorgungspfads untersucht und beurteilt werden. Ein Entsorgungspfad ist ein spezifischer soziotechnischer Prozess, der zur Entsorgung von radioaktiven Abfällen führt. Für die Entsorgung muss eine Entsorgungsoption gewählt werden, also das Konzept einer Entsorgungsanlage, mit der die dauerhafte Sicherheit von Menschen und Umwelt gewährleistet werden soll (Kreusch et al. 2019, S. 133). Als Grundlage für die technische Gestaltung der Entsorgungsanlage, die Auslegung, dient ein Sicherheitskonzept. Sicherheitskonzept und Auslegung werden auf dem Entsorgungspfad konkretisiert und optimiert.

### Entsorgungsoption

Prinzipiell stehen verschiedene Wege offen, um mit gefährlichen Abfällen im eigenen Land umzugehen:

- die Abfälle einem neuen Nutzen zuzuführen,
- sie unschädlich zu machen,
- sie so weit zu verdünnen, dass von ihnen keine nennenswerte Gefahr für bestimmte Organismen mehr ausgeht, oder
- sie einzuschließen und dauerhaft von Menschen und Umwelt zu isolieren.

Mit der Entscheidung, aus der Nutzung der Kernenergie auszusteigen, ist die Wiederverwendung hochradioaktiver Abfälle in Ländern wie Deutschland oder der Schweiz politisch kein Thema mehr. Um die Abfälle so unschädlich zu machen, dass keine weiteren, dauerhaft wirksamen Entsorgungsschritte erforderlich sind, zum Beispiel mittels Abtrennung

(«partitioning») und Transmutation, sind weder industriell umsetzbare wissenschaftlich-technische Verfahren verfügbar noch in absehbarer Zukunft in Sicht. Die Verfahren, die gegenwärtig erforscht und entwickelt werden, können lediglich Aspekte der Entsorgung wie Radiotoxizität und Wärmeproduktion beeinflussen. Die Verdünnung nicht-vernachlässigbarer Mengen von Gefahrstoffen in der Umwelt wird bereits seit langem als nicht nachhaltig beurteilt und durch internationale Regelungen wie die London Dumping Convention von 1972 und nationale Gesetzgebungen ausgeschlossen.

Bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle steht daher der Ansatz im Vordergrund, die Abfälle zu konzentrieren und von Menschen und Umwelt zu isolieren («concentrate and confine»). Überlegungen, die Abfälle in Inlandeismassen der Antarktis oder Grönlands, unter dem Meeresboden in tektonisch ruhigen Gebieten der Tiefsee von Atlantik und Pazifik, in Subduktionszonen, insbesondere des Pazifiks (Appel et al. 2015) oder in kaum besiedelten Regionen Australiens (Wikipedia 2020) zu lagern, scheiterten vor allem an Bestrebungen zum Schutz der Umwelt und am Widerstand potenziell Betroffener. International hat sich die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen als bevorzugte Entsorgungsoption durchgesetzt.

Von hochradioaktiven Abfällen geht über sehr lange Zeiträume eine erhebliche Gefahr für Menschen und Umwelt aus, auch wenn die Gefährdung aufgrund des Zerfalls von Radionukliden mit der Zeit abnimmt. In vielen Ländern ist weitgehend unbestritten, dass die Generationen, die von der Nutzung der Kernenergie profitierten, Verantwortung für die Sicherheit aller künftigen Generationen tragen, die durch die Existenz der hochradioaktiven Abfälle gefährdet sind. Daher sollen die Abfälle in einem Endlager so lange von Menschen und Umwelt isoliert werden, bis die von ihnen ausgehende Gefahr erheblich abgeklungen ist. Passive und multiple Barrieren und Sicherheitsfunktionen sollen dafür sorgen, dass Menschen und Umwelt – unabhängig von Entwicklungen, die Gesellschaft und Umwelt betreffen – geschützt sind. Die Handlungsfreiheit künftiger Generationen soll nicht dadurch eingeschränkt werden, dass sie Ressourcen für die sichere Entsorgung der Abfälle einsetzen müssen.

Bei der technischen Ausgestaltung eines Endlagers, der Auslegung, stehen Varianten im Raum, die unter anderem durch Eigenschaften des gewählten Wirtsgesteins oder die Einlagerungstechnik bedingt sind. Die Auslegung richtet sich an einem Sicherheitskonzept aus, das ebenfalls wirtsgesteinsabhängig ist.

## Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept beschreibt, wie die geforderte Sicherheit des Endlagersystems gewährleistet werden soll. Es enthält Gegebenheiten und Maßnahmen, um Sicherheit zu erreichen und aufrecht zu erhalten (GRS 2012).

Eine grundlegende international anerkannte Anforderung an Sicherheitskonzepte für Kernanlagen ist die gestaffelte Sicherheitsvorsorge. Die gestaffelte Sicherheitsvorsorge beruht auf mehreren Sicherheitsbarrieren und -funktionen. Dabei soll die Sicherheit nicht zu stark von einzelnen Barrieren und Funktionen abhängig sein. Um zu verhindern, dass einzelne Entwicklungen oder Ereignisse das Versagen mehrerer Barrieren und Funktionen zur Folge haben, werden unterschiedliche Funktionsweisen der Barrieren gefordert («Diversität»).

Während beim Betrieb eines Endlagers auf aktiv wirkende Sicherheitsmaßnahmen Bezug genommen werden kann, muss die Sicherheit nach dem Verschluss des Endlagers ausschließlich aufgrund passiv wirkender Sicherheitsvorkehrungen gewährleistet sein. Aktive Sicherheitsmaßnahmen sind auf Versorgungsfunktionen angewiesen, passive nicht (NEA 2020, S. 13; ENSI 2019; IAEA 2011, S. 24f.). Letztere erfüllen ihre Funktion, ohne dabei auf menschliches Handeln angewiesen zu sein.

Eine weitere Anforderung an Sicherheitskonzepte zielt darauf ab, Ungewissheiten zu vermeiden und zu reduzieren. Demnach soll auf Strukturen und Komponenten verzichtet werden, deren Verhalten schwer zu verstehen und vorherzusagen ist (Posiva 2008, S. 53).

Vorgaben zum Sicherheitskonzept sind in Deutschland in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020a) enthalten. Sie fordert ein Sicherheitskonzept, das das gesamte Endlagersystem einbezieht und sowohl die Errichtung als auch den Betrieb, die Stilllegung und den anschließenden Bewertungszeitraum berücksichtigt (§10 EndlSiAnfV 2020a). In der Schweiz existieren weder in der Kernenergiegesetzgebung noch in der behördlichen Richtlinie für geologische Tiefenlager direkte Vorgaben für das Sicherheitskonzept. In letzterer wird jedoch erwähnt, dass technische und natürliche Barrieren gemäß «Sicherheitskonzept passiv zur Rückhaltung von Radionukliden» beitragen müssen (ENSI 2020, S. 21f.).

Das Sicherheitskonzept stützt sich vor allem auf die Sicherheitsbarrieren und deren Sicherheitsfunktionen. Als «Barrieren» werden «alle geologischen, technischen und geotechnischen Einheiten, die in einem Endlagersystem eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern» bezeichnet. Eine sicherheitsgerichtete Eigenschaft einer Barriere (oder eines anderen Elements eines Endlagersystems) oder ein sicherheitsgerichteter Prozess wird «Sicherheitsfunktion» genannt. Die Eigenschaften von technischen oder geotechnischen Barrieren, die für die Langzeitsicherheit erforderlich sind, müssen im Sicherheitskonzept genauer bestimmt sein (§5 EndlSiAnfV 2020a).

Das Sicherheitskonzept für die Langzeitsicherheit beruht in Deutschland vor allem auf den zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems. Entsprechend ist auch die Auslegung primär auf die zu erwartenden Entwicklungen ausgerichtet. Der Einfluss anthropogener Entwicklungen und hypothetischer Entwicklungen auf die Langzeitsicherheit muss nur berücksichtigt werden, sofern dies «der weiteren Optimierung oder der Überprüfung der Robustheit des Endlagersystems dienen kann» (§ 12). Das Sicherheitskonzept gemäß §10 EndlSiAnfV 2020 ist technisch geprägt. Es soll auch einen Ablaufplan enthalten, in dem dargelegt wird, wie die Betriebssicherheit des Endlagers während der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers sichergestellt werden kann und wie die radioaktiven Abfälle in einem sicheren Zustand gehalten werden können.

Ein spezifisches Konzept für Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers muss «gestaffelte Abwehr- und Schutzmaßnahmen» für die Anlagenzustände Normalbetrieb, anormaler Betrieb, Auslegungsstörfall und auslegungsübergreifende Unfälle und Ereignisse abdecken (§17 EndlSiAnfV 2020a). Für Auslegungsstörfälle gelten die in der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV 2020) vorgesehenen Grenzwerte für Störfälle in kerntechnischen Anlagen (§104, Abs. 1 und 2). Die Auswirkungen auslegungsüberschreitender Unfälle und Ereignisse auf die Umgebung müssen soweit wie möglich begrenzt werden.

Das Sicherheitskonzept ist im Hinblick auf die Langzeit- und die Betriebssicherheit zu optimieren. Dabei muss auf Ausgewogenheit der Maßnahmen geachtet werden. Die Optimierung ist abgeschlossen, «wenn eine weitere Verbesserung der Sicherheit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden kann» (§12 EndlSiAnfV 2020a).

## Auslegung

Die anlagentechnische Gestaltung eines Endlagers wird als «Auslegung» bezeichnet. Die Auslegung eines Endlagers muss aus dem Sicherheitskonzept abgeleitet und optimiert werden (§11 EndlSiAnfV 2020a). Die Auslegung ist von vielen Gegebenheiten abhängig, darunter wesentlich vom Abfallinventar und von der geologischen Situation. Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung von generischen Endlagern in Salz in steiler sowie in flacher Lagerung (Bollingerfehr et al. 2017, 2018), Tonstein (Jobmann et al. 2015) und Kristallingestein (Bertrams et al. 2017) zeigen auf, dass Forschungs- und Untersuchungsbedarf zur Auslegung eines Endlagers besteht. Das gilt auch für das Ausbalancieren zwischen Betriebssicherheit (Leonard et al. 2018) und Langzeitsicherheit.

Während des Standortauswahlverfahrens wird in Deutschland mit vorläufigen und schrittweise weiterzuentwickelnden Sicherheitskonzepten gearbeitet. Die Sicherheit, die Standorte für ein Endlagersystem bieten können, wird anhand dieser vorläufigen Sicherheitskonzepte untersucht. Eines von ihnen wird dann auch dem Sicherheitskonzept zugrunde liegen müssen, das bei der späteren Genehmigung des Endlagers zum Tragen kommt (EndlSiAnfV 2020b, S. 31). Aus dem vorläufigen Sicherheitskonzept wird eine vorläufige Auslegung des Endlagers entwickelt (§4 EndlSiUntV 2020).

Zwischen Auslegung und Safety Case (vgl. «Der Safety Case») besteht eine Wechselbeziehung. Die Auslegung wird durch Erkenntnisse aus dem Safety Case beeinflusst. Dem Safety Case liegt eine Auslegung des Endlagers zugrunde. Auslegung und Safety Case nähern sich also in einem iterativen Vorgehen einander an, wobei sich beide weiterentwickeln und ihr Detaillierungsgrad zunimmt. Durch Entscheidungen, die auf dem Entsorgungspfad zur Auslegung getroffen werden, werden Ungewissheiten, die das Endlagersystem betreffen, zunehmend reduziert.

Appel, D.; Kreuzsch, J.; Neumann, W. 2015: Darstellung von Entsorgungsoptionen. ENT-RIA-Arbeitsbericht-01. Hannover.

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Simo Kuate, E. 2017: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. KONEKD. Abschlussbericht. DBE Technology GmbH. Peine.

Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Dörr, S., Filbert, W., Gehrke, A., Heemann, U., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Rübél, A., Weber, J. R., Wolf, J. 2017: Evaluation of methods and tools to develop safety concepts and to demonstrate safety for an HLW repository in salt. Final report. TEC-03-2017-AB. BGE Technology GmbH. Peine.

- Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Minkley, W., Buhmann, Eickemeier, R., Fahland, S., Filbert, W., Hammer, J., Kindlein, J., Knauth, M., Liu, W., D., Mönig, J., Popp, T., Prignitz, S., Reinhold, K., Simo, E., Thiemeyer, T., Völkner, E., Wolf, J. 2018: Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany. KOSINA. BGE TEC 2018-13. BGE Technology GmbH. Peine.
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020a: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020b: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Referentenentwurf vom 6. April 2020 einschließlich Begründung.
- EndlSiUntV – Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung 2020: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.
- ENSI 2019: Integrierte Aufsicht. ENSI-Bericht zur Aufsichtspraxis. Oktober 2019. Brugg.
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.
- Jobmann, M., Uhlig, L., Amelung, P., Billaux, D., Polster, M., Schmidt, H. 2015: Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland GENESIS. Abschlussbericht. DBE Technology GmbH. Peine.
- Kreusch, J.; Neumann, W.; Eckhardt A. 2019: Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle. Analyse der Chance, Risiken und Ungewissheiten. Springer Fachmedien. Wiesbaden.
- Leonard, D., Wacquier, W., Raymaekers, D. 2018: Operational safety on the design of the Belgian geological disposal facility for B&C wastes. The Integration Group for the Safety Case (IGSC) Symposium 2018. Current understanding and future direction for the geological disposal of radioactive waste. [https://www.oecd-nea.org/rwm/workshops/igsc2018/docs/documents/8.3a-2\\_\\_LEONARD\\_\\_paper.pdf](https://www.oecd-nea.org/rwm/workshops/igsc2018/docs/documents/8.3a-2__LEONARD__paper.pdf). Abgerufen am 19.6. 2020.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2012: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 4. Juni 2011 mit Corrigendum Dezember 2011 und Änderung der Vorbemerkung Dezember 2012. Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Peiffer, F., Fischer-Appelt, K. GRS. Braunschweig.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2020: Management and disposal of high-level radioactive waste: Global progress and solutions. NEA No. 7532. Paris.
- Posiva 2008: Safety Case Plan 2008. POSIVA 2008-05. Eurajoki.

StrlSchV – Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung 2020: Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. März 2020 (BGBl. I S. 748) geändert worden ist.

Wikipedia 2020: Pangea Resources. Last edited on 14 April 2020. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pangea\\_Resources](https://en.wikipedia.org/wiki/Pangea_Resources). Abgerufen am 29.6.2020.



# 3. Der Safety Case

Die Literaturstudie ist auf Ungewissheiten im Safety Case ausgerichtet. Im vorliegenden Arbeitspapier wird der Safety Case vorgestellt und einige Aspekte, die den Umgang mit Ungewissheiten betreffen, werden angesprochen.

*Der Safety Case ist eine formale Zusammenstellung von Argumenten, Belegen und Analysen, mit der die Sicherheit eines Endlagersystems über den Bewertungszeitraum dargelegt wird.*

*Ein ganzheitlicher Safety Case umfasst sowohl die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung als auch die Nachverschlussphase eines Endlagers und bezieht Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Abschnitten des Bewertungszeitraums mit ein.*

*Die Einflüsse von Menschen, Organisation und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen auf die Sicherheit eines Endlagers sind in der Betriebsphase besonders ausgeprägt. Der Übergang zu einem Safety Case, der in detaillierter Weise sowohl die Betriebs- als auch die Langzeitsicherheit und deren Wechselwirkungen umfasst, kann daher genutzt werden, um das Endlagersystem in künftigen Safety Cases verstärkt nicht nur als technisches, sondern als soziotechnisches System zu erfassen.*

Der Safety Case ist eine formale Zusammenstellung von Argumenten, Belegen und Analysen, mit der die Sicherheit eines Endlagersystems über den Bewertungszeitraum dargelegt wird. Er beinhaltet wissenschaftliche, technische und organisatorische Aspekte (NEA 2013a, S. 7; IAEA 2012, S. 1).

Die Wirksamkeit des Sicherheitskonzepts (vgl. «Sicherheitskonzept») wird mit dem Safety Case geprüft. Das Sicherheitskonzept kann im Safety Case aber auch dekonstruiert werden, um die Sicherheit zu belegen. Das geschieht, indem beispielsweise angenommen wird, dass Barrieren, die im Sicherheitskonzept vorgesehen sind, nicht existieren (HSK 2005, S. 8), indem hypothetische Entwicklungen betrachtet und «What if»-Szenarien verwendet werden. «What if»-Szenarien sind Szenarien, die sehr unwahrscheinlich sind, denen sich keine Wahrscheinlichkeit zuordnen lässt oder die sogar ausgeschlossen werden können.

Der Safety Case stellt eine wichtige Grundlage für Genehmigungen dar, wird jedoch auch herangezogen, um andere Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad zu treffen. Solche Entscheidungen können die Erkundung einer Region oder eines Standorts betreffen, die Auswahl eines Standortes, die Auswahl von Endlagerkonzepten zur Weiterentwicklung bzw. Optimierung, die Errichtung eines Endlagers, den Beginn und die Fortsetzung des Endlagerbetriebs, den Verschluss des Endlagers sowie Programme für Standorterkundung, Forschung und Entwicklung (TRANSENS 2020).

Mit dem Berichtswerk des Safety Case wurden die vorangehenden Sicherheitsanalysen weiterentwickelt. Der Safety Case entstand aus der Erkenntnis heraus, dass sich die Sicherheit eines Endlagers nicht allein mit Berechnungen nachweisen lässt, sondern umfassender belegt werden muss, damit Vertrauen in die Sicherheit entsteht (Röhlig 2010,



S. 103). Inzwischen ist der Safety Case in den Regelwerken der International Atomic Energy Agency (IAEA) und den Dokumenten der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD sowie in vielen nationalen Regelwerken verankert. An seiner Weiterentwicklung wird in Gremien wie der Integration Group for the Safety Case (IGSC) der NEA gearbeitet.

Der Aufbau von Safety Cases variiert unter anderem in Abhängigkeit von Regelwerken, dem gewählten Sicherheitskonzept und den Entscheidungen, für die der Safety Case als Grundlage dienen soll. In der folgenden Abbildung ist beispielhaft der Aufbau der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben dargestellt. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich Safety Case und Endlagerauslegung gegenseitig beeinflussen (vgl. «Auslegung»). Dem Umgang mit Ungewissheiten ist hier kein spezifisches Arbeitspaket gewidmet.

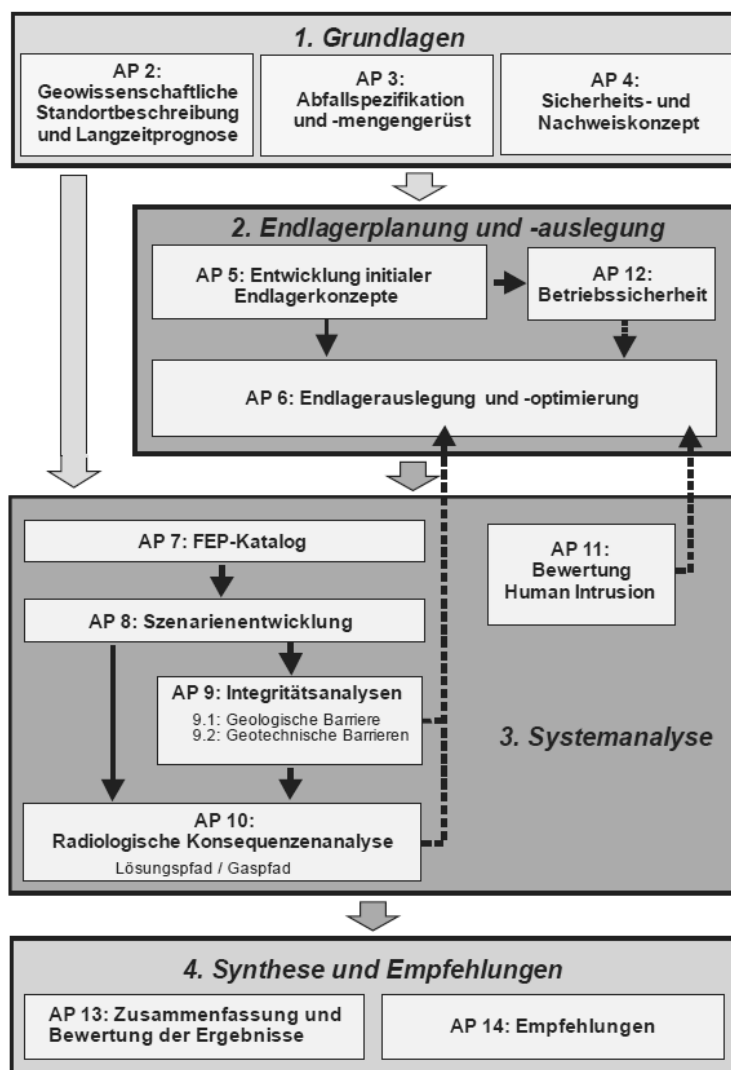


Abbildung 3-1: Strukturplan der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (GRS 2013, S. 19). Der Strukturplan zeigt die möglichen Rückwirkungen der Systemanalyse auf Endlagerplanung und -auslegung aus. Zum Umgang mit Ungewissheiten wird kein spezifisches Arbeitspaket ausgewiesen.

Aufmerksamkeit und Akzeptanz für den Safety Case sind bei Beteiligten, Betroffenen und Interessierten unterschiedlich ausgeprägt (Röhlig & Eckhardt 2017).

## Zeitlicher Betrachtungsumfang des Safety Case

In frühen Phasen von Entsorgungsprogrammen sind Safety Cases typischerweise vor allem auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers ausgerichtet, weil zur Bau- und Betriebsphase noch zu wenige Informationen zur Verfügung stehen. Um die Bau- und Betriebssicherheit zu analysieren und zu beurteilen stehen Instrumente zur Verfügung, die auf einer etablierten Praxis zur Genehmigung von Bauvorhaben sowie zur Genehmigung des Betriebs und der Stilllegung von Anlagen mit gefährlichen Stoffen, insbesondere von Kernanlagen, beruhen. Diese Instrumente müssen allerdings an die spezifischen Anforderungen eines Endlagers angepasst werden.

Das Verhältnis von Vor- und Nachverschlussphase wirft einige Fragen auf, die sich nur mit einem Safety Case beantworten lassen, der sowohl die Langzeitsicherheit als auch die Bau- und Betriebssicherheit umfasst. Diskutiert werden beispielsweise Zielkonflikte, die das Monitoring eines Endlagers betreffen: Zweck des auf eine mögliche Rückholung der Abfälle ausgerichteten Monitorings ist die Vorsorge gegen Ungewissheiten. Allerdings werden Menschen durch das rückholungsbezogene Monitoring zusätzlichen Risiken ausgesetzt, beispielsweise bei der Errichtung von Monitoringstrecken oder beim Austauschen defekter Sensoren für das Monitoring. Wie soll mit diesen Zielkonflikten umgegangen werden (Kreusch et al. 2019)? Das sicherheitsgerichtete Prinzip der Reversibilität spricht dafür, das Endlager lange zugänglich zu halten, bringt aber auch die Verpflichtung mit sich, das Lager weiter zu überwachen (Ott & Semper 2017), unter anderem, weil die verlängerte Offenhaltung zusätzliche Sicherheitsrisiken hervorbringt. Schwere Unfälle während des Betriebs eines Endlagers können direkte Schäden bei Menschen, Umwelt und Sachwerten hervorrufen. Unter Umständen beeinflussen sie auch die Langzeitsicherheit eines Endlagers. Die mit schweren Unfällen verbundenen Risiken sind daher bei einem Endlager anders zu bewerten als bei einer Anlage, in der Abfälle nur vorübergehend gelagert werden. Zwischen dem Safety Case für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung und dem Safety Case zur Langzeitsicherheit muss ein Bezug hergestellt werden.

Errichtung und Betrieb eines Endlagers beanspruchen mehrere Jahrzehnte. In Deutschland ist geplant, das Endlager für hochradioaktive Abfälle um das Jahr 2055, in der Schweiz, um das Jahr 2060 in Betrieb zu nehmen. Der Verschluss wird in der Schweiz gegen 2125 erwartet und ist in Deutschland um 2135 vorgesehen. Über diese Zeiträume werden Veränderungen der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen auftreten, die zum Beispiel Sicherheitspolitik, Wirtschaft und Technologieentwicklung betreffen und für die Sicherheit des Endlagersystems relevant werden können. Daher liegt nahe, zu fordern, dass der Safety Case nicht nur auf lange Zeiträume, sondern stark auch auf die kommenden Jahrzehnte ausgerichtet wird (Eckhardt & Rippe 2016, S.12), um zu belegen, dass ein Endlager sicher errichtet, betrieben und verschlossen werden kann, bevor es dauerhafte passive Sicherheit gewährleistet.

Mit dem International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal (GEOSAF) arbeitet die IAEA seit 2008 auf einen ganzheitlichen Safety Case hin, der sowohl die Betriebs- als auch die Nachverschlussphase eines Endlagers umfasst (IAEA 2021). Werden die Möglichkeiten, ein Endlager zu beaufsichtigen, in den Vordergrund gestellt, so kann zwischen drei Phasen unterschieden werden (NEA 2020, S. 11):

- einer Phase, in der das Endlager betrieben wird und sich direkt überwachen lässt

- einer Phase, in der das Lager teilweise oder ganz verschlossen ist und weiter beaufsichtigt werden kann
- einer Phase, in der die Informationen zum Endlager verloren gegangen sein können

Bis zum Verschluss des Endlagers müssen Umfang und Bearbeitungstiefe des Safety Case immer wieder dem jeweiligen Stand des Verfahrens angepasst werden. Für die Rolle des Safety Cases auf dem Entsorgungspfad und die spezifischen Anforderungen an aufeinander aufbauenden Safety Cases bietet idealerweise eine übergeordnete Planung Orientierung, die das jeweilige nationale Entsorgungsprogramm (vgl. zum Beispiel Nagra 2016; BMU 2015) ergänzt oder Bestandteil des Entsorgungsprogramms ist.

Zu Beginn eines Entsorgungspfades bestehen unvermeidliche Ungewissheiten, beispielsweise zur Wahl des Wirtsgesteins, zum Standort des Endlagers, zu Merkmalen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder zur Einlagerungstechnik. Diese bekannten Unbekannten (vgl. «Bekanntes und Unbekanntes») werden mit zunehmendem Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad abgebaut. Es ist aber damit zu rechnen, dass mit zusätzlichem Wissen über das Endlagersystem auch neue, spezifischere Fragen aufgeworfen und damit zusätzliche Ungewissheiten identifiziert werden.

## Umfang des betrachteten Endlagersystems

Der Safety Case zur Langzeitsicherheit bezieht sich auf das verschlossene untertägige Endlager für hochradioaktive Abfälle. Möglicherweise kann in späteren Safety Cases für die Zeit direkt nach dem Verschluss des Endlagers Bezug auf übertägige Vorkehrungen zum Monitoring genommen werden, auf Maßnahmen zum Langzeit-Wissenserhalt oder auf Markierungen des Endlagers. Das könnte zum Beispiel im Safety Case der Fall sein, der als Grundlage für den Verschluss des Endlagers geführt wird. In heutigen Katalogen von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen (features, events and processes, FEPs) eines Endlagersystems wird der Wissenstransfer angesprochen, aber noch keine Annahmen dazu getroffen, ob Teile des Endlagersystems dabei eine Rolle spielen werden.

Während des Einlagerungsbetriebs umfasst ein Endlager zusätzlich zum untertägigen Teil Oberflächenanlagen wie beispielsweise ein Pufferlager oder eine Umladezelle, ggf. auch eine Konditionierungsanlage. Voraussichtlich werden parallel zum Einlagerungsbetrieb neue Einlagerungstrecken aufgeföhren und bereits beladene verschlossen, so dass neben dem Einlagerungsbetrieb auch bauliche Aktivitäten im Safety Case zu berücksichtigen sind (Eckhardt 2018). Dabei kann auf Erfahrungen mit dem Betrieb von Kernanlagen und aus Untertagebauprojekten zurückgegriffen werden. Für einen Safety Case, der den Betrieb des Endlagers abdecken soll, ist jedoch noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten (IAEA 2021; GEOSAF 2021; GEOSAF 2011). Dazu zählt auch, die grundlegenden Sicherheitsanforderungen zu identifizieren oder zu formulieren, die das Endlagersystem während des Betriebs und bei der Stilllegung erfüllen muss.

Ausgehend vom verschlossenen passiv sicheren Endlager, das im klassischen Safety Case zur Langzeitsicherheit betrachtet wird, wird das Endlagersystem bisher vor allem als technisches System verstanden und untersucht. Der Übergang zu einem ganzheitlichen Safety Case, der auch Errichtung, Betrieb und Stilllegung des Endlagers in detaillierter Weise um-

fasst, bietet eine Chance, künftig Safety Cases durchzuführen, die stärker auf das soziotechnische System der Endlagerung ausgerichtet sind. In diesem soziotechnischen System leisten nicht nur die passiven Sicherheitsbarrieren, sondern auch weitere «Abwehrschichten» (vgl. «Modell der gestaffelten Abwehrschichten») wesentliche Beiträge zur Sicherheit.

Ein Safety Case zur Langzeitsicherheit wird vor allem auf der Grundlage natur- und ingenieurwissenschaftlichen Wissens entwickelt, mit Unterstützung aus der Mathematik und der Informatik. Wird der Safety Case auf die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers ausgeweitet und rückt das Endlagersystem als soziotechnisches System in den Vordergrund, müssen vermehrt auch geistes- und sozialwissenschaftliche Erkenntnisse eingebunden werden, zum Beispiel aus der Organisationspsychologie und der Ökonomie.

Die IAEA fordert, Steuerungs- und Kontrollmassnahmen sowie die behördliche Aufsicht in den Safety Case einzubeziehen (IAEA 2011, S. 32). Sie beschreibt den Safety Case als Sammlung von Argumenten und Nachweisen zur Unterstützung der Sicherheit eines Endlagers, die auch betriebliche Aspekte umfasst. Zu den Gegenständen des Safety Case zählen die Angemessenheit und Qualität aller sicherheitsrelevanten Arbeiten im Zusammenhang mit einem Endlagersystem (IAEA 2012, S.1). Organisatorische Aspekte (IAEA 2012, S. 29), betriebswirtschaftliche Strukturen und Prozesse (IAEA 2012, S. 4) sollen betrachtet werden, wobei diese allgemeinen Forderungen jedoch nicht näher konkretisiert werden. In der Praxis haben betriebliche Aspekte oder Fragen der Governance bisher erst wenig Eingang in Safety Cases gefunden.

## Einbezug von Sicherung und Kernmaterialüberwachung

Beim Umgang mit Risiken, die mit technischen Anlagen in Verbindung stehen, wird zwischen Sicherheit («safety») und Sicherung («security») unterschieden (vgl. zum Beispiel IAEA 2018).

Sicherung ist ebenso wie Sicherheit ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept (vgl. «Sicherheit»; NEA 2013b, S. 39). Sicherheit bezieht sich auf Gefährdungen, die nicht beabsichtigt sind. Beispiele für solche Gefährdungen sind Erdbeben, Wassereinträge oder unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in ein verschlossenes Endlager. Sicherung dagegen ist auf beabsichtigte Gefährdungen ausgerichtet wie Sabotage, kriminelle Angriffe auf die informationstechnische Infrastruktur während dem Betrieb eines Endlagers oder terroristische Anschläge auf ein Endlager. In den Bereich der Sicherung fällt auch die Kernmaterialüberwachung, mit der die Weiterverbreitung von Atomwaffen verhindert werden soll.

Um die Sicherheit eines Endlagers zu belegen sind andere Instrumente erforderlich als um die Sicherung zu belegen. In den Bereichen der Sicherheit und Sicherung treffen außerdem zwei unterschiedliche Arbeitsweisen und Kulturen aufeinander:

Im Bereich der Sicherheit von Kernanlagen haben Offenheit und Transparenz einen hohen Stellenwert erlangt. Methoden und Instrumente werden publiziert und international ausgetauscht. Gefährdungen sind beständig, Veränderungen der Gefährdungslage werden im Allgemeinen entweder durch neue Erfahrungen und wissenschaftliche Erkenntnisse oder durch allmähliche Entwicklungen wie den Klimawandel verursacht. Ungewissheiten sind zu einem erheblichen Teil quantifizierbar oder zumindest einschätzbar.

Bei der Sicherung sind die Gefährdungslagen volatiler. Erkenntnisse zur Bedrohungssituation, wie sie beispielsweise bei Nachrichtendiensten vorliegen, werden aus guten Gründen geheim gehalten – in erster Linie, um kriminellen, terroristischen oder feindlich gesinnten staatlichen Organisationen keine Hinweise auf Schwachstellen oder Ideen für Angriffstechniken zu vermitteln. Offenheit und Transparenz sind beschränkt. Wesentliche Ungewissheiten sind nicht quantifizierbar.

Entsprechend trennt die IAEA mit ihren Safety und Security Series auch klar zwischen Sicherheit und Sicherung. Der Safety Case fokussiert auf die Sicherheit (IAEA 2012, S. 2) – allerdings mit dem Verweis darauf, dass Vorkehrungen, die der Sicherheit dienen, oft auch die Sicherung stärken (IAEA 2012, S. 79). In Deutschland fordert die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung, im Sicherheitskonzept für ein Endlager vor Abschluss von dessen Stilllegung auch Sicherung und Kernmaterialüberwachung einzubeziehen (§10 EndISiAnV 2020).

Auch wenn die getrennte Bearbeitung von Sicherheits- und Sicherungsaspekten oft sinnvoll ist, sind im Safety Case also auch wechselseitige Abhängigkeiten von Sicherheit und Sicherung zu berücksichtigen. Wird ein ganzheitlicher Umgang mit Risiken und Ungewissheiten angestrebt, sollten grundlegende Aspekte der Sicherung, die nicht der Geheimhaltung unterliegen, vermehrt in den Safety Case einbezogen werden, um den Umgang mit sicherheitsrelevanten Verknüpfungen beider Bereiche zu verbessern.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2015: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Bonn/Berlin.

Eckhardt, A. 2018: Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle. ENTRIA Arbeitsbericht-12. Zürich.

EndISiAnV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

GEOSAF – International Project on Demonstrating the Safety of Geological Disposal 2021: Managing integration of pre-closure activities and post-closure safety in the safety case for geological disposal. Draft. Stand am 7.1.2021. GEOSAF II. Wien.

GEOSAF 2011: GEOSAF operational safety working group. Main outcomes. GEOSAF Position paper on operational safety. GEOSAF I. Wien.

GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2013: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Fischer-Appelt, K.; Baltés, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J. GRS-290.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2021: International project on demonstrating the safety of geological disposal. <https://www.iaea.org/topics/disposal/international-project-on-demonstrating-the-safety-of-geological-disposal>. Abgerufen am 7.1.2021.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2018: IAEA Safety Glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. 2018 Edition. Wien.

- IAEA 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific Safety Guide No. SSG-23. Wien.
- IAEA 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.
- Kreusch, J.; Neumann, W.; Eckhardt A. 2019: Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle. Analyse der Chance, Risiken und Ungewissheiten. Springer Fachmedien. Wiesbaden.
- Nagra – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle 2016: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Technischer Bericht 16-01. Wettlingen.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2020: Management and disposal of high-level radioactive waste: Global progress and solutions. NEA No. 7532. Paris.
- NEA 2013a: The nature and purpose of the post-closure safety cases for geological repositories. Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2013)1. Paris.
- NEA 2013b: Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management. An Annotated Glossary of Key Terms. NEA No. 6988. Paris.
- Ott, K.; Semper, F. 2017: Nicht von meiner Welt. Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. GAIA 26/2 (2017): 100–102. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.9>.
- Röhlig, K.J.; Eckhardt, A. 2017: Primat der Sicherheit. Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? GAIA 26/2 (2017): 103 –105.
- Röhlig, K.J. 2010: Das Konzept des Safety Case – Internationale Entwicklungen zur Demonstration der Langzeitsicherheit von Endlagern. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe.
- TRANSENS – Transdisziplinäre Forschung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland 2020: Glossar. Stand am 30.8.2020.



# 4. Ungewissheit und Unsicherheit

Der Begriff Ungewissheiten wird in verschiedenen Kontexten unterschiedlich definiert und verwendet. Im Arbeitspapier wird daher das Verständnis von Ungewissheiten erläutert, das der Literaturstudie zugrunde liegt.

*Der Umgang mit Ungewissheiten ist ein wichtiger Bestandteil des Safety Case. Im Safety Case besteht Ungewissheit, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um die Möglichkeit eines Schadens im Bewertungszeitraum einzuschätzen.*

*Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case hat sich international ein schrittweises Vorgehen etabliert, das sowohl innerhalb jedes Safety Cases als auch während dem Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad bis zum Verschluss des Endlagers mit aufeinanderfolgenden Safety Cases iterativ durchlaufen wird.*

Ungewissheiten spielen bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und im Safety Case eine erhebliche Rolle – unter anderem aufgrund der langen Zeiträume, über die die Sicherheit des Endlagersystems bewertet werden soll, der Komplexität des soziotechnischen Endlagersystems und räumlicher Heterogenitäten. Der Umgang mit Ungewissheiten ist ein wichtiger Bestandteil des Safety Case (IAEA 2012, S. 15).

Ungewissheit bezüglich künftiger Entwicklungen wird im Diskurs zum Safety Case oft angesprochen, insbesondere von der interessierten Öffentlichkeit. Klimawandel und technologischer Fortschritt sind aktuelle Themen, die Fragen dazu aufwerfen, ob die Sicherheit eines Endlagers tatsächlich über hunderte und tausende von Jahren gewährleistet werden kann. Unterschiedliche Haltungen und Besorgnisse in Zusammenhang mit Ungewissheiten leisten vermutlich einen Beitrag dazu, dass die Akzeptanz für den Safety Case bei Beteiligten, Betroffenen und Interessierten unterschiedlich ausgeprägt ist (Röhlig & Eckhardt 2017).

Ungewissheit und Unsicherheit sind also als Begriffe im Kontext des Safety Case präsent. Nicht immer ist jedoch klar, was mit «Ungewissheit» und «Unsicherheit» gemeint ist.

## Verständnis von Ungewissheit

Ähnlich wie «Risiko» werden auch die Begriffe «Ungewissheit» und «Unsicherheit» in verschiedenen Fachdisziplinen und Teilen der interessierten Öffentlichkeit unterschiedlich verstanden. Manchmal wird Risiko als eine Form von Ungewissheit angesehen, manchmal Ungewissheit auf Elemente des Risikos bezogen. Manchmal werden Ungewissheit und Risiko als unterschiedliche Konzepte, manchmal als Synonyme betrachtet. Einige Beispiele für Definitionen von Ungewissheit im Kontext von Risiko und Sicherheit sind:



- Ungewissheit bezieht sich auf epistemische Situationen mit unvollständigen oder unbekanntem Informationen («Uncertainty refers to epistemic situations involving imperfect or unknown information») (Wikipedia 2020a)
- Ungewissheit bezeichnet eine kognitive Situation, bei der ein Mangel an Wissen vorliegt (Elster 1979, interpretiert in Bonß 1995, S. 36)
- Ungewissheit entsteht aus unvollkommenem Wissen über die Zukunft (Redlich 1957, zitiert in Bonß 1995, S. 37)
- Ungewissheit ist ein Risiko, dessen Wert nicht bekannt ist (Knight 1920, besprochen in Dizikes 2010)
- Risiko ist die Möglichkeit eines Schadens. Ungewissheit besteht, wenn sich das Schadenausmaß, die Eintrittswahrscheinlichkeit oder beide nicht einschätzen lassen (Eckhardt & Rippe 2016, S. 19 f.).
- Risiko ist die Möglichkeit eines Schadens mit kalkulierbarer Eintrittswahrscheinlichkeit. Bei Ungewissheit ist der Schaden kalkulierbar, nicht jedoch die Eintrittswahrscheinlichkeit (Wikipedia 2020c).
- Risiko beinhaltet Ungewissheit über die Auswirkungen einer Handlung (Wikipedia 2020b).
- Risiko bezieht sich auf Ungewissheit zu den Folgen einer Aktivität oder eines Ereignisses auf von Menschen geschätzte Werte («Risk refers to uncertainty about and the severity of the consequences of an activity or event with respect to something that humans value») (IRGC 2017, S. 5).
- Der Unterschied zwischen Ungewissheit und Risiko ist irrelevant. In beiden Fällen wird ein Schaden mit Eintrittswahrscheinlichkeiten verbunden, auch wenn diese nur schwer einschätzbar sind (Roser 2017).

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) und die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD verzichten in ihren Glossaren darauf, Ungewissheit («uncertainty») explizit zu definieren. Die IAEA verweist auf die Unterscheidung zwischen aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten (IAEA 2018, S. 234) und erwähnt, dass Ungewissheit sowohl als Bestandteil von «Risiko» als auch als ein Merkmal der Einschätzung von Risiken verstanden werden kann (IAEA 2018, S. 202). Die NEA verwendet den Begriff «uncertainty» in ihrem Glossar zum «Stakeholder Confidence in Radioactive Waste Management» zwar, hat ihn aber nicht als einen der Schlüsselbegriffe ausgewählt, auf die genauer eingegangen wird (NEA 2013).

Die Ansätze, den Begriff «Ungewissheiten» zu definieren, unterscheiden sich also teilweise fundamental voneinander. Eine Definition, die Aspekte des aktuellen Diskurses abdeckt und gleichzeitig anschlussfähig an die bisherige Praxis im Safety Case ist, lautet:

Ungewissheit besteht im Safety Case dort, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um die Möglichkeit eines Schadens im Bewertungszeitraum zu einschätzen.

## Verwendung des Begriffs Unsicherheit

Im englischen Sprachraum wird im Kontext des Safety Case von «uncertainty» gesprochen. Im Deutschen existieren zwei Begriffe, die «uncertainty» inhaltlich entsprechen: «Ungewissheit» und «Unsicherheit».

«Unsicherheit» hat sich im technischen Umfeld, im Kontext von Modellierungen und im Zusammenhang mit «Unsicherheitsanalysen» etabliert. Unsicherheitsanalysen zeigen auf, wie aussagekräftig die Ergebnisse von Analysen, Berechnungen und Modellierungen sind. Insbesondere können mit einer Unsicherheitsanalyse auch die Auswirkungen von Ungewissheiten auf das Ergebnis einer Risiko- oder Sicherheitsanalyse geprüft werden. Das Verständnis von Unsicherheit, das der Unsicherheitsanalyse zugrunde liegt, ist in Naturwissenschaften und Technik verbreitet, wo Unsicherheit oft einen Mangel an Reliabilität, der formalen Genauigkeit bzw. Verlässlichkeit von Messungen, und Validität, einem Gütekriterium für Modelle, Mess- oder Testverfahren (Wikipedia 2020d) bezeichnet. Der aktuelle Gebrauch des Begriffs «Unsicherheiten» im Kontext des Safety Case tendiert denn auch in Richtung der quantifizierbaren Ungewissheiten (vgl. «Formen der Beschreibung von Ungewissheiten»).

«Unsicherheit» wird in der Schweiz in der Richtlinie, in der die grundlegenden behördlichen Sicherheitsanforderungen an ein geologisches Tiefenlager festgelegt sind, im Sinn der oben definierten Ungewissheit gebraucht (ENSI 2020). In untergeordneten Anforderungen ist im gleichen Kontext von Ungewissheit die Rede (ENSI 2010), was darauf hindeutet, dass «Unsicherheit» und «Ungewissheit» synonym verwendet werden können.

In der Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV 2020) wird konsequent von Ungewissheiten gesprochen, mit Ausnahme des bereits erwähnten etablierten Begriffs der «Unsicherheitsanalyse». Diese Terminologie wurde auch in der Vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben verwendet.

Daher wird dafür plädiert, bei Regelungen, die den Safety Case betreffen, nur noch den Begriff «Ungewissheit» zu verwenden, und den Begriff «Unsicherheit» dort lediglich als Teil der etablierten Bezeichnung «Unsicherheitsanalyse» zu gebrauchen.

Bonß, W. 1995: Vom Risiko – Unsicherheit und Ungewißheit in der Moderne. Hamburger Edition. Hamburg.

Dizikes, P. 2010: Explained: Knightian uncertainty. The economic crisis has revived an old philosophical idea about risk and uncertainty. But what is it, exactly? MIT News. <http://news.mit.edu/2010/explained-knightian-0602>. Abgerufen am 6.6.2020.

Eckhardt, A.; Rippe, K.P. 2016: Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf-Verlag. Zürich.

EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020a: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

ENSI 2010: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Brugg.

- IAEA – International Atomic Energy Agency 2018: IAEA Safety Glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. 2018 Edition. Wien.
- IAEA 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific safety guide No. SSG-23. Wien.
- IRGC – International Risk Governance Council 2017: Introduction to the IRGC risk governance framework. Revised Version 2017. Lausanne.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2013: Stakeholder confidence in radioactive waste management. An annotated glossary of key terms. NEA No. 6988. Paris.
- Röhlig, K.J.; Eckhardt, A. 2017: Primat der Sicherheit. Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? GAIA 26/2 (2017): 103 –105.
- Roser, D. 2017: The irrelevance of the risk-uncertainty distinction. Sci Eng Ethics 23, 1387–1407. <https://doi.org/10.1007/s11948-017-9919-x>.
- Wikipedia 2020a: Uncertainty. <https://en.wikipedia.org/wiki/Uncertainty>. Abgerufen am 6.6.2020.
- Wikipedia 2020b: Risk. <https://en.wikipedia.org/wiki/Risk>. Abgerufen am 6.6.2020.
- Wikipedia 2020c: Risiko. <https://de.wikipedia.org/wiki/Risiko>. Abgerufen am 6.6.2020.
- Wikipedia 2020d: Unsicherheit. <https://de.wikipedia.org/wiki/Unsicherheit>. Abgerufen am 7.6.2020.

# 5. Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität

Ungewissheit bezieht sich auf fehlende oder nicht eindeutige Information. Diese Information ist wesentlich, um zu verstehen, welche Eigenschaften das Endlagersystem aufweist und wie es sich verhält. Im Arbeitspapier wird besprochen, wie Realität im Safety Case erkannt wird.

*Gewissheit ist möglich, wenn eine Realität existiert, die verstanden werden kann. Die Realität, die im Safety Case untersucht wird, ist das Endlagersystem für hochradioaktive Abfälle – mit seinen sozialen, technischen und natürlichen Komponenten – und dessen Entwicklung im Bewertungszeitraum.*

*Die Ungewissheiten zur Entwicklung des Endlagersystems wachsen umso mehr an, je weiter der Untersuchungszeitraum in die Zukunft hinein reicht. Damit die Ungewissheiten dennoch akzeptabel bleiben, soll die Sicherheit des Endlagers wesentlich auf einem stabilen geologischen Umfeld beruhen, das sich im Lauf der Zeit nur langsam verändert. Ungewissheiten nehmen auch mit der Komplexität des Endlagersystems und dem Vorhandensein räumlicher Heterogenitäten zu. Deshalb wird angestrebt, Endlagersysteme möglichst einfach zu gestalten. Mit der Wahl eines homogenen Wirtsgesteinskörpers sollen Ungewissheiten zu räumlichen Heterogenitäten geringgehalten werden.*

*Dennoch verbleiben zahlreiche Ungewissheiten, mit denen im Safety Case umgegangen werden muss.*

Von Ungewissheiten zu sprechen, setzt voraus, dass es Gewissheiten gibt, dass also eine Realität existiert, die verstanden werden kann. Die Realität, die im Safety Case untersucht wird, ist ein Endlagersystem für radioaktive Abfälle – mit seinen sozialen, technischen und natürlichen Komponenten – und dessen Entwicklung im Bewertungszeitraum.

Gewissheit besteht im Safety Case dort, wo ausreichende Informationen vorhanden sind, um die Möglichkeit eines Schadens einzuschätzen, und diese Informationen eindeutig sind. Ungewissheit liegt vor, wenn entsprechende Informationen fehlen oder nicht eindeutig sind.

Gewissheit und Ungewissheit beziehen sich darauf, ob Informationen im Kontext des Safety Case generell verfügbar sind und zur Kenntnis genommen werden (vgl. «Bekannte und Unbekannte»). Ungewissheiten, die sich auf den spezifischen Informationsstand einzelner Personen oder Organisationen beziehen, also «individuelle Ungewissheiten», werden im vorliegenden TRANSENS-Bericht nicht behandelt.

## Ungewissheit und Zeit

Eine wesentliche Ursache dafür, dass Ungewissheiten im Safety Case behandelt und diskutiert werden, ist der Zeitraum von einer Million Jahren, über den in Deutschland entsprechend der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV 2020) die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle dokumentiert werden muss.

Ungewissheiten über die Zukunft lassen sich in drei Kategorien einteilen (nach Øhrstrøm 2004, S. 229 f.):

1. Ungewissheit, ob es eine Zukunft gibt
2. Ungewissheit, welche der möglichen Zukünfte eintreten wird
3. Ungewissheiten zu unbekanntem Unbekanntem

Da sich die Spannbreite der möglichen Zukünfte mit der Zeit immer weiter auffächert, wachsen die Ungewissheiten im Safety Case mit der Dauer des Bewertungszeitraums an.

Dieser Problematik wird begegnet, indem hochradioaktive Abfälle in einem Umfeld entsorgt werden, das sich im Lauf der Zeit nur langsam verändert – in stabilen Formationen des tiefen geologischen Untergrunds. Im weiteren Umfeld eines Endlagers finden jedoch Entwicklungen statt, die mit höheren Geschwindigkeiten ablaufen, insbesondere anthropogene Entwicklungen wie Technologieentwicklung, Raumnutzung und von Menschen verursachter Klimawandel.

Wenn die Langzeitsicherheit eines Endlagers untersucht werden soll, stößt die empirische natur- und ingenieurwissenschaftliche Forschung an Grenzen. Um die Sicherheit eines Endlagers nachzuweisen, können keine Experimente unter Endlagerbedingungen durchgeführt werden, die hunderte oder tausende von Jahren beanspruchen. Langfristige Entwicklungen müssen vielmehr aus den Ergebnissen von Experimenten, die höchstens wenige Jahrzehnte dauern, oder aus der Untersuchung vergangener Entwicklungen extrapoliert werden (vgl. «Herleiten künftiger Entwicklungen»).

Prospektives Wissen zu anthropogenen Entwicklungen lässt sich nicht empirisch überprüfen, so dass es schwierig wird, «die Differenz zwischen Wissen und bloßem Meinen aufrechtzuerhalten». Daher sind Prognosen künftiger Entwicklungen nicht nur ungewiss, sondern auch normativ geprägt und häufig umstritten (Grunwald 2007, S. 57), insbesondere wenn es um von Menschen verursachte Entwicklungen geht.

## Ungewissheit und Raum

Die Sicherheit eines Endlagers, bei dem ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich die Abfälle einschließt, wird wesentlich vom geologischen Umfeld des Endlagerbergwerks, insbesondere der Einlagerungstrecken, bestimmt. Damit dieses Umfeld seine Funktionen für die Sicherheit angemessen wahrnehmen kann, muss es möglichst ungestört belassen werden. Insbesondere invasive Untersuchungen sind Grenzen gesetzt. Bei einem solchen Endlagersystem verbleiben daher aus heutiger Perspektive immer Ungewissheiten, die auf die natürliche Heterogenität geologischer Formationen zurückgehen.

Bei der Wahl eines Standorts für ein Endlager wird angestrebt, diese Ungewissheiten gering zu halten. In Deutschland sollen «die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

beziehungsweise des Wirtsgesteinskörpers großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet» sein, damit sie sich zuverlässig räumlich charakterisieren lassen (Endlager-Kommission 2016, S. 317). In der Schweiz wird ein Wirtsgestein günstig beurteilt, wenn seine Eigenschaften «möglichst homogen sind und ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können» (BFE 2011, S. 56).

Räumliche Variabilität zeigt auch das geologische Umfeld eines Endlagers, dessen Sicherheitskonzept keinen einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorsieht. Sie betrifft zudem das Deckgebirge, die Biosphäre und die Anthroposphäre im Umfeld eines Endlagers.

## Ungewissheit und Komplexität

Die Komplexität eines Systems steigt mit Anzahl seiner Elemente und der Wechselwirkungen zwischen den Elementen an. Mit der Komplexität wachsen tendenziell auch die Ungewissheiten. Während sich das Verhalten eines einfachen, überschaubaren Systems in der Regel gut verstehen lässt, ist es anspruchsvoll bis unmöglich, das Verhalten komplexer Systeme vollständig zu verstehen und künftige Entwicklungen zu prognostizieren. Aufgrund unerwarteter Wechselwirkungen zwischen einzelnen Fehlern oder Versagensereignissen und aufgrund der Fortpflanzung und Überlagerung von Ungewissheiten steigt bei komplexen Systemen die Gefahr unerwarteter Schadenereignisse an (Perrow 1992).

Das Endlagersystem ist ein komplexes System, das aus einer Vielzahl von natürlichen, technischen und sozialen Elementen besteht. Der aktuelle Katalog der Merkmale, Ereignisse und Abläufe (features, events and processes, FEPs) der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD umfasst 166 Seiten (NEA 2019) und ist damit, seit die erste Version im Jahr 2000 erschien, auf fast das Doppelte angewachsen – unter anderem durch die Erweiterung um weitere FEPs. In der Praxis stellen bereits die Vielzahl der physikalischen und chemischen Prozesse und deren Wechselwirkungen im Nahfeld der Abfälle eine große Herausforderung für das phänomenologische Verständnis und die Modellierung im Safety Case dar.

Indem die Komplexität möglichst geringgehalten wird, lassen sich die mit einem Endlager für hochradioaktive Abfälle verbundenen Ungewissheiten vermindern. Im Vordergrund stehen dabei einfache geologische Verhältnisse und einfache technische Konzepte (Chapman & McCombie, 2003, S. 197).

BFE – Bundesamt für Energie 2011: Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Bern.

Chapman, N., McCombie, C. 2003: Principles and standards for the disposal of long-lived radioactive waste. Pergamon/Elsevier Science. Amsterdam.

Endlager-Kommission – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.

- Grunwald, A. 2007: Umstrittene Zukünfte und rationale Abwägung. Prospektives Folgenwissen in der Technikfolgenabschätzung. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis Nr. 1, 16. Jg. S. 54–63.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.
- Øhrstrøm, P. 2004: The uncertainty of the future. S. 229-244. In: Harris, P. & Crawford, M. (Eds.): Time and uncertainty. The study of time, Volume XI. Koninklijke Brill NV. Leiden.
- Perrow, Ch. 1992: Normale Katastrophen. 2. Auflage. Campus Verlag. Frankfurt / New York.

## 6. Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität

Ungewissheit bezieht sich auf fehlende oder nicht eindeutige Information. Im Safety Case betrifft sie nicht nur das Erkennen, sondern auch die Konstruktion von Realität, auf die in diesem Arbeitspapier näher eingegangen wird.

*Im Safety Case werden Entwicklungen des Endlagersystems konstruiert, um die Sicherheit darzulegen. Gewissheiten und Ungewissheiten sind an Personen, Organisationen und gesellschaftliche Bedingungen gebunden, an Fachdisziplinen, Verfahren und Instrumente.*

*Elemente des Safety Case lassen sich empirisch belegen, nicht aber welche genaue Entwicklung das Endlagersystem künftig nehmen wird. Unterschiedliche Interessen und Werthaltungen begründen unterschiedliche Konstruktionen künftiger Realität, zwischen denen letztlich nur im Diskurs entschieden werden kann.*

Im Safety Case wird Realität nicht nur erkannt (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität»), sondern auch konstruiert, zum Beispiel mit der Entwicklung von Szenarien. Gewissheiten sind an Fachdisziplinen, Verfahren und Instrumente gebunden, mit denen Realität untersucht wird. Menschliche Kognition spielt eine Rolle, organisationale Faktoren, gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Alle diese Einflüsse wirken in den Safety Case hinein, können Ungewissheiten begründen und den Umgang mit Ungewissheiten beeinflussen.

Um den Umgang mit Ungewissheiten zu objektivieren, werden im Safety Case und im Kontext des Safety Case verschiedene Verfahren angewendet (vgl. «Verifikation und Objektivierung des Umgangs mit Ungewissheiten»). Insbesondere werden Einflüsse, die mit Messungen, Berechnungen und Modellierungen zusammenhängen und die Ergebnisse eines Safety Case verfälschen könnten, in Safety Cases zur Langzeitsicherheit von Endlagern bereits eingehender behandelt. Strukturierte Verfahren zum Umgang mit solchen Ungewissheiten – wie Unsicherheitsanalysen, Sensitivitätsanalysen oder «What if»-Fälle – werden eingesetzt und weiterentwickelt. Auch Einflüsse, die im Zusammenhang mit Menschen, Organisationen und Gesellschaft stehen (vgl. «Human Factor-Ungewissheiten bei der Erstellung des Safety Case») und möglicherweise die Darlegung der Sicherheit verfälschen, können durch geeignete Vorgehensweisen wie zum Beispiel die Pflege einer guten Sicherheitskultur und Peer Reviews abgefangen werden.

Ein Aspekt, der angesichts des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren von besonderer Bedeutung beim Safety Case ist, ist die Konstruktion künftiger Entwicklungen. Die Realität, die hier erkannt werden soll, existiert noch nicht. Wie gut sie durch die Konstrukte



im Safety Case abgebildet wird, lässt sich nicht durch Erfahrung oder Beobachtung überprüfen. Die Entwicklung eines Endlagersystems über tausende von Jahren zu verstehen ist anspruchsvoll bis unmöglich. Und doch muss mit dem Safety Case belegt werden, dass Sicherheit bis weit in die Zukunft hinein gewährleistet werden kann.

## Herleiten künftiger Entwicklungen

Im Safety Case werden verschiedene grundlegende Ansätze verwendet, um künftige Entwicklung, die die Sicherheit eines Endlagersystems beeinflussen, aus gegenwärtig verfügbaren Informationen herzuleiten:

- **Bezugnahme auf Naturgesetze.** Die Beschreibung des Langzeitverhaltens der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren beruht auf Naturgesetzen, die sich nach gegenwärtigem Stand der Erkenntnis im Bewertungszeitraum nicht verändern werden.  
Ungewissheiten betreffen hier vor allem künftige wissenschaftliche Erkenntnisse, die beispielsweise den Geltungsbereich von Naturgesetzen einschränken oder dazu führen könnten, dass zusätzliche, zuvor nicht bekannte Gesetzmäßigkeiten im Safety Case zu berücksichtigen sind.
- **Extrapolation vergangener natürlicher Entwicklungen in die Zukunft.** Dieser Ansatz wird vor allem genutzt, um künftige Entwicklungen des Klimas und geologischer Strukturen sowie daraus folgende Entwicklungen, beispielsweise der Biosphäre oder der hydrologischen Verhältnisse, am Endlagerstandort zu beschreiben.  
Neue wissenschaftliche Erkenntnisse können die Korrektheit von Extrapolationen in Frage stellen und damit Ungewissheiten begründen. Anthropogene Ungewissheiten spielen eine wesentliche Rolle, wenn es um die Frage geht, ob oder inwiefern sich vergangene Entwicklungen in die Zukunft hinein extrapolieren lassen. zum Beispiel Ungewissheiten zur Beeinflussung des Klimas durch den Menschen.
- **Extrapolation experimenteller Befunde in die Zukunft.** Zum Verhalten von Teilen des Endlagersystems, zum Beispiel zum Verhalten von Endlagerbehältern, Verfüllmaterial und Nahfeld im Wirtsgestein, werden Experimente durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage für Extrapolationen in die Zukunft dienen.  
Ungewissheiten gehen darauf zurück, dass es aufgrund der Langfristigkeit der Endlagerung nicht möglich ist, Experimente zum Langzeitverhalten in «Echtzeit» durchzuführen. Kleine Parameter-, Modell- oder Systementwicklungsungewissheiten (vgl. «Etablierte Klassifikation im Safety Case») können sich über den langen Bewertungszeitraum zu großen Ungewissheiten über die Entwicklung des Endlagersystems ausweiten.  
Zudem werden experimentelle Untersuchungen oft unter Laborbedingungen durchgeführt, so dass sich die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf die spezifischen Bedingungen in einem Endlagersystem übertragen lassen (Hassel 2020).
- **Anlehnung an Naturanaloge.** Aus Fällen von Naturanaloge, zum Beispiel gut erhaltenen Ammoniten im Wirtsgestein Opalinuston oder den Naturreaktoren in Gabun, werden Erkenntnisse zum Einschluss hochradioaktiver Abfälle in einem Endlager über lange Zeiträume abgeleitet.

Ungewissheiten werden durch Unterschiede zwischen dem Endlagersystem und dem System begründet, das beim Naturanalogon betrachtet wird. Sie betreffen beispielsweise die geologische Umgebung der «Abfälle» im Naturanalogon. Auch die klimatischen Rahmenbedingungen, unter denen sich das Naturanalogon entwickelt hat, müssen nicht den klimatischen Rahmenbedingungen entsprechen, unter denen sich ein Endlagersystem entwickeln wird.

- Anlehnung an anthropogene Analoga (IAEA 2012, S. 41). Anthropogene Analoga können Untertagebauwerke sein oder anderer Entsorgungsanlagen, zum Beispiel für chemotoxische Abfälle, historische Bauwerke, die Jahrhunderte überdauerten, oder Zeichen, die auch nach mehreren tausend Jahren noch als solche erkannt oder sogar gedeutet werden können.

Anthropogene Analoga, die geeignet sind, die Sicherheit eines Endlagersystems zu belegen, sind nur schwer auffindbar – insbesondere dann, wenn darum geht, Aussagen zur Langzeitsicherheit eines Endlagers zu stützen. Der Bewertungszeitraum für ein Endlager liegt deutlich über der Zeitspanne, aus der historische Erfahrungen vorliegen.

In der Praxis werden anthropogene Analoga daher überwiegend beigezogen, um die Sicherheit eines Endlagersystems anzuzweifeln, zum Beispiel anhand gescheiterter Deponien für chemotoxische Abfälle. Anthropogene Analoga eignen sich also nur bedingt dafür, Ungewissheiten zur künftigen Entwicklung eines Endlagersystems auszuräumen.

- Gebrauch historischer Analogien: Aus historischen Erfahrungen wird abgeleitet, womit bei künftigen gesellschaftlichen Entwicklungen zu rechnen ist. Die Notwendigkeit, die Sicherheit eines Endlagers auch in Zeiten von Krieg und kulturellem Niedergang zu gewährleisten, wird beispielsweise oft mit historischen Analogien begründet.

Inwiefern sich künftige Entwicklungen aus historischen Erfahrungen herleiten lassen, ist wissenschaftlich umstritten. Aufgrund der Vielfalt der geschichtlichen Erfahrungen und ihrer Deutungen ist beim Gebrauch historischer Analogien zudem mit Ungewissheiten aufgrund von Werthaltungen und Interessenlagen zu rechnen, die Einschätzungen künftiger Entwicklungen beeinflussen (vgl. unten).

- Abstützen auf anthropologische Konstanten. Vor allem im Diskurs um die langfristige Übermittlung von Informationen zum Endlager wird davon ausgegangen, dass gewisse menschliche Eigenschaften und typische Verhaltensweisen in Zukunft erhalten bleiben, zum Beispiel Informationen von einer Generation zur nächsten zu tradieren oder auf Unbekanntes mit Neugier zu reagieren.

Anthropologische Konstanten sind nicht klar definiert. Wie sich «Menschsein» über den Bewertungszeitraum entwickeln wird, ist aus gegenwärtiger Perspektive vollkommen ungewiss.

- Fortschreiben von Entwicklungstendenzen: Gegenwärtige Entwicklungstendenzen werden in die Zukunft extrapoliert. Auf dieser Grundlage kann beispielsweise im Safety Case angenommen werden, dass die Einlagerung der Abfallbehälter in ein Endlager in einigen Jahrzehnten vollautomatisiert erfolgen wird.

Die Ungewissheiten bei diesem Verfahren hängen davon ab, wie schnell sich das jeweils betrachtete Element des Endlagersystems verändert und wie weit der Betrachtungshorizont gespannt wird.

- Generische Überlegungen. Generische Überlegungen, beispielsweise zu Zeichensystemen, mit denen sich Informationen über ein Endlager langfristig vermittelt lassen

(vgl. «Markierung eines Endlagers»), werden beigezogen, um die Sicherheit eines Endlagers zu belegen.

Da auch generische Überlegungen vom aktuellen Stand der ihnen zugrundeliegenden Fachdisziplin(en) abhängen und von gesellschaftlichen Rahmenbedingungen beeinflusst werden, können sie nicht über einen längeren Bewertungszeitraum Relevanz beanspruchen.

Zukünftige Entwicklungen, zu denen gegenwärtig noch keine Informationen verfügbar sind, bleiben inhärent ungewiss.

## Szenarien im Safety Case

Zur Beschreibung und Modellierung des Endlagersystems werden in vielen Safety Cases Kataloge von Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge (features, events and processes, FEPs) verwendet, die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen und sicherheitsrelevant sind. Die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD veröffentlicht einen internationalen Katalog von FEPs, der periodisch aktualisiert wird, und unterhält eine entsprechende Datenbank. Im Allgemeinen liefern die FEPS Hinweise darauf, welche Themen zu beachten sind, wenn die zukünftige Entwicklung des Endlagers beschrieben werden soll. Sie geben jedoch keine Entwicklungsrichtungen vor (NEA 2019).

FEPs stellen eine wichtige Grundlage für die bottom up-Entwicklung von Szenarien im Safety Case dar. Szenarien beschreiben Entwicklungsalternativen, anhand derer die Sicherheit des Endlagersystems genauer untersucht wird. International wird angestrebt, die Szenarientwicklung systematisch, strukturiert, transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Neben bottom-up Ansätzen kommen dabei auch solche in Frage, die top down ausgerichtet sind (NEA 2016, 43f).

Das Spektrum der möglichen Entwicklungen eines Endlagers ist ausgesprochen breit und vielfältig. Eine Herausforderung besteht daher darin, eine Auswahl von wenigen Szenarien zu treffen, die diese Breite und Vielfalt für die Untersuchung der Sicherheit möglichst gut abbilden. In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) wird dabei zwischen zu erwartenden, abweichenden und hypothetischen Szenarien unterschieden. International gebräuchlich ist auch, erwartete Szenarien als Referenzszenarien, Normalszenarien, Hauptszenarien oder voraussichtliche Szenarien zu bezeichnen (NEA 2016, 36). Anhand dieser Szenarien wird üblicherweise die Einhaltung numerischer Sicherheitskriterien, vor allem von Dosis- oder Risikogrenzwerten, belegt. Eine zentrale Funktion des Safety Case ist es, zu zeigen, dass sich das Endlagersystem mit hoher Wahrscheinlichkeit wie beabsichtigt verhalten wird (NEA 2016, 38).

Abweichenden Szenarien (EndlSiAnfV 2020) sind wenig wahrscheinlich, könnten aber dennoch eintreten. International werden solche Szenarien auch als alternative Szenarien bezeichnet, zusätzliche Szenarien, disruptive Szenarien oder Störungsszenarien. Sie umreißen den Raum des realistischerweise Möglichen (NEA 2016, 35f). In der EndlSiAnfV wurde für die abweichenden Szenarien ebenfalls ein numerisches Sicherheitskriterium festgelegt, das weniger streng ausfällt als das Kriterium für die zu erwartenden Entwicklungen.

Als sehr unwahrscheinlich, nicht plausibel oder sogar unmöglich eingestufte Szenarien dienen dazu, die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen und seine Sicherheit weiter

zu optimieren. In der EndSiAnfV werden solche Szenarien als hypothetische Entwicklungen bezeichnet und als Entwicklungen beschrieben, «die selbst unter ungünstigen Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind». International ist für diese Kategorie von Szenarien auch die Bezeichnung «What if»-Szenarien verbreitet, sehr unwahrscheinliche Szenarien oder Restszenarien (NEA 2016, 36). Die Robustheit des Endlagersystems dient der Vorsorge gegen Ungewissheiten, insbesondere gegen unbekannte Unbekannte («unknown unknowns») aber auch gegen unbekannte Bekannte («unknown knowns»), also eigentlich verfügbare Informationen, die bei der Erstellung des Endlagersystems nicht zur Kenntnis genommen werden.

Szenarien, die künftige menschliche Aktivitäten betreffen, werden vereinzelt einer eigenen Kategorie zugeordnet, da sie besonders schwer vorhersehbar sind (NEA 2016, 37). Die EndSiAnfV definiert «Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten» als Entwicklungen, die durch zukünftige menschliche Aktivitäten, insbesondere durch unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, ausgelöst werden können und die für die Sicherheit des Endlagersystems relevant werden können.

## Gestalten von Vorhersagen künftiger Entwicklungen

Zukunft verstehen zu wollen, ist erkenntnistheoretisch problematisch. Prospektives Wissen lässt sich nicht oder erst im Nachhinein (vgl. «Empirische Überprüfung prospektiver Informationen») empirisch überprüfen, und «die Differenz zwischen Wissen und bloßem Meinen aufrechtzuerhalten» ist oft kaum möglich. Werthaltungen und Interessenlagen kommen beispielsweise zum Tragen, wenn zwischen relevanten und weniger relevanten Informationen unterschieden werden muss (Grunwald 2007). Das trifft auch für die Unterscheidung zwischen sicherheitsrelevanten und nicht sicherheitsrelevanten Ungewissheiten im Safety Case zu.

Der Einfluss unterschiedlicher Meinungen zu künftigen Entwicklungen wird zum Beispiel deutlich, wenn für verschiedene Entsorgungsoptionen argumentiert wird:

- Als Argument, das für eine Langfristzwischenlagerung spricht, lassen sich Ungewissheiten zum Entsorgungspfad «Endlagerung» anführen: Der Entsorgungspfad beansprucht viel Zeit, bis das Endlager verschlossen ist, und ist damit anfällig für unerwartete Entwicklungen. Ein Langfristzwischenlager, das ein hohes Maß an Sicherheit gewährleistet, trägt daher zur Robustheit des Entsorgungspfades bei. Zu Gerechtigkeit und Akzeptanz der Endlagerung bestehen noch offene Fragen. In den kommenden Jahrzehnten wird möglicherweise eine technologisch bessere Entsorgungslösung für die hochradioaktiven Abfälle gefunden, oder es tut sich eine internationale Lösung auf (Budelmann 2017).
- Ungewissheiten spielen auch in der Argumentation für die zügige Endlagerung eine Rolle (Röhlig 2017): Die Ungewissheiten zur international gut erforschten Endlagerung in stabilen geologischen Verhältnissen sind gering. Der Entsorgungspfad bis zum verschlossenen Endlager ist offen für mögliche Korrekturen. Das Endlager bietet ein hohes Maß an Sicherheit – auch beim Eintreten gesellschaftlicher Krisen und unerwarteter Entwicklungen. Da die Endlagerung derzeit international als beste Lösung für die dauerhafte Entsorgung der Abfälle anerkannt ist, stellt sie ein konkretes Ziel dar, das Orientierung auf dem Entsorgungspfad bietet und auf das zügig hingearbeitet werden

kann. Sicherung und Kernmaterialüberwachung zu gewährleisten wird durch die Tiefenlage eines Endlagers vereinfacht. Über längere Zeiträume sind die Ungewissheiten im Vergleich zur Langfristzwischenlagerung deutlich geringer.

Der Safety Case erhebt nicht den Anspruch, Zukunft vorherzusagen, sondern zeigt vielmehr einen Rahmen auf, in dem sich das Endlagersystem bewegen könnte. In diesem Rahmen soll das Endlager sicher sein (Röhlig 2020). Dennoch sind prospektive Aussagen erforderlich, um die Sicherheit eines Endlagersystems im Safety Case aussagekräftig zu belegen. Prozesse wie die Auswahl und Ausgestaltung von Szenarien oder die Einordnung von Entwicklungen als zu erwartend, abweichend und hypothetisch sind anfällig gegenüber Einflüssen, die – bewusst oder unbewusst – durch Werthaltungen und Interessenlagen geprägt sind.

Dies spricht dafür, die Entwicklung und Beurteilung von Safety Cases künftig stärker diskursiv zu gestalten. Die Konstruktion von Realität im Safety Case kann damit voraussichtlich gegenüber einem breiten Spektrum von Werthaltungen und Interessenlagen geöffnet, die Qualität der Aussagen geprüft und ggf. verbessert und das Vertrauen der interessierten Öffentlichkeit in die Aussagen des Safety Case gestärkt werden.

Budelmann, H. 2017: Plädoyer für die Langfristzwischenlagerung. «Radioaktiver Abfall – was nun?» Vorträge zum Download. [https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/170926\\_Konferenz/Freitag/170929\\_3\\_Plaedoyer\\_fuer\\_Oberflaechenlagerung-Budelmann.PDF](https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/170926_Konferenz/Freitag/170929_3_Plaedoyer_fuer_Oberflaechenlagerung-Budelmann.PDF). Abgerufen am 13.6.2020.

EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

Grunwald, A. 2007: Umstrittene Zukünfte und rationale Abwägung. Prospektives Folgenwissen in der Technikfolgenabschätzung. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis Nr. 1, 16. Jg. S. 54–63.

Hassel, Th. 2020: Persönliche Mitteilung.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific safety guide No. SSG-23. Wien.

NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.

NEA 2016: Scenario Development Workshop Synopsis. Integration Group for the Safety Case. Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R (2015) 3. Paris

Röhlig, K.-J. 2020: Interne Präsentation bei TRANSENS.

Röhlig, K.J. 2017: Plädoyer: Endlagerung in tiefen geologischen Formationen ohne Vorkehrungen zur Rückholbarkeit (wartungsfreie Tiefenlagerung). «Radioaktiver Abfall – was nun?» Vorträge zum Download. [https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/170926\\_Konferenz/Freitag/170929\\_1\\_Plaedoyer\\_fuer-Endlagerung\\_in-tiefen\\_geologischen\\_Formationen\\_ohne\\_Vorkehrungen\\_zur\\_Rueckholbarkeit-wartungsfreie\\_Tiefenlagerung-Roehlig.pdf](https://www.entria.de/fileadmin/entria/Dokumente/170926_Konferenz/Freitag/170929_1_Plaedoyer_fuer-Endlagerung_in-tiefen_geologischen_Formationen_ohne_Vorkehrungen_zur_Rueckholbarkeit-wartungsfreie_Tiefenlagerung-Roehlig.pdf). Abgerufen am 13.6.2020.

# 7. Klassifikation von Ungewissheiten

Ungewissheiten, die für den Safety Case relevant sind, weisen ein breites Spektrum von unterschiedlichen Merkmalen auf. Die Klassifikation von Ungewissheiten erleichtert den systematischen Umgang mit der Vielfalt der auftretenden Ungewissheiten.

*Im Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers hat sich die Unterscheidung von 1. Daten- oder Parameterungewissheiten, 2. Modellungsgewissheiten und 3. Szenario- und Systemungewissheiten, hier als Systementwicklungsungewissheiten bezeichnet, etabliert und bewährt. Zu den Systementwicklungsungewissheiten zählen auch anthropogene Ungewissheiten. Anthropogene Ungewissheiten gehen auf fehlende Informationen darüber zurück, wie sich von Menschen direkt oder indirekt verursachte Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken.*

*Ergänzend lassen sich zwei weitere Kategorien von Ungewissheiten diskutieren: 4. Human Factor-Ungewissheiten beruhen auf fehlender Information zu direkten Einflüssen von Menschen und Organisationen auf das Endlagersystem. 5. Normative Ungewissheiten liegen vor, wenn Informationen fehlen oder uneindeutig sind, die benötigt werden, um zu beurteilen, ob die Möglichkeit eines Schadens akzeptabel ist oder nicht.*

Im Safety Case werden Ungewissheiten untersucht und beurteilt. Regelungen zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case sind in internationalen Empfehlungen, nationalen Gesetzen und Verordnungen, in Leitlinien und in Dokumenten, die Best Practices widerspiegeln, enthalten.

In Regelwerken wird oft nicht präzisiert, welche Art von Ungewissheiten angesprochen ist. Manchmal erschließt sich die Art der Ungewissheit aus dem Kontext oder spezifischen Anforderungen, die an den Umgang mit Ungewissheiten gestellt werden (vgl. «Sonstige Regelungen zum Umgang mit Ungewissheiten»).

Die Klassifikation von Ungewissheiten trägt zu einem systematischen und strukturierten Umgang mit Ungewissheiten bei. Unklarheiten beim Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case können dadurch vermieden werden.

## Aleatorische und epistemische Ungewissheiten

Beim Safety Case wird gelegentlich zwischen aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten unterschieden. Aleatorische Ungewissheiten gehen auf natürliche Variabilität zurück, epistemische Ungewissheiten auf fehlendes oder unvollständiges Wissen.

Aleatorische Ungewissheiten lassen sich – zumindest im Prinzip – mit statistischen Verfahren beschreiben. Manche aleatorischen Ungewissheiten können durch Untersuchungen vermindert werden, was darauf hinweist, dass sie nicht allein auf Zufall zurückgehen und eine scharfe Abgrenzung gegenüber den epistemischen Ungewissheiten nicht möglich ist. Der

für die Untersuchung erforderliche Aufwand und Störungen von Strukturen und Prozessen durch den Untersuchungsvorgang setzen der Reduktion solcher «verminderbarer aleatorischer Ungewissheiten» jedoch Grenzen (Posiva 2019, S. 12f).

Zur Beschreibung epistemischer Ungewissheiten werden meistens Experteneinschätzungen eingeholt. Epistemische Ungewissheiten lassen sich teilweise verringern, zum Beispiel durch Forschung oder weitergehende Untersuchungen. Die Verminderung epistemischer Ungewissheiten stößt an praktische Grenzen, wenn der Aufwand für die Verminderung (im Vergleich zum erzielten Nutzen) zu hoch wird (Posiva 2019, S. 12f). Teilweise sind epistemische Ungewissheiten auch inhärent und nicht reduzierbar. Im Safety Case betrifft das vor allem die Entwicklung menschlicher Aktivitäten in der Zukunft.

Viele Ungewissheiten im Safety Case gehen auf die Wechselwirkung von aleatorischen und epistemischen Komponenten zurück. Die statistische Beschreibung zufälliger Variabilität kann beispielsweise ihrerseits mit epistemischen Ungewissheiten behaftet sein (Posiva 2019, S. 13f).

Einschätzungen zu epistemischen Ungewissheiten, die auf Expertenurteilen beruht, können aus psychologischen Gründen von der Realität abweichen. Beispielsweise kann bei einem Experten-Delphi eine Person überstimmt werden, deren treffende Einschätzung einer bisher kaum erforschten geologischen Situation von anderen Experten verworfen wird, weil die Person noch jung und in der wissenschaftlichen Gemeinschaft wenig etabliert ist. Oder die Plausibilität eines sehr seltenen Naturereignisses wird aufgrund der Verfügbarkeitsheuristik zu hoch eingeschätzt, weil es im Kontext von Phänomenen steht, die gerade in der wissenschaftlichen Fachliteratur sehr präsent sind.

Spätestens hier kommt neben der Erkenntnis von Realität (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität») die Konstruktion von Realität (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität») ins Spiel. Daher ist breit anerkannt, dass eine Kombination von Experteneinschätzungen und Ergebnissen empirischer Untersuchungen die beste Basis für den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case darstellt (Posiva 2019, S. 13f).

## Bekannte und Unbekannte

Eine pragmatische Einteilung der Ungewissheiten richtet sich nach der Verfügbarkeit von Informationen und deren Zurkenntnisnahme:

	Informationen sind verfügbar	Informationen sind nicht verfügbar
Informationen werden zur Kenntnis genommen	Bekannte Bekannte	Bekannte Unbekannte
Informationen werden nicht zur Kenntnis genommen	Unbekannte Bekannte	Unbekannte Unbekannte

Abbildung 7-1: Ungewissheiten und Information (nach Eckhardt & Rippe 2016). Die Position von Ungewissheiten in der Matrix kann sich im Verlauf der Zeit verändern. Der Safety Case muss solchen Veränderungen differenziert Rechnung tragen.

**Bekannte Bekannte** sind abgesicherte Tatsachen und absehbare Entwicklungen. Sie liegen vor, wenn Parameter und Prozesse gründlich untersucht wurden, die Ergebnisse dieser Untersuchungen kritischen Prüfungen standgehalten haben und wenn Modelle validiert und verifiziert sind. Da neue Erkenntnisse bekannte Bekannte in Frage stellen oder zu einer anderen Einordnung der bekannten Bekannten führen können, müssen im Safety Case auch die bekannten Bekannten immer wieder daraufhin überprüft werden, ob Anpassungen notwendig sind (Eckhardt & Rippe 2016, S. 58f.).

**Bekannte Unbekannte** sind Informationen, von denen bekannt ist, dass sie (noch) fehlen oder unvollständig sind. Bekannte Unbekannte zu einem Endlager müssen im Safety Case berücksichtigt werden. Nach aktuellem Verständnis handelt es sich dabei entweder um (i) Informationen die bisher nicht vorliegen, von denen aber bekannt ist, dass sie noch in ausreichendem Maß gewonnen werden müssen, um einen Safety Case (gegenwärtig oder in Zukunft) zu erstellen oder (ii) deren Fehlen oder Unvollständigkeit bekannt ist, aber als akzeptabel eingeschätzt wird bzw. deren Fehlen und Unvollständigkeit (iii) durch Maßnahmen (vermeiden, Wirkung abschwächen) akzeptabel wird (Röhlig 2020).

**Unbekannte Bekannte** sind bekannte Tatsachen und vorhersehbare Entwicklungen, die nicht zur Kenntnis genommen werden. Im Safety Case können sie unbemerkt zu fehlerhaften Aussagen und Ergebnissen führen. Daher muss den unbekanntem Bekannten bei der Erstellung und Beurteilung des Safety Case besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden (Eckhardt & Rippe 2016, S. 61f.).

**Unbekannte Unbekannte** sind nicht bekannte Tatsachen oder unvorhersehbare Entwicklungen. Im Safety Case sind unbekanntem Unbekannte ein wichtiges Thema, insbesondere weil auf dem weit in die Zukunft hinein reichenden Bewertungszeitraum voraussichtlich viele Ereignisse und Entwicklungen auftreten werden, die gegenwärtig noch nicht absehbar sind.



## Etablierte Klassifikation im Safety Case

Für den Safety Case mit primärer Ausrichtung auf Langzeitsicherheit existiert eine bewährte Klassifikation von Ungewissheiten (vgl. zum Beispiel IGSC 2016, S. 29; NEA 2012; PAMINA 2006, S. 25; Chapman & McCombie 2003). Demnach wird zwischen drei Kategorien von Ungewissheiten unterschieden:

- Szenario- oder Systemungewissheiten beruhen auf einem Mangel an Information darüber, ob das Endlagersystem und seine gegenwärtigen und künftigen Rahmenbedingungen richtig und ausreichend verstanden werden. Szenario- oder Systemungewissheiten betreffen zum Beispiel Veränderungen am Standort eines Endlagers aufgrund klimatischer Veränderungen oder langfristige Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und Streckenausbau. Zur besseren Abgrenzung gegenüber den Modellungewissheiten werden diese Ungewissheiten im vorliegenden Bericht als «Systementwicklungsungewissheiten» bezeichnet.
- Modellungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut das Verhalten von Elementen des Endlagersystems durch Modelle abgebildet wird. Sie gehen auf unvollständiges Wissen zum Standort eines Endlagers, den technischen Barrieren und physikalischen und chemischen Prozessen zurück bzw. auf die Datenverarbeitung und die Verwendung von Modellen, die die Realität nicht vollständig, umfassend oder korrekt abbilden.
- Daten- oder Parameterungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut verwendete Parameterwerte und -verteilungen die Realität wiedergeben. Diese Ungewissheiten sind beispielsweise auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, zu wenige Messwerte, die Notwendigkeit, Parameter einzuschätzen, die sich nicht direkt messen lassen, oder auf die Verwendung von aggregierten Parametern stellvertretend für komplexere Sachverhalte.

In der folgenden Abbildung werden diese drei Kategorien von Ungewissheiten den aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten zugeordnet. Beachtenswert ist die inhaltliche Überschneidung zwischen Systementwicklungs- bzw. in der Abbildung «Szenarioungewissheiten» und Modellungewissheiten beim Verständnis des Endlagersystems («system understanding»).

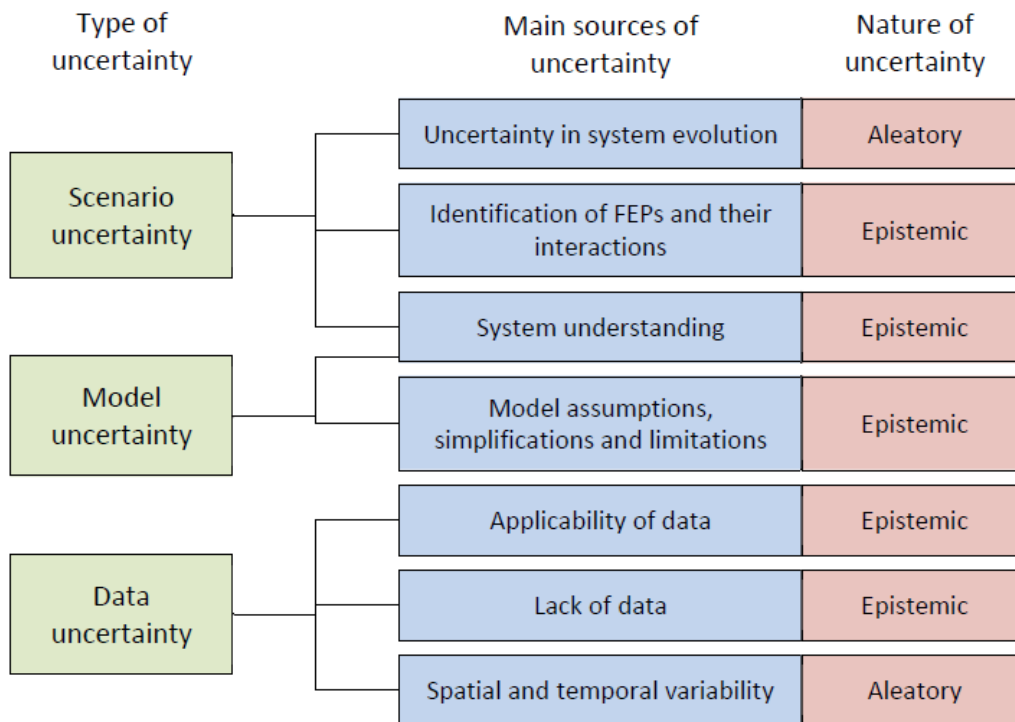


Abbildung 7-2: Klassifikation der wichtigsten Ungewissheiten im Safety Case und ihrer Ursachen (Posiva 2019, S. 12). Beim Systemverständnis überschneiden sich Szenario- und Modellungewissheiten.

## Alternative Klassifikationen im Safety Case

Einige Institutionen haben für den Safety Case mit primärer Ausrichtung auf Langzeitsicherheit Klassifikationen entwickelt, die von der etablierten Einteilung abweichen (PAMINA 2019, S. 235).

Die französische Vorhabenträgerin Andra unterscheidet im Vergleich zur etablierten Klassifizierung stärker zwischen Ungewissheiten, die auf fehlendes Wissen zu den natürlichen und technischen Barrieren zurückgehen, und Ungewissheiten, die durch gesellschaftliche Entwicklungen verursacht sind. Sie untersucht Ungewissheiten

- die unabhängig von der Entwicklung des Endlagersystems sind, zum Beispiel mangelnde Informationen zum Abfallinventar
- zu intrinsischen Eigenschaften von Komponenten des Endlagersystems
- zu Prozessen, die die Entwicklung des Endlagers bestimmen und damit unter anderem die Vorhersage von Entwicklungen auf lange Zeit erschweren
- zu natürlichen und von Menschen verursachten Ereignissen, die von außen auf das Endlager einwirken
- zu künftigen technologischen Entwicklungen, die zum Beispiel den Untertagebau betreffen
- zu künftigen Konstruktionsvorschriften und Auslegungsvorgaben

Die tschechischen Vorhabenträgerin RAWRA fokussiert auf charakteristische Ursachen von Ungewissheiten, die im Kontext der Endlagerung auftreten. Sie unterscheidet zwischen Ungewissheiten aufgrund mangelnder Informationen

- zum Verhalten des Endlagersystems über lange Zeiträume («time uncertainty»)
- zu Faktoren, die das Verhalten des Endlagersystems bestimmen («structural uncertainty»)
- zur Korrektheit von Messwerten («metric uncertainty»)
- zu den Ursachen bestimmter Effekte («translation uncertainty»)

## Vorschlag einer erweiterten Klassifikation

Bei einem ganzheitlichen Safety Case, der sowohl auf die Sicherheit bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers als auch auf die Langzeitsicherheit ausgerichtet ist, ist das Spektrum der relevanten Ungewissheiten breiter als bei einem Safety Case, der auf die Langzeitsicherheit fokussiert. Die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers erfordern es zwingend, gesellschaftliche, organisationale und menschliche Einflüsse in den Safety Case einzubeziehen. Im Safety Case zur Langzeitsicherheit dagegen ist es möglich, diese Einflüsse mit guten Argumenten weitgehend auszublenden, zum Beispiel mit Verweis darauf, dass die Abfälle im verschlossenen Tiefenlager von menschlichen Einflüssen abgeschirmt sind, oder dass sich gesellschaftliche Entwicklungen in der ferneren Zukunft grundsätzlich nicht vorhersehen lassen (vgl. «Zeitlicher Betrachtungsumfang des Safety Case»).

Die hier vorgeschlagene Klassifikation von Ungewissheiten folgt einem interdisziplinären Ansatz, der auch ethische und sozialwissenschaftliche Aspekte einbezieht. Die einzelnen Kategorien können sich überschneiden. So gibt es zum Beispiel, wie bereits oben erwähnt, Überschneidungen zwischen Modell- und Systementwicklungsungewissheiten. Unsere Klassifikation ist vor allem methodisch begründet: Unterschiedliche Kategorien von Ungewissheiten lassen sich am besten mit spezifischen Methoden aus verschiedenen Fachdisziplinen behandeln – ohne dass dabei die Vielschichtigkeit und Interdisziplinarität von Sicherheit aus den Augen verloren werden darf. Die im Safety Case zur Langzeitsicherheit etablierten Kategorien werden durch zwei weitere Kategorien ergänzt, die im Safety Case betrachtet werden sollten.

- Daten- oder Parameterungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut verwendete Parameterwerte und -verteilungen die Realität wiedergeben. Diese Ungewissheiten sind beispielsweise auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, zu wenige Messwerte, die Notwendigkeit, Parameter einzuschätzen, die sich nicht direkt messen lassen, oder auf die Verwendung von aggregierten Parametern stellvertretend für komplexere Sachverhalte.
- Modellungewissheiten beruhen auf fehlenden Informationen dazu, wie gut das Verhalten von Elementen des Endlagersystems durch Modelle abgebildet wird. Sie gehen auf unvollständiges phänomenologisches Verständnis zurück, unvollständiges Wissen zum Standort eines Endlagers, den technischen Barrieren und physikalischen und chemischen Prozessen bzw. auf die Datenverarbeitung und die Verwendung von Modellen, die die Realität nicht vollständig, umfassend oder korrekt abbilden.

- Systementwicklungsungewissheiten beruhen auf einem Mangel an Information darüber, wie sich das Endlagersystem und seine Rahmenbedingungen verhalten. Systementwicklungsungewissheiten betreffen zum Beispiel Veränderungen am Standort eines Endlagers aufgrund des Klimawandels oder langfristige Wechselwirkungen zwischen Wirtsgestein und Streckenausbau. Ein Spezialfall der Systementwicklungsungewissheiten sind die anthropogenen Ungewissheiten. Sie beruhen auf fehlenden Informationen darüber, wie sich von Menschen direkt oder indirekt verursachte Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken.
- Human Factor-Ungewissheiten sind durch fehlende Information zu direkten Einflüssen von Menschen und Organisationen auf das Endlagersystem bedingt.
- Normative Ungewissheiten liegen vor, wenn Informationen fehlen oder uneindeutig sind, die benötigt werden, um zu beurteilen, ob die Möglichkeit eines Schadens akzeptabel ist oder nicht.

Diese Ungewissheiten beziehen sich auf die Darlegung der Sicherheit des Endlagersystems im Safety Case, also auf die Inhalte des Safety Case. Human-Factor-Ungewissheiten und normative Ungewissheiten sind aber auch beim Prozess der Entwicklung und Beurteilung eines Safety Case zu beachten.

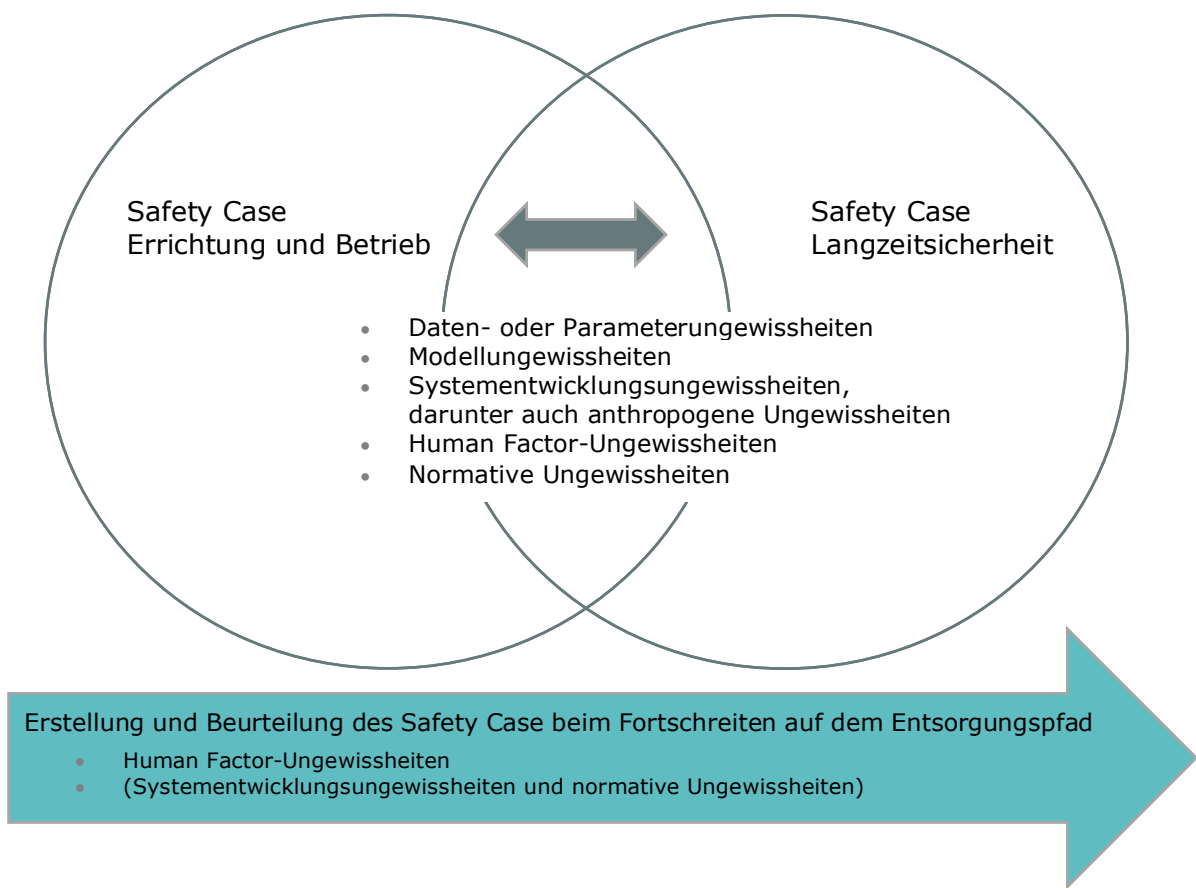


Abbildung 7-3: Klassifikation von Ungewissheiten im Safety Case (eigene Darstellung). Die klassische Unterscheidung von Daten-, Modell- und Systementwicklungsungewissheiten ist um zwei weitere Kategorien, die Human Factor-Ungewissheiten und die Normativen Ungewissheiten, ergänzt.

Chapman, N.; McCombie, C. 2003: Principles and standards for the disposal of long-lived radioactive wastes. Pergamon/Elsevier. Amsterdam.

Eckhardt, A.; Rippe, K.P. 2016: Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf-Verlag. Zürich.

IGSC – Integration Group for the Safety Case 2016: Scenario development workshop synopsis. NEA/RWM/R (2015) 3. Paris.

NEA – Nuclear Energy Agency 2012: Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. NEA No. 6923. Paris.

Posiva 2019: Plan for uncertainty assessment in the safety case for the operating license application. Nummi, O. POSIVA 2018-02. Eurajoki.

PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case 2019: European handbook of the state-of-the-art of safety assessments of geological repositories-Part 1. Deliverable D 1.1.4.

PAMINA 2006: The treatment of uncertainty in performance assessment and safety case development. State-of-the-art overview. Milestone M1.2.1.

Röhlig, K.-J. 2020: Interner Beitrag zur Begriffsbestimmung bei TRANSENS.

# 8. Anthropogene Ungewissheiten

Der Umgang mit anthropogenen Ungewissheiten im Safety Case erfordert andere Ansätze als der Umgang mit anderen Kategorien von Ungewissheiten. Daher wird in diesem Arbeitspapier spezifisch auf die anthropogenen Ungewissheiten eingegangen.

*Anthropogene Ungewissheiten sind Teil der Systementwicklungsungewissheiten.*

*Das relativ geringe Gewicht anthropogener Entwicklungen im Safety Case zur Langzeitsicherheit wird damit begründet, dass die Entsorgungsoption «Endlagerung» im tiefen geologischen Untergrund explizit gewählt wurde, um den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit des Lagers zu minimieren. Da anthropogene Entwicklungen der Zukunft nicht prognostizierbar seien, könne auch nicht erwartet werden, dass sie im Safety Case systematisch und umfassend behandelt werden.*

*Anhaltspunkte für das Spektrum möglicher anthropogener Einwirkungen und der damit verbundenen Ungewissheiten liefern Kataloge von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen, die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen und sicherheitsrelevant sind.*

Anthropogene Ungewissheiten gehen auf fehlende Informationen darüber zurück, wie sich von Menschen direkt oder indirekt verursachte Veränderungen von Umwelt und Gesellschaft auf die Sicherheit eines Endlagersystems auswirken. Sicherheitsrelevante anthropogene Ungewissheiten bestehen zum Beispiel zu künftigen Gewaltkonflikten, von Menschen verursachtem Klimawandel oder Raumnutzung im Untergrund. Anthropogene Ungewissheiten sind Teil der Systementwicklungsungewissheiten. Sie überschneiden sich mit den Human Factor-Ungewissheiten und den normativen Ungewissheiten (vgl. «Vorschlag einer erweiterten Klassifikation»).

Im Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers wird in der Regel das menschliche Eindringen in ein Endlager («human intrusion», vgl. «Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager») stellvertretend für anthropogene Einwirkungen genauer untersucht.

## Zeithorizonte und Methoden

Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers beanspruchen mehrere Jahrzehnte. In Deutschland ist geplant, das Endlager für hochradioaktive Abfälle um das Jahr 2055 in Betrieb zu nehmen und ungefähr 2135 in die Nachbetriebsphase überzugehen. Manche Experten gehen jedoch von einem längeren Zeitbedarf aus und erwarten den Verschluss des Endlagers beispielsweise erst Mitte der 2160er Jahre (Thomauske 2016).

Zwischen dem aktuellen Beginn des Standortauswahlverfahrens und dem Verschluss des Endlagers liegen also mehr als 100 Jahre. Würde das Endlager heute verschlossen, könnte

auf den Beginn der Standortauswahl zu Beginn des 20. Jahrhunderts zurückgeblieben werden. Seither wurden zwei Weltkriege geführt, die Informationstechnologie so weit entwickelt, dass sie den Alltag der Bevölkerung in Deutschland durchdringt, die Nutzung der Kernenergie in Deutschland aufgebaut und wieder beendet. Dieser Vergleich veranschaulicht, dass auf dem Entsorgungspfad, der zum verschlossenen Endlager führt, vielfältige und tiefgreifende anthropogene Entwicklungen möglich sind, die die Entsorgung der hochradioaktiven Abfälle beeinflussen können. Damit sind auch die anthropogenen Ungewissheiten erheblich.

Zukunftsorientierte Analysen, Strategien und Konzepte wie Foresight oder Technikfolgenabschätzung, bei denen anthropogene Entwicklungen eine Rolle spielen, sind typischerweise auf einen Zeithorizont von maximal 15 bis 20 Jahren ausgerichtet. Bei einem ganzheitlichen Safety Case, der den Entsorgungspfad von der Errichtung bis zum Verschluss des Endlagers abdeckt, könnten sich Methoden der Zukunftsforschung aber dennoch als hilfreich erweisen, um das Spektrum möglicher anthropogener Entwicklungen und damit auch die anthropogenen Ungewissheiten besser verstehen und entsprechende vorsorgliche Maßnahmen ergreifen zu können. In den 1990er Jahren wurde bereits vereinzelt mit Hilfe von Methoden der Zukunftsforschung ausgelotet, womit beim menschlichen Eindringen in ein Endlager zu rechnen ist (vgl. «Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager»).

Nach dem Verschluss des Endlagers bis zum Ende des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren sind die Ungewissheiten zu anthropogenen Entwicklungen so groß, dass deren Behandlung im Safety Case an deutliche Grenzen stößt (vgl. zum Beispiel «Epistemische Ungewissheiten zu den zu schützenden Werten»).

## Safety Case zu Errichtung, Betrieb und Stilllegung

Bei der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines Endlagers spielen anthropogene Entwicklungen und die damit verbundenen Ungewissheiten eine wichtige Rolle. In gegenwärtige Sicherheitsanalysen und -überprüfungen von Kernanlagen wie Zwischenlagern oder Kernkraftwerken fließen anthropogene Entwicklungen ein. Ein Beispiel ist die Gefahr von Flugzeugabstürzen, die sich mit der Intensität und Zusammensetzung des Flugverkehrs sowie mit dem Aufkommen neuer sicherheitsrelevanter Technologien in der Luftfahrt verändert. Allerdings sind manche anthropogenen Entwicklungen, die sich unter anderem auch in Human Factor-Ungewissheiten niederschlagen können, in etablierten Sicherheitsanalysen schwer zu erfassen. Dazu zählen beispielsweise Probleme, geeignete Lieferanten für Komponenten zu finden, die kerntechnische Anforderungen erfüllen müssen, oder Schwierigkeiten, gut ausgebildete Mitarbeitende zu rekrutieren.

Umfassende Sicherheitsüberprüfungen in der Kerntechnik müssen in der Regel im Zehnjahresrhythmus aktualisiert werden. Damit ist sichergestellt, dass neue anthropogene Entwicklungen regelmäßig aufgenommen werden.

Bei einem Endlager, das noch nicht stillgelegt worden ist, können manche Anpassungen an neue anthropogene Entwicklungen verhältnismäßig schnell vorgenommen werden. Bei-

spielsweise wäre es in einer angespannten sicherheitspolitischen Lage möglich, die personellen Ressourcen für die Sicherung zu verstärken, die Oberflächenanlagen baulich nachzurüsten oder die untertägigen Teile des Endlagersystems vorübergehend zu verschließen.

## Safety Case zur Langzeitsicherheit

Nach dem Verschluss des Endlagers beruht dessen Sicherheit wesentlich darauf, dass die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren ihre Funktionen ungestört von menschlichen Aktivitäten erfüllen. Menschliche Einwirkungen, die nach der Stilllegung des Endlagers erfolgen, werden international vielfach als auslegungsüberschreitend angesehen. Ein Grund dafür ist, dass «zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können» (BMU 2010, S.11).

Unter den Zielen der Entsorgung, die die International Atomic Energy Agency (IAEA) festgelegt hat, befindet sich auch der Schutz vor unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen. Die Wahrscheinlichkeit und die schädlichen Auswirkungen eines solchen Eindringens sollen erheblich vermindert werden (IAEA 2011, S. 3). Anhand eines Sicherheitskriteriums lässt sich überprüfen, ob ausreichende Sicherheit vor unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen gewährleistet ist (IAEA 2011, S. 13).

Bei der Überprüfung des Schutzes von Menschen und Umwelt besteht Spielraum für die Betrachtung zusätzlicher anthropogener Entwicklungen (IAEA 2012, S. 23, 52 und 94). Welche Entwicklungen dabei relevant sein können, zeigt der FEP-Katalog der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD auf. FEPs sind Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge (features, events and processes), die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen und sicherheitsrelevant sind. Dazu zählen Klimaentwicklung und Klimaanpassungsaktivitäten (NEA 2019, S. 30f.) ebenso wie die Nutzung von Ressourcen im geologischen Untergrund (NEA 2019, S. 109f.). Raumnutzung (NEA 2019, S. 42) und Wasserwirtschaft (NEA 2019, S. 43) sind von Bedeutung. Induzierte Seismizität (NEA 2019, S. 22) ist zu beachten, die Auswirkungen beabsichtigter und unbeabsichtigter Explosionen oder Abstürze, auch aus dem Weltall (NEA 2019, S. 44f) oder menschliche Reaktionen auf schwere Ereignisse wie Naturkatastrophen (NEA 2019, S. 44f.). Mit den «Future Human Actions» ist anthropogenen Entwicklungen eine eigene Unterkategorie von FEPs gewidmet, die den externen Einwirkungen auf das Endlagersystem («External factors») zugeordnet wird (NEA 2019, S. 37).

In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) ist vorgesehen, «Entwicklungen, die durch zukünftige menschliche Aktivitäten, insbesondere durch unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, ausgelöst werden können und die für die Sicherheit des Endlagersystems relevant werden können», zur Überprüfung der Robustheit und zur weiteren Optimierung des Endlagersystems heranzuziehen (§3 EndlSiAnfV 2020a). Die Optimierung zur Verringerung möglicher Auswirkungen von zukünftigen menschlichen Aktivitäten auf das Endlagersystem ist allerdings nachrangig zur Optimierung gegenüber anderen Entwicklungen durchzuführen (§12 EndlSiAnfV 2020a). Aufgrund der großen Ungewissheiten zu künftigen menschlichen Aktivitäten soll dabei mit stilisierten Szenarien gearbeitet werden (EndlSiAnfV 2020b, S. 34).



Die Richtlinie der schweizerischen Aufsichtsbehörde zu geologischen Tiefenlagern lehnt sich eng an die Vorschriften der IAEA an (ENSI 2020). Die Leitlinie der finnischen Aufsichtsbehörde ordnet menschliche Aktivitäten, die die Langzeitsicherheit eines Endlagers beeinträchtigen, den seltenen Ereignissen mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit zu (STUK 2018, S. 3).

Bei der Entwicklung von Szenarien zur Langzeitsicherheit wird im Allgemeinen von der gegenwärtigen Situation ausgegangen – sowohl was menschliche Einwirkungen auf das Endlager als auch was die Auswirkungen des Endlagers auf Mensch und Umwelt in der Zukunft betrifft (§7 EndlSiAnfV 2020a; ENSI 2020, S. 16; STUK 2018, S. 11; IAEA 2012, S. 54 und 81). Dieses Vorgehen wird mit den erheblichen Ungewissheiten zu künftigen anthropogenen Entwicklungen begründet, die keine seriöse Einschätzung über lange Zeiträume erlauben (EndlSiAnfV 2020b, S. 34; IAEA 2012, S. 54), und der Entscheidung, auch in Zukunft dasselbe Schutzniveau gewährleisten zu wollen wie in der Gegenwart (EndlSiAnfV 2020b, S. 40).

Anthropogene Entwicklungen werden im Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers also – in stilisierter Form – berücksichtigt, erhalten jedoch kein erhebliches Gewicht. Dieses Vorgehen stützt sich auf zwei grundlegende Argumente, die in den Publikationen der IAEA und der NEA aufgeführt sind:

- Die Entsorgungsoption «Endlagerung», fernab heutiger menschlicher Aktivitäten, wurde explizit gewählt, um den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit des Lagers zu minimieren. Wenn Menschen über Möglichkeiten verfügen, um dennoch in den Lagerraum vorzudringen, kann davon ausgegangen werden, dass sie auch in der Lage sind und insbesondere über das Wissen und die technologischen Voraussetzungen dazu verfügen, Sicherheit beim Umgang mit dem Endlager zu gewährleisten.
- Absolute Sicherheit ist nicht erreichbar, vor allem nicht über lange Zeiträume von bis zu einer Million Jahre. Eine Entsorgungslösung wie die Endlagerung muss daher nicht vollkommen sicher sein. Sie ist legitim, wenn über den Bewertungszeitraum eine angemessene Gewähr für Sicherheit gegeben werden kann. Da künftige anthropogene Entwicklungen nicht prognostizierbar sind, kann auch nicht erwartet werden, dass sie im Safety Case umfassend und systematisch behandelt werden.

Diesen Argumenten lässt sich entgegenhalten, dass ein Safety Case ein breites Spektrum von sicherheitsrelevanten Argumenten umfassen soll und deshalb die anthropogenen Entwicklungen nicht verhältnismäßig pauschal ausklammern kann. Ist angemessene Gewähr für die Sicherheit des Endlagers gegeben, wenn ein ganzer Komplex wesentlicher sicherheitsrelevanter Entwicklungen im Safety Case ausgeblendet wird?

Letztlich muss der Gesetzgeber bestimmen, welche Anforderungen an den Safety Case zu stellen sind, damit der Vorhabenträger seine Sorgfaltspflicht angemessen wahrnimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, welche Möglichkeiten verfügbar sind, um künftige gesellschaftliche Entwicklungen einzuschätzen und Vorsorge gegen Entwicklungen zu treffen, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen. Wenn solche Möglichkeiten existieren, ist es geboten, sie in einen Safety Case einzubeziehen.

Maßnahmen, die die Sicherheit eines Endlagersystems angesichts von Ungewissheiten zu menschlichen Einwirkungen in der Zukunft stärken können, sind (vgl. u.a. PAMINA 2011):

- Dokumentation und Wissenstransfer gewährleisten, dass Informationsgrundlagen zum sicheren Umgang mit dem Endlager erhalten und verfügbar bleiben, und wirken damit dem unbeabsichtigten Eindringen und weiteren menschlichen Aktivitäten, die die Sicherheit des Endlagers gefährden, entgegen
- Markierung des Endlagersystems wirkt unbeabsichtigtem Eindringen in ein Endlager entgegen
- Wahl eines Standortes, an dem keine Konflikte mit anderen Nutzungs- und Schutzinteressen im Untergrund zu erwarten sind wirkt menschlichen Aktivitäten im Umfeld des Endlagers entgegen, die die Sicherheit beeinträchtigen
- Verzicht auf den Einbau seltener Wertstoffe im Endlagersystem verhindert, dass Menschen in das Endlager eindringen, um seltene Wertstoffe zu gewinnen
- Einfaches und robustes Lagerdesign hält mögliche Anreize zum Eindringen in das Endlager gering und erschwert das Eindringen in ein Endlager

Im TRANSENS-Bericht «Anthropogene Ungewissheiten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle» werden die anthropogenen Ungewissheiten eingehender behandelt.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2010: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.

EndSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020a: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

EndSiAnfV 2020b: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Referentenentwurf vom 6. April 2020 einschließlich Begründung.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific Safety Guide No. SSG-23. Wien.

IAEA 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.

NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.

PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case 2011: Project summary report. Deliverable D5.1.

STUK – Säteilyturvakeskus 2018: Guide YVL D.5, Disposal of nuclear waste (13/2/2018). Helsinki.

Thomaske, B. 2016: Ablauf des Standortauswahlverfahrens – Zeitrahmen und Auswahl eines bestmöglichen Standortes. Präsentation am Endlagersymposium 2016. München.

# 9. Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager

Ungewissheiten zum menschlichen Eindringen in ein Endlager sind die bisher am besten untersuchten anthropogenen Ungewissheiten. An ihrem Beispiel lässt sich daher aufzeigen, wie anthropogene Ungewissheiten im Safety Case behandelt werden können.

*Im Safety Case zur Langzeitsicherheit steht das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in ein Endlager beispielhaft für zukünftige menschliche Aktivitäten, die die Sicherheit des Endlagersystems betreffen.*

*Die Szenarien des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens sind stilisiert, weil Bedingungen, unter denen ein solches Eindringen stattfindet, insbesondere auch die technologischen Möglichkeiten der Zukunft, heute weder bekannt sind, noch ermittelt werden können. Szenarien werden aufgrund der gegenwärtigen Situation entwickelt. Die Aussagekraft der Szenarien für die Zukunft ist damit beschränkt; sie können jedoch beigezogen werden, um die Sicherheit des Endlagersystems zu optimieren und seine Robustheit zu überprüfen.*

*Neben der Tiefenlage des Endlagers soll insbesondere auch die Weitergabe von Informationen an künftige Generationen Schutz gegen unbeabsichtigtes menschliches Eindringen bieten.*

Einen Spezialfall der anthropogenen Entwicklungen stellt das menschliche Eindringen («human intrusion») in ein verschlossenes Endlager dar. Dieser Spezialfall hat für den Safety Case besondere Bedeutung erlangt, weil in den Sicherheitsanforderungen der IAEA und vieler Länder explizit gefordert wird, das unbeabsichtigte menschliche Eindringen («inadvertent human intrusion») im Safety Case zu behandeln.

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) versteht unter «menschlichem Eindringen» Handlungen von Menschen, die die Integrität einer Entsorgungsanlage betreffen und zu radiologischen Folgen führen können. Betrachtet werden sollen nur solche Handlungen, die die Entsorgungsanlage direkt stören, also zum Eindringen in das kontaminierte Nahfeld der Abfälle, die technischen Barrieren oder zum Vordringen bis zu den Abfällen selbst führen (IAEA 2011, S. 3). In Deutschland wird vom Eindringen in ein Lager gesprochen, wenn die passiven Sicherheitsbarrieren direkt beschädigt werden. Andere Formen des Vordringens in Richtung des Endlagers, die zum Beispiel zu Änderungen von Wasserwegsamkeiten im Deckgebirge führen, wurden bisher mit dem Eindringen in ein Lager nicht erfasst (ESK 2012, S. 3).

## Behandlung des beabsichtigten Eindringens im Safety Case

Menschen dringen «beabsichtigt» in ein Endlager ein, wenn sie die räumliche Position des Endlagers und ihre eigene räumliche Position kennen, über Informationen über die Auslegung des Endlagers verfügen und die Gefahren, die mit dem Eindringen verbunden sind, einschätzen können.

Die «Absicht» impliziert auch den Willen, in das Endlager vorzudringen. Allerdings stellt sich die Frage, wem diese Absicht zuzuschreiben ist. Sie kann bei den Eindringenden selbst vorhanden sein, ggf. aber auch nur bei anderen Personen.

Das beabsichtigte Eindringen in ein Endlager wird im Allgemeinen als für den Safety Case nicht relevant beurteilt. Die Entsorgung wird von dem ethisch motivierten Grundsatz geleitet, den Handlungsspielraum künftiger Generationen möglichst wenig zu beeinträchtigen und damit auch die Handlungsverantwortung in deren Hände zu legen. Daher sollen Menschen in der Zukunft frei sein, in ein verschlossenes Endlager einzudringen, wenn sie es so wollen. Es existiert kein guter Grund dafür, sie am Eindringen zu hindern.

Ähnlich wurde in der Begründung zum Referentenentwurf der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) argumentiert: «Zukünftige menschliche Aktivitäten, die absichtlich auf das Endlager einwirken, insbesondere absichtliches Eindringen in das Endlager, sind nicht zu betrachten. Diese Aktivitäten erfolgen notwendigerweise in Kenntnis des vorhandenen Endlagers und somit zumindest indirekt auch seines Gefahrenpotenzials. Sie sind daher vollständig von den zukünftig lebenden Menschen zu verantworten, die diese Aktivitäten planen und durchführen» (EndlSiAnfV 2020b, S. 35f.).

Dieser Argumentation kann die implizite Annahme zugrunde liegen, dass Personen, die absichtlich in ein Endlager eindringen, dies immer aufgrund einer informierten Entscheidung tun und dass sie aus freiem Willen handeln. Szenarien, bei denen diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind, sind jedoch denkbar. In einem Gewaltkonflikt könnten beispielsweise Personen, die der unterlegenen Seite angehören, von Personen der überlegenen Seite zum Eindringen in ein Lager gezwungen werden, um anschaulich aufzuzeigen, wie sich der Kontakt mit den radioaktiven Abfällen auf deren Verhalten und Gesundheit auswirkt. Möglich ist auch, dass die eindringenden Personen nicht ausreichend über das Lager und die von ihm ausgehenden Gefahren informiert sind, wohl aber die Entscheidungsträger, die sie beauftragt haben – oder die wissenschaftlichen Berater der Entscheidungsträger.

Die finnische Vorhabenträgerin erwähnt die Möglichkeit, dass Personen beabsichtigt in ein Lager eindringen und radioaktive Abfälle an die Erdoberfläche bringen, ohne Unbeteiligte, wie zum Beispiel Anwohner, vor den schädlichen Auswirkungen der Abfälle zu schützen (Posiva 2013, S. 10). Personen könnten Abfälle aus dem Lager entfernen, um damit Anschläge oder Drohungen zu verüben. Liegt der Schutz unbeteiligter Personen ausschließlich in der Verantwortung derjenigen, die beabsichtigt in ein verschlossenes Endlager eindringen? Oder tragen auch heutige Generationen Mit-Verantwortung dafür, Unbeteiligte in der Zukunft zu schützen?

Das Argument, das beabsichtigte Eindringen sei «vollständig von den zukünftig lebenden Menschen zu verantworten, die diese Aktivitäten planen und durchführen» (EndlSiAnfV 2020b, S. 35f.) lässt sich allerdings auch so interpretieren, dass die «zukünftig lebenden Menschen» eher der «zukünftigen Menschheit» entsprechen. Damit werden die zukünftig

lebenden Menschen als eine Einheit verstanden, die mögliche Konflikte in ihrem Inneren auszutragen hat. Eine Verantwortung der gegenwärtig lebenden Menschen gegenüber einzelnen zukünftigen Personen oder bestimmten Personengruppen existiert nicht.

Aus heutiger Perspektive erfordert das Eindringen in ein Endlager erhebliche Ressourcen. Daher wird oft argumentiert, dass es nur nach einer genaueren Abwägung von Chancen und Risiken erfolgen würde. Dass eine kleine Gruppe von Menschen das Lager in böswilliger Absicht nutzt, um anderen Menschen oder der Umwelt zu schaden, gilt als unwahrscheinlich, weil für kriminelle Aktivitäten und terroristische Anschläge viele Mittel zur Verfügung stehen, die niederschwelliger zu beschaffen sind als hochradioaktive Abfälle aus einem Endlager. Ob diese Argumentation, die gegenwärtig plausibel scheint, auch in Zukunft zutreffen wird, ist ungewiss.

Würde das beabsichtigte Eindringen durch zusätzliche technische Barrieren im Endlager erschwert, könnten damit möglicherweise Personen, die zum Eindringen gezwungen oder verleitet werden, sowie unbeteiligte Dritte vor den Folgen des Eindringens geschützt werden.

Dagegen spricht, dass der Handlungsspielraum künftiger Generationen eingeschränkt wird, wenn man ihnen den Zugang zu den Abfällen verwehrt. Bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wird im Allgemeinen der Sicherheit Vorrang vor anderen Werten eingeräumt. Daher wäre es nachvollziehbar, zum Beispiel den Schutz unbeteiligter Dritter höher zu gewichten als den Handlungsspielraum künftiger Generationen und das beabsichtigte Eindringen in ein Endlager zu erschweren. Einige denkbare Motive für das Eindringen sind jedoch eindeutig sicherheitsgerichtet, zum Beispiel wenn es darum geht, Abfälle zu bergen, um sie anschließend einem besseren Entsorgungsweg zuzuführen oder unschädlich zu machen. Daher wäre es kontraproduktiv, das beabsichtigte Eindringen verhindern oder behindern zu wollen.

Ob ein Schutz vor beabsichtigtem Eindringen vorgesehen werden soll, ist also je nach dem Szenarium, das entsprechenden Überlegungen zugrunde gelegt wird, unterschiedlich zu beantworten. Wenn Sicherheitsanforderungen formuliert werden, die das beabsichtigte Eindringen betreffen, und Sicherheitsmaßnahmen gegen ein beabsichtigtes Eindringen getroffen werden, ist ein differenziertes Vorgehen angebracht.

Die IAEA argumentiert angesichts dieser anspruchsvollen Entscheidungssituation, die vor allem auf den Zielkonflikt zwischen Rückholbarkeit bzw. erleichterter Bergung und dem Schutz künftiger Menschen vor den Abfällen zurückgeht, mit den begrenzten Möglichkeiten, künftige Generationen vor ihren eigenen Handlungen zu schützen: «even if future societies are forewarned of the consequences of their actions, the present society still cannot protect future societies from their own actions» (IAEA 2012, S. 80).

## Behandlung des unbeabsichtigten Eindringens im Safety Case

Das unbeabsichtigte Eindringen in ein verschlossenes Endlager hat sich als beispielhaftes Szenarium oder «Indikator-Szenarium» für künftige menschliche Aktivitäten, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen, etabliert und wird – anders als das beabsichtigte Eindringen – im Safety Case untersucht.

Eines der Sicherheitskriterien der IAEA für die Entsorgung radioaktiver Abfälle bezieht sich auf dieses Szenarium. Wenn zu erwarten ist, dass unbeabsichtigtes menschliches Eindringen zu einer jährlichen Dosis von weniger als 1 mSv für Anwohner des Lagers führt, sind keine Vorkehrungen erforderlich, um die Wahrscheinlichkeit oder die Folgen menschlichen Eindringens zu vermindern. Liegt die erwartete Dosis für die Anwohner zwischen 1 mSv und 20 mSv pro Jahr, muss versucht werden, die Wahrscheinlichkeit bzw. das Schadensmaß mit vernünftigem Aufwand zu begrenzen. Eine erwartete Dosis von mehr als 20 mSv jährlich macht es erforderlich, einen anderen Entsorgungsweg zu beschreiten (IAEA 2011, S. 13f.).

Bei unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen werden voraussichtlich jene Personen, die unmittelbar an der Aktivität beteiligt sind, die zum Eindringen in das Lager führt, den höchsten effektiven Dosen ausgesetzt sein. Da die Wahrscheinlichkeit des Eindringens als gering eingeschätzt wird, bewertet die IAEA das generelle Risiko für Personen als gering. Durch die Sicherheitsvorteile, die die Endlagerung mit sich bringt, werde dieses Risiko vermutlich überwogen (IAEA 2011, S. 51). Dass die IAEA das Risiko für Personen, die aktiv am Eindringen, zum Beispiel mittels Tiefbohrungen, beteiligt sind, ohne weitere Begründung aus ihren Betrachtungen ausschließt, ist umstritten – insbesondere, da diesem Risiko in internationalen Untersuchungen zum menschlichen Eindringen große Bedeutung beigegeben wird (Posiva 2013, S. 10).

Wenn die Einhaltung von Dosis- oder Risikogrenzwerten beurteilt werden soll, mahnt die IAEA zur Vorsicht beim unbeabsichtigten menschlichen Eindringen, bei sehr seltenen Naturereignissen und bei Kalkulationen, die sehr lange Zeiträume umfassen, da in diesen Fällen die Ungewissheiten zu groß sind (IAEA 2011, S. 52). Die Untersuchung von Szenarien des menschlichen Eindringens kann allerdings dazu beitragen, die Robustheit eines Endlagers im tiefen Untergrund nachzuweisen (IAEA 2012, S. 82) und zu optimieren – wobei darauf zu achten ist, dass die spezifischen Annahmen, die zum menschlichen Eindringen getroffen werden, keinen zu starken Einfluss auf die Optimierung ausüben (Vigfusson et al. 2007, S. 35).

In Deutschland ordnet die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) das unbeabsichtigte menschliche Eindringen den Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten zu, die für die Sicherheit des Endlagers relevant werden können. Solche Entwicklungen sind zu beschreiben, soweit deren Berücksichtigung der weiteren Optimierung des Endlagersystems oder der Überprüfung der Robustheit des Endlagersystems dienen kann (§3 EndlSiAnfV 2020a). Sie sind bei der Optimierung des Endlagersystems (§12 EndlSiAnfV 2020a) und der Überprüfung der Robustheit des Endlagersystems zu berücksichtigen. Die Optimierung zur Verringerung möglicher Auswirkungen von zukünftigen menschlichen Aktivitäten auf das Endlagersystem ist allerdings lediglich nachrangig durchzuführen (§12 EndlSiAnfV 2020a).

Das unbeabsichtigte menschliche Eindringen muss also im Safety Case betrachtet werden, spielt beim Belegen der Sicherheit eines Endlagersystems aber lediglich eine untergeordnete Rolle.

## Motive, die zum unbeabsichtigten Eindringen führen

Aufgrund der inhärenten Ungewissheiten zu künftigen anthropogenen Entwicklungen lässt sich nicht antizipieren, wie und mit welcher Wahrscheinlichkeit ein unbeabsichtigtes Eindringen erfolgt. Im Safety Case wird daher mit stilisierten Szenarien gearbeitet, die einerseits geeignet sein sollen, um die Robustheit des Lagers zu prüfen, andererseits aber auch aus heutiger Perspektive plausibel erscheinen.

Dass ein «unbeabsichtigtes» Eindringen in ein verschlossenes Endlager fahrlässig erfolgt, ist aus heutiger Sicht nicht plausibel, weil der Aufwand, der getrieben werden muss, um zum Endlager vorzudringen, groß ist. Wahrscheinlicher ist, dass wesentliche sicherheitsrelevante Informationen für die Menschen, die in das Lager eindringen, nicht verfügbar sind. Für die Nichtverfügbarkeit wesentlicher Informationen gibt es aus heutiger Perspektive verschiedene mögliche Erklärungen:

- Die Informationen sind gänzlich verloren gegangen, zum Beispiel infolge einer tiefgreifenden gesellschaftlichen Krisensituation.
- Die Informationen sind unvollständig, zum Beispiel aufgrund organisationaler oder technischer Mängel beim Langzeitwissenserhalt.
- Die Informationen wurden bei der Übertragung über die Zeit verfälscht, zum Beispiel aufgrund von Mängeln bei der Übersetzung in neue Sprachen oder Formate.
- Das Wissen darüber, dass es die Informationen gibt, ist nicht verfügbar, zum Beispiel weil die Informationen im Lauf der Zeit als immer weniger wichtig betrachtet wurden und letztlich in immer umfangreicher werdenden Archiven «verschwunden» sind.
- Informationen werden falsch interpretiert oder eingeschätzt, zum Beispiel weil sich das Wissen über Radioaktivität und der Umgang damit stark verändert haben.
- Die Informationen werden als nicht mehr relevant betrachtet, zum Beispiel weil Menschen unempfindlicher gegen ionisierende Strahlung geworden sind.
- Informationen werden den Menschen, die ins Lager eindringen, bewusst vorenthalten, zum Beispiel weil einige Bevölkerungsgruppen von anderen unterdrückt und ausgebeutet werden.

Die Einschätzung, dass ein fahrlässiges Eindringen in ein Endlager nicht plausibel ist, kann sich aufgrund künftiger Entwicklungen als überholt erweisen.

Auch wenn Informationen nicht oder nur eingeschränkt verfügbar sind, setzt das Eindringen zusätzlich voraus, dass es ein Motiv gibt, in Richtung des verschlossenen Endlagers in den tiefen Untergrund vorzustoßen. Motive, die aus heutiger Sicht bei mangelnder Information zum Endlager relevant sein könnten, sind:

- die Nutzung des Untergrunds als Raum für neue Infrastrukturen, zum Beispiel zum Gütertransport, zur Entsorgung unerwünschter Substanzen wie Kohlendioxid oder zur Zwischenlagerung von Energieträgern
- die Schaffung von Lebensräumen im tiefen Untergrund, zum Beispiel aufgrund starker klimatischer Veränderungen, die das Leben an der Erdoberfläche erschweren
- die Nutzung materieller Ressourcen im Untergrund, zum Beispiel von Rohstoffen, die beim Erbauen des Lagers noch nicht als wertvoll eingestuft wurden oder von kleineren Vorkommen seltener Rohstoffe, die sich mit neuen Technologien gut ausbeuten lassen
- die Nutzung energetischer Ressourcen im Untergrund, zum Beispiel von Wärme in tiefen geologischen Formationen



- Informationsgewinn, zum Beispiel im Rahmen von Forschungsprojekten
- Abenteuerlust, Entdeckerfreude, die Suche nach neuen Erlebnissen in bisher unbekanntem Räumen
- Planlose Bewegungen im Untergrund, zum Beispiel mit steuerungslos gewordenen Maschinen

Darüber, wie plausibel solche Motive sind, entscheiden wesentlich die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere auch die Technologieentwicklung. Wie diese Rahmenbedingungen künftig aussehen werden, ist ungewiss.

## Verlauf eines unbeabsichtigten Eindringens

Das Motiv, das zum Eindringen führt, beeinflusst die verwendeten Techniken und damit auch den Ablauf des unbeabsichtigten Eindringens. Da Tiefbohrungen aufwändig sind, wird gegenwärtig davon ausgegangen, dass einer solchen Bohrung nicht-invasive Untersuchungen vorausgehen würden, die Hinweise auf eine durch das Endlager bedingte Anomalie im tiefen Untergrund liefern würden. Welche Aktionen die Entdeckung einer Anomalie auslöst, lässt sich allerdings nicht vorhersehen. Es ist sowohl möglich, dass die Anomalie als Warnzeichen gedeutet würde, als auch, dass sie Interesse wecken und damit das unbeabsichtigte Eindringen erst auslösen würde (Posiva 2013, S. 18f.). Wesentlich für die Auswirkungen ist, wann erkannt wird, dass es sich um ein Lager für hochradioaktive Abfälle handelt, ob daraufhin versucht wird, Schutzmaßnahmen zu ergreifen, zum Beispiel das Lager wieder zu verschließen, und wie wirksam diese Schutzmaßnahmen sind (NAS 1995, S. 114).

Die zum Eindringen in das Endlager verwendeten Technologien wirken sich auf die Gefährdung von Menschen aus. Unter Umständen erfolgt der gesamte Prozess maschinell, so dass Menschen nicht unmittelbar gefährdet werden, oder es dringen heute noch unbekannte Lebensformen in das verschlossene Endlager ein. Ggf. könnten sogar autonome Maschinen ein Lager freilegen, obwohl diese Aktivität von Menschen nicht erwünscht ist (Hora & Winterfeldt 1997, S. 169). Bisher wurden international unter anderem die radiologischen Konsequenzen von Tiefbohrungen näher untersucht, dem Anlegen von Untertagebauwerken im Kristallingestein, dem Auslaugen von Salzformationen, dem Abbau von Salz in konventionellen Bergwerken und dem Bau von untertägigen Lagerkavernen (Posiva 2013, S. 13f.).

## Folgen eines unbeabsichtigten Eindringens

Entscheidend für die Auswirkungen des Eindringens in ein Endlager ist unter anderem (Seitz 2015, S.10),

- wann das Eindringen erfolgt, insbesondere wie weit die Radiotoxizität der Abfälle bereits abgeklungen ist
- ob das Entsorgungsbergwerk direkt getroffen wird oder nur sein Umfeld
- ob Abfall getroffen wird und welche Merkmale dieser Abfall aufweist
- wie die beim Eindringen freigesetzten Radionuklide in der Biosphäre verteilt werden

Mögliche Konsequenzen des Eindringens in ein Endlager sind:

- radiologische Auswirkungen auf die Personen, die in das Lager eindringen oder direkt an entsprechenden Aktivitäten beteiligt sind
- radiologischen Auswirkungen auf unbeteiligte Personen am Lagerstandort und in dessen Umgebung, die direkt mit dem Eindringen in Zusammenhang stehen
- radiologische Auswirkungen auf Personen, die mit der weiteren Verwendung des geborgenen Materials in Zusammenhang stehen (NAS 1995, S. 114)
- radiologische Auswirkungen auf die Umwelt am Lagerstandort und in dessen Umgebung
- Veränderungen in der geologischen Umgebung des Endlagers. Ein Beispiel sind Veränderungen im Grundwassersystem, die zu Schäden bei Menschen und Umwelt führen, etwa aufgrund von induzierten Änderungen der Grundwasserflüsse oder aufgrund von Bohrflüssigkeit, die den Radionuklidtransport im Grundwasser verändert (Posiva 2013, S. 13f)
- Auswirkungen auf die dauerhafte Sicherheit des Endlagers

Für Personen, die Endlagerbehälter anbohren oder den Bereich der gelagerten Endlagerbehälter vordringen, ist in jedem Fall mit hohen effektiven Dosen zu rechnen (Posiva 2013, S. 71; Vigfusson et al. 2007, S. 35).

Die National Academy of Sciences der USA (NAS) kam 1995 zum Schluss, dass es keine wissenschaftliche und technische Basis gebe, um die Folgen des unbeabsichtigten Eindringens zuverlässig einzuschätzen. Sie begründet diesen Schluss mit Ungewissheiten und konkret damit, dass beispielsweise technologische Entwicklungen, Veränderungen der Raumnutzung oder die Verständlichkeit passiver Markierungen in der weiteren Zukunft nicht antizipiert werden könnten (NAS 1995, S. 106f).

Entsprechend rät die IAEA davon ab, die Einhaltung von Dosis- oder Risikogrenzwerten beim unbeabsichtigten menschlichen Eindringen genau kalkulieren zu wollen, da die Ungewissheiten zu groß sind (IAEA 2011, S. 52). Das menschliche Eindringen in ein Lager kann nicht Teil einer risiko-basierten Sicherheitsanalyse sein (NAS 1995, S. 109), im Safety Case aber genutzt werden, um die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen (IAEA 2012, S. 26).

## Vorkehrungen gegen das unbeabsichtigte Eindringen

In den 1970er bis 1990er Jahren wurden das menschliche Eindringen in ein verschlossenes Endlager und mögliche Gegenmaßnahmen international eingehender diskutiert und untersucht. Einige der damals verwendeten Forschungsansätze basierten auf systematischen Überlegungen auf der Basis gegenwärtiger menschlicher Aktivitäten (NEA 1995) oder der Analyse von Erfahrungen aus der Vergangenheit, andere auf generischen Überlegungen zu Sprache, Zeichen und Information (NAS 1995, S. 106) oder auf der systematischen Auswertung von Experteneinschätzungen zu künftigen Entwicklungen (vgl. zum Beispiel Hora & Winterfeldt 1997). In dieser Zeit wurden auch genauere Überlegungen zur Markierung eines Endlagers angestellt (vgl. zum Beispiel Benford 1999 und siehe unten «Markierung eines Endlagers»).

In den letzten Jahren hat sich die Aufmerksamkeit internationaler und nationaler Gremien vom Langzeitschutz des Lagers vor menschlichem Eindringen auf die Weitergabe von Information von einer Generation zur nächsten und die Förderung langfristigen Denkens verlagert. Eine wichtige Rolle spielte dabei die Initiative «Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations» der Nuclear Energy Agency der OECD (NEA, Hotzel 2019).

Die aus heutiger Sicht wichtigsten Maßnahmen gegen unbeabsichtigtes Eindringen gleichen den Maßnahmen, die die Sicherheit eines Endlagersystems angesichts von Ungewissheiten zu menschlichen Einwirkungen in der Zukunft stärken können (vgl. «Safety Case zur Langzeitsicherheit»):

- Die Tiefenlage eines Endlagers und sein Verschluss erschweren das unbeabsichtigte Eindringen.
- Die Wahl eines Standortes, an dem keine Konflikte mit anderen Nutzungs- und Schutzinteressen im Untergrund zu erwarten sind, wirkt menschlichen Aktivitäten im Umfeld des Endlagers entgegen, die zum unbeabsichtigten Eindringen führen könnten.
- Der Verzicht auf den Einbau seltener Wertstoffe im Endlagersystem verhindert, dass Menschen unbeabsichtigt in das Endlager eindringen, um Wertstoffe zu gewinnen.
- Ein einfaches und robustes Lagerdesign hält mögliche Anreize zum Eindringen in das Endlager gering und erschwert das unbeabsichtigte Eindringen in ein Endlager.
- Dokumentation und Wissenstransfer gewährleisten, dass Informationen zum Standort des Endlagers und zum sicheren Umgang mit dem Endlager erhalten und verfügbar bleiben, und wirken damit dem unbeabsichtigten Eindringen entgegen.
- Eine Markierung des Endlagersystems warnt Menschen davor, unbeabsichtigt in ein Endlager einzudringen.

Die IAEA formulierte entsprechende Anforderungen an ein Endlager, die die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens vermindern sollen: Ein Endlager darf nicht dort errichtet werden, wo bekannte und bedeutende mineralische Ressourcen, geothermisches Wasser oder andere wertvolle Ressourcen im Untergrund vorhanden sind (IAEA 2011, S. 21). Nach dem Verschluss eines Endlagers soll eine institutionalisierte Überwachung dazu beitragen, dass es nicht zu unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in das Lager kommt (IAEA 2011, S. 42). Falls Situationen auftreten können, in denen die Abfälle immer noch eine relevante Radioaktivität zeigen und nicht mehr ausreichend weit von der Biosphäre entfernt sind, zum Beispiel infolge Gletscherüberfahrung oder Erosion, muss die Möglichkeit menschlichen Eindringens bei der Standortauswahl und der Auslegung eines Endlagers untersucht und berücksichtigt werden (IAEA 2011, S. 28).

## Markierung eines Endlagers

Die Idee, Endlager für radioaktive Abfälle dauerhaft zu kennzeichnen, zu markieren, um ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen zu verhindern, wurde erstmals in den 1980er Jahren intensiver verfolgt, zunächst in den USA (Buser 2010, S. 4).

Die IAEA erwähnt Markierungen als mögliche Maßnahme, um menschlichem Eindringen in ein Lager für radioaktive Abfälle längerfristig vorzubeugen. Solche Markierungen können an der Erdoberfläche oder im Untergrund angebracht werden (IAEA 2011, S. 41f).

In der schweizerischen Kernenergiegesetzgebung, die 2005 in Kraft trat, wird die Markierung geologischer Tiefenlager gefordert. Dem Kernenergiegesetz zufolge (Art. 40 KEG) schreibt der Bundesrat die «dauerhafte Markierung des Lagers» vor. Der Bundesrat kam diesem Auftrag nach, indem er in der Kernenergieverordnung festlegte, dass der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers mit dem Verschluss unter anderem zu gewährleisten hat, dass die Markierung dauerhaft ist. In Deutschland und Finnland ist keine Markierung vorgeschrieben.

In der Schweiz präzisiert das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) die Vorgaben der Kernenergiegesetzgebung auf Richtlinienenebene. Der aktuellen Richtlinie zufolge ist mit dem Gesuch um die Baubewilligung für ein geologisches Tiefenlager auch ein Konzept für die dauerhafte Markierung vorzulegen (ENSI 2020, S. 7). Das bedeutet, dass ein solches Konzept nach heutigem Stand der Planung erst in den 2040er Jahren vorgelegt werden muss. Das Konzept soll interdisziplinär angelegt sein und beispielsweise auch kulturelle Aspekte berücksichtigen. Von einer dauerhaften Markierung wird erwartet, dass sie ihre Aufgabe über einige Jahrtausende erfüllt. Diese Anforderung wird mit Verweis auf internationale Vorbilder begründet und damit, dass die Radiotoxizität der eingelagerten Abfälle über diesen Zeitraum bereits signifikant abgenommen haben wird (ENSI 2019, S. 16f.)

In den nachfolgenden Bewilligungsschritten ist das Konzept zu konkretisieren. Die dauerhafte Markierung darf die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen und ist im Sicherheitsnachweis für die Nachverschlussphase zu berücksichtigen (ENSI 2020, S. 7). Die Langzeitsicherheit würde zum Beispiel beeinträchtigt, wenn eine Markierung noch erkennbar aber nicht mehr interpretierbar ist und damit möglicherweise einen Anreiz zum Vordringen in das Lager bietet (ENSI 2019, S. 17).

Um die Wirksamkeit von Maßnahmen, die das Eindringen in ein Endlager verhindern sollen, in der Zukunft abzuschätzen, sind eigentlich keine ausreichenden wissenschaftlichen Grundlagen vorhanden (NAS 1995, S. 106f). Anforderungen an den Schutz vor menschlichem Eindringen zu formulieren, kann trotzdem sinnvoll sein, weil entsprechende Maßnahmen zumindest für einen überschaubaren Zeitraum nach dem Verschluss des Endlagers Wirkung entfalten. Der Nutzen passiver Markierungen des Lagers überwiegt zumindest in der näheren Zukunft potenziell die Nachteile (NAS 1995, S. 108).

In einer Literaturstudie zur Markierung von Endlagern wurden drei unterschiedliche Typen von Markierungen identifiziert: Lebende Organismen, die Emissionen aus dem Lager anzeigen, Anlagen an der Erdoberfläche oder oberflächennah, Kennzeichnungen im Endlagersystem untertage (Buser 2010, S. 42f). Die Studie legt die Verwendung von großen Mengen unscheinbarer Ton- oder Keramikobjekte nahe, die im Umfeld des Endlagerbergwerks und/oder im Bergwerk selbst platziert werden (Buser 2010, S. 56).

In der Studie zu menschlichem Eindringen in ein Endlager, die im Kontext der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) durchgeführt wurde, ermittelten die Autoren vier hintereinander gestaffelte Ansatzpunkte für Maßnahmen, die menschliches Eindringen verhindern oder seine negativen Auswirkungen vermindern (GRS 2014, S. 65):

- Chance erhöhen, dass das Lager entdeckt wird, bevor ein Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) erfolgt
- unbeabsichtigtes Eindringen in den ewG verhindern
- Chance vergrößern, dass das Lager entdeckt wird, nachdem ein Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgt ist
- radiologische Auswirkungen des Eindringens in das Lager vermindern

Potenzielle Maßnahmen wurden den Kategorien «Information», «Monitoring», «Konzept», «Konstruktion» und «Anzeige» zugeordnet:

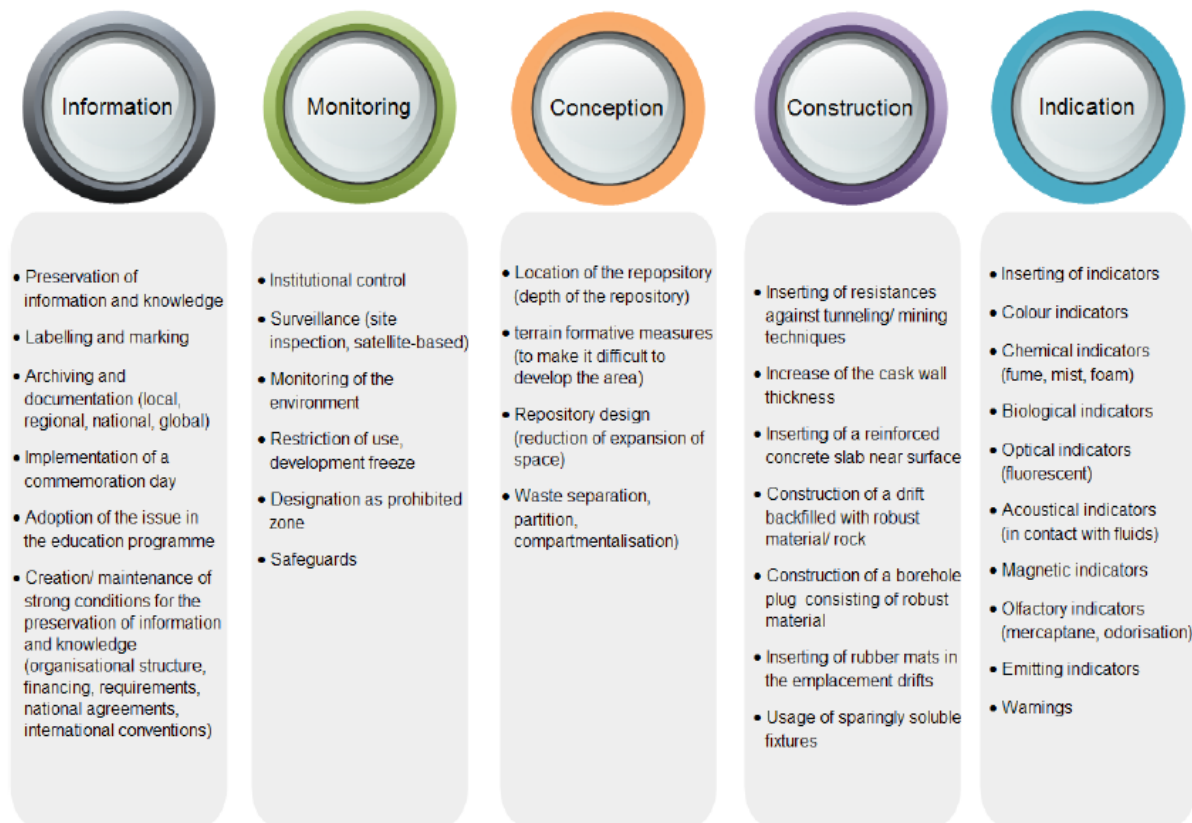


Abbildung 9-1: Generische Maßnahmen, die das unbeabsichtigte Eindringen in ein verschlossenes Endlager verhindern können (GRS 2014, S. 68). Die Abbildung vermittelt eine Übersicht über die Breite möglicher Ansätze.

Von allen geprüften Sicherheitsmaßnahmen wurden letztlich nur zwei als sinnvoll beurteilt: Das Einfärben des Verfüllmaterials oder die Verwendung eines Verfüllmaterials, das im Wirtsgestein offensichtlich einen Fremdkörper darstellt, über eine möglichst lange Strecke im Zugangsbauwerk bis zur Einlagerungssohle. Beide Maßnahmen zielen darauf ab, dass nach dem Eindringen in den einschlusswirksamen Auffälligkeiten vorliegen, die von den handelnden Personen als solche gedeutet werden können. Wesentliche Gründe für das Ausscheiden anderer Sicherheitsmaßnahmen waren Konflikte mit vorrangigen Optimierungszielen oder ein Kosten-Nutzen-Verhältnis, das als sehr ungünstig beurteilt wurde (GRS 2014, S. 63f).

- Benford, G. 1999: Deep time. How humanity communicates across millenia. Avon Books, Inc., New Books, Inc., New York.
- Buser, M. 2010: Literaturstudie zum Stand der Markierung von geologischen Tiefenlagern. Bundesamt für Energie. Bern.
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020a: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- EndlSiAnfV 2020b: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Referentenentwurf vom 6. April 2020 einschließlich Begründung.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.
- ENSI 2019: Geologische Tiefenlager. Erläuterungsbericht zur Richtlinie ENSI-G03/d. Entwurf zur externen Anhörung, September 2019. Brugg.
- ESK – Entsorgungskommission 2012: Guideline on human intrusion into a repository for radioactive waste.
- GRS 2014: Studies relating to human intrusion into a repository. Beuth, T.; Baltes B.; Bollingerfehr, W.; Buhmann, D.; Charlier, F.; Filbert, W.; Fischer-Appelt, K.; Mönig, J.; Rübél, A.; Wolf, J. GRS-348.
- Hora, S.C.; von Winterfeldt, D. 1997: Nuclear waste and future societies: A look into the deep future. Technological forecasting and social change 56. S. 155-170.
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific safety guide No. SSG-23. Wien.
- IAEA 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.
- NAS – National Academy of Sciences 1995: Technical bases for Yucca Mountain standards. Committee on technical bases for Yucca Mountain standards, board on radioactive waste management, commission on geosciences, environment, and resources, national research council. National Academy Press. Washington D.C.
- NEA – Nuclear Energy Agency 1999: Future human actions at disposal sites. A report of the NEA working group on future human actions at radioactive waste disposal sites. Paris.
- Posiva 2013: Human intruder dose assessment for deep geological disposal. Smith, G.M; Molinero, J; Delos A.; Valls, A.; Conesa, A.; Smith, K.; Hjerpe, T. Working report 2013-23. Helsinki.
- Seitz, R. 2015: Considerations related to human intrusion in the context of disposal of radioactive waste – results of the IAEA HIDRA project. Savannah River National Laboratory. Presentation. SRNL-MS-2015-00160.
- Vigfusson, J. et al. 2007: European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management. Vigfusson, J; Maudoux, J.; Raimbault, Ph.; Röhlig, K.J.; Smith, R.E.



# 10. Human Factor-Ungewissheiten

Human Factor-Ungewissheiten stellen eine mögliche neue Kategorie von Ungewissheiten dar, die im Safety Case betrachtet werden sollte. Sie werden im vorliegenden Arbeitspapier vorgestellt.

*Human Factor-Ungewissheiten gehen auf kognitiv, psychisch, organisational oder sozial bedingte Einflüsse bei der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines Endlagers sowie nach dem Verschluss des Endlagers zurück. Human Factor-Ungewissheiten sind auch beim Prozess der Erstellung eines Safety Case zu beachten.*

*Bisher werden Human Factor-Ungewissheiten im Safety Case nur selten explizit thematisiert. Es haben sich jedoch Praktiken herausgebildet, um insbesondere den Einfluss von unbekanntem Bekanntem im Safety Case zu begrenzen.*

*Um Verzerrungen beim Erkennen und Konstruieren von Realität im Safety Case zu verhindern, zum Beispiel durch Bestätigungsfehler («confirmation biases»), wurde vorgeschlagen, statt eines Safety Cases oder ergänzend zum Safety Case einen «Risk Case» durchzuführen. Der Risk Case zielt darauf ab, zu beweisen, dass ein System nicht sicher ist.*

Human Factor-Ungewissheiten gehen auf kognitiv, psychisch, organisational oder sozial bedingte Einflüsse bei der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines Endlagers sowie nach dem Verschluss des Endlagers zurück. Human Factor-Ungewissheiten sind auch beim Prozess der Erstellung eines Safety Case zu beachten.

## Modell der gestaffelten Abwehrschichten

Vor etwa 30 Jahren lenkte James Reason die Aufmerksamkeit von menschlichen Fehlhandlungen als Ursache von Unfällen auf Bedingungen, die Unfälle begünstigen. Nach seinem Modell führen Mängel in mehreren «Abwehrschichten» oder «Sicherheitsbarrieren» dazu, dass es schließlich zu einem unerwünschten Ereignis kommt.



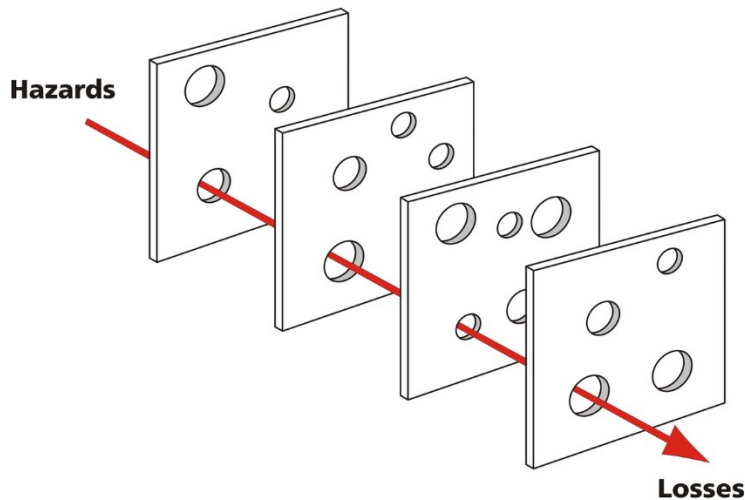


Abbildung 10-1: Reasons Modell der Unfallentstehung (Wikipedia 2020). Ein Unfall setzt voraus, dass die Gefahr, die letztlich zum Schaden führt, bei allen Abwehrschichten auf Schwachstellen trifft.

Im Fall der Endlagerung lässt sich das Modell von Reason auf Unfälle während der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines Endlagers anwenden, aber auch auf unerwünschte Beeinträchtigungen der Langzeitsicherheit.

Die Möglichkeit eines (zunächst) unbemerkten «Durchtunnels von Abwehrschichten» bringt Ungewissheiten hervor, die alle Schritte auf dem Entsorgungspfad bis zum verschlossenen Endlager begleiten und auch die Langzeitsicherheit eines Endlagers betreffen.

Reasons Modell schließt neben kognitiv und psychisch bedingten Einflüssen sowie organisationalen Einflüssen auf der Ebene des Vorhabenträgers und der behördlichen Aufsicht weitere Ebenen ein, beispielsweise die Ebene der staatlichen Regulierung oder der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Diese Ebenen werden hier im Kontext der anthropogenen Ungewissheiten betrachtet. Zwischen Human Factor-Ungewissheiten und anthropogenen Ungewissheiten bestehen inhaltliche Überschneidungen.

## Human Factor-Ungewissheiten als Gegenstand des Safety Case

Human Factors werden international als Gegenstand des Safety Case wahrgenommen. Der Umgang mit Human Factors wurde bisher aber weniger detailliert untersucht als der Umgang mit Parameter-, Modell- oder Systementwicklungsungewissheiten.

Die International Atomic Energy Agency (IAEA) hält fest, dass organisatorische und managementbezogene Aspekte bei der Einschätzung der Sicherheit im Safety Case zu berücksichtigen seien (IAEA 2012, S. 29). In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) werden menschliche und organisatorische Faktoren angesprochen, zum Beispiel wenn Qualitätssicherung gefordert wird. Der Umgang mit menschlichen und organisatorischen Faktoren wird jedoch nicht eingehender geregelt (EndlSiAnfV 2020) – möglicherweise, weil zu diesem Thema eine Leitlinie formuliert werden soll. Die maßgebende schweizerischen Richtlinie enthält ein Kapitel zu Qualitätssicherung und Dokumentation. Dort wird im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung ein Managementsystem angesprochen (ENSI 2020, S. 17f).

Im Rahmen einer Untersuchung zu sozialwissenschaftlichen Aspekten, die im Safety Case berücksichtigt werden sollten, wurde beim Thema Human Factor-Ungewissheiten kein expliziter Handlungsbedarf identifiziert (Sailer et al. 2010).

Eine wesentliche Ursache für das weitgehende Ausblenden menschlicher und organisatorischer Faktoren dürfte darin liegen, dass der Safety Case bisher primär auf die Langzeitsicherheit ausgerichtet ist. Nach dem Verschluss eines Endlagers spielen menschliche und organisatorische Faktoren eine geringere Rolle als während der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung. Künftige Entwicklungen von Organisationen und künftige soziale Einflüsse lassen sich kaum über längere Zeiträume prognostizieren. Wird ein ganzheitlicher Safety Case angestrebt, der auch Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers umfasst, ändert sich diese Situation. In frühen Safety Cases können bereits Überlegungen zu Human Factors für künftige Schritte auf dem Entsorgungspfad angestellt und diese Überlegungen in späteren Safety Cases entsprechend dem dann aktuellen Stand von Wissenschaft und Erfahrung aktualisiert werden.

Für Kernkraftwerke hat die IAEA Anforderungen formuliert, die menschliche Faktoren über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage miteinbeziehen. Diese Anforderungen sind nicht nur auf die Auslegung, die Instandhaltung und Nachrüstungen von Kernkraftwerken ausgerichtet, sondern auch auf die Überprüfungen der Sicherheit. Sie zielen darauf ab, das Risiko menschlicher Fehler zu minimieren und die menschliche Leistungsfähigkeit zu optimieren – beides zugunsten der Sicherheit (IAEA 2019). Viele Anforderungen lassen sich sinngemäß sowohl auf die übertägigen als auch auf die untertägigen Teile eines Endlagers übertragen.

Human Factor-Einflüsse, die zu Sabotage führen oder dazu, dass die Sicherheit eines Endlagers aufgrund krimineller, terroristischer oder feindlicher staatlicher Aktivitäten beeinträchtigt wird, werden im Bereich des Safety Case behandelt, der Sicherung und Kernmaterialüberwachung gewidmet ist (vgl. «Einbezug von Sicherung und Kernmaterialüberwachung»). Da bei den Human Factors teilweise enge Bezüge zwischen Sicherheit und Sicherung bestehen, ist es wichtig, dass sich die Spezialisten für Sicherheit und Sicherung trotz Vorschriften zum Informationsschutz bei Sicherung und Kernmaterialüberwachung untereinander abstimmen können.

## Human Factor-Ungewissheiten bei der Erstellung des Safety Case

Für die Durchführung des Safety Case sind die unbekannt Bekannten (vgl. «Bekannte und Unbekannte») unter den Human Factor-Ungewissheiten wichtig, weil sie das Potenzial besitzen, die Sicherheitsaussagen im Safety Case erheblich zu verfälschen. Unbekannte Bekannte sind Informationen, die verfügbar und für den Safety Case relevant sind. Diese Informationen werden von Personen, die am Safety Case mitarbeiten, jedoch nicht genutzt.

Mögliche Ursachen dafür, dass relevante Informationen nicht genutzt werden, sind:

- Informationen sind schwer zugänglich.
- Bezug der Informationen zum Safety Case ist nicht offensichtlich.
- Informationen stammen aus Fachdisziplinen, die im Safety Case (bisher) keine wesentliche Rolle spielen.

- Informationen passen nicht zu den in der Fachgemeinde vorherrschenden Überzeugungen.
- Informationen stammen von einem Absender, der nicht ernstgenommen oder abgelehnt wird.
- Informationen stellen bisherige Gewissheiten infrage.
- Informationen könnten die Darlegung der Sicherheit im Safety Case beeinträchtigen und sind daher unerwünscht.
- Informationen könnten zu Verzögerungen auf dem Entsorgungspfad führen und kommen daher ungelegen.
- Nutzung der Informationen für den Safety Case ist anspruchsvoll, aufwändig oder anstrengend.
- Nutzung der Informationen erfordert Ressourcen, die nicht ausreichend zur Verfügung stehen.
- Informationen werden ausgeblendet oder verworfen, weil Schlüsselpersonen überlastet oder überfordert sind.
- Relevanz der Informationen wird aufgrund fehlender Fachkompetenz nicht erkannt.
- Informationen werden aufgrund von hidden agendas unterdrückt.

Kritiker des Safety Case führen oft zwei Argumente an, die auf menschliches Verhalten im Projekt «Endlagerung» abzielen (vgl. zum Beispiel Buser & Wildi 2016; Blank 2012):

- Die internationale Gemeinschaft der Safety Case-Spezialisten hat über die vergangenen Jahrzehnte im Konsens eigene Gewissheiten herausgebildet, die sie nicht mehr ausreichend unabhängig, kritisch und innovativ hinterfragt.
- Die großen Investitionen, die ein Endlager erfordert, führen dazu, dass Bedenken bezüglich verbleibender Ungewissheiten unterdrückt werden, weil das Interesse an einer raschen und reibungslosen Realisierung des Lagers überwiegt.

Bewährte «Abwehrschichten» und Maßnahmen zur Vermeidung von unbekanntem Bekanntem bei der Erstellung von Safety Cases sind (vgl. u.a. IAEA 2019; PAMINA 2011; NEA 2009):

- die Entwicklung internationaler Empfehlungen zu den Inhalten des Safety Case und zu deren Überprüfung, an denen Spezialisten und Spezialistinnen aus verschiedenen Ländern mitgewirkt haben
- die Entwicklung nationaler Regelungen zu den Inhalten des Safety Case und zu deren Überprüfung, die auf internationalen Regelungen basieren und zusätzlich einen politischen Prozess durchlaufen haben
- die Dokumentation und Weiterentwicklung von «Best Practices» bei der Erarbeitung eines Safety Case
- das Beiziehen von Beratern und beratenden Gremien bei der Erstellung des Safety Case durch die Vorhabenträger
- die Beurteilung des Safety Case durch die Aufsichtsbehörden
- Peer Reviews und die Begutachtung des Safety Case durch unabhängige Zweitmeinungsinstanzen
- die kritische Beurteilung des Safety Case durch bzw. im Auftrag von Vertreterinnen und Vertretern der interessierten Öffentlichkeit
- eine gute Sicherheitskultur des Vorhabenträgers und eine gute Aufsichtskultur der Aufsichtsbehörde(n), die insbesondere eine hinterfragende und lernende Haltung fördern

- Managementsysteme bei Vorhabenträger und Aufsichtsbehörde, die einen angemessenen Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case vorsehen und fördern
- ein Qualitätssicherungssystem für die Erstellung des Safety Case
- die Protokollierung von Annahmen, Einschätzungen und Entscheidungen, die während der Erstellung des Safety Case und seiner Begutachtung getroffen wurden, einschließlich der jeweils verantwortlichen Person
- der dokumentierte Verzicht auf Einschätzungen, wo diese nur mit großen Ungewissheiten möglich sind
- ein iteratives Vorgehen bei der Erstellung und Verfeinerung des Safety Case
- disziplinar und interdisziplinär hochwertige Aus- und Weiterbildung für Personen, die an Safety Cases mitwirken
- die Bereitstellung ausreichender Ressourcen zur Durchführung des Safety Case
- die Vorgabe realistischer Zeitpläne für den Safety Case
- Untersuchungs-, Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur Verminderung von Ungewissheiten

Ergänzend könnten vermehrt Impulse aus anderen Fachgebieten und von Personen eingeholt werden, die sich beruflich nicht mit Safety Cases zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle befassen. Dies setzt voraus, dass sich die zugezogenen Spezialisten und Spezialistinnen zunächst mit Grundlagen der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle und mit dem Safety Case zur Endlagerung vertraut machen und bedingt daher Mehraufwand, bietet aber auch die Chance, etablierte und eingefahrene Argumentationsmustern im Sinn einer guten Sicherheitskultur zu hinterfragen. Eine weitgehende Form dieser Öffnung stellt transdisziplinäre Forschung zum Safety Case dar, bei der auch Wissen und Meinungen aus der Zivilgesellschaft einbezogen werden.

## Safety Case oder Risk Case?

2012 stellte die Nuclear Energy Agency der OECD (NEA) fest, dass Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten im Rahmen von Sicherheitsbewertungen gut etabliert seien: «Generally, these fall into one or more of the following five strategies: (1) demonstrating that the uncertainty is irrelevant to safety, (2) addressing the uncertainty explicitly, (3) bounding the uncertainty, (4) ruling out the event or process adding to the uncertainty, and (5) using an agreed stylised approach to avoid addressing the uncertainty explicitly» (NEA 2012, S. 13).

Auffallend an dieser Formulierung ist, dass sie ganz auf das Bestreben ausgerichtet scheint, Sicherheit zu beweisen und dafür Ungewissheiten, die diesem Ziel entgegenstehen, mit geeigneten Verfahren zu eliminieren. Solche affirmativen Aussagen finden sich auch in anderen Dokumenten der NEA, zum Beispiel: «It is a central task of safety assessment to show that it is indeed likely that the system will evolve as intended» (IGSC 2016, S. 38). Das Bestreben, die Sicherheit eines Endlagers zu beweisen, klingt auch im deutschen Wort «Sicherheitsnachweis» an, das oft immer noch als Übersetzung für «Safety Case» verwendet wird, insbesondere in der Schweiz.

Die einseitige Ausrichtung von Safety Cases auf das Beweisen von Sicherheit wird vor allem aus der Perspektive der Arbeits- und Organisationspsychologie als nicht sicherheitsgerich-

tet kritisiert. Demnach begünstigt die Durchführung eines «Sicherheitsnachweises» Bestätigungsfehler («confirmation bias»). Bestätigungsfehler führen dazu, dass Informationen, die die Sicherheit im Safety Case belegen, Informationen vorgezogen werden, die Zweifel an der Sicherheit wecken – unabhängig von der Richtigkeit der Informationen. Uneindeutige Informationen werden so interpretiert, dass sie den Sicherheitsbeweis stützen. «People will focus on and interpret evidence in a way that confirms the goal they have set for themselves» (Leveson 2011). Auch in der Wissenschaftstheorie wird empfohlen, Hypothesen dadurch zu prüfen, dass man sie zu widerlegen versucht (Kahnemann 2012, S. 108). Beim Bestätigungsfehler handelt es sich um eine unbewusste Neigung, die auf Heuristiken beruht. Es ist nicht auszuschließen, dass auch weitere kognitive Biases Einfluss auf die Erstellung, Überprüfung und Verwendung von Safety Cases nehmen.

Ein Vorschlag lautet daher, statt eines Safety Case einen «Unsafety Case» durchzuführen, der darauf abzielt zu beweisen, dass ein System nicht sicher ist (Leveson 2011). Damit würden allerdings auch viele Stärken des Safety Case aufgegeben. Sinnvoll erscheint daher, den Safety Case ggf. durch einen Unsafety Case oder Risk Case zu ergänzen. Eine weitere Möglichkeit wäre, den Safety Case diskursiv, zum Beispiel analog einem Gerichtsverfahren zu verhandeln (vgl. «

Regelungen zur Beurteilung von Risiken»).

## Vorschlag «Aufwertung menschlicher Einflüsse und Aktivitäten»

Menschliche Einflüsse und Aktivitäten können die Sicherheit eines Endlagersystems wesentlich beeinflussen. Menschlichen Einflüssen unterliegen auch die Entwicklung eines Safety Case und die Aussagen, die im Safety Case gemacht werden. Daher wird vorgeschlagen, menschlichen Einflüssen und Aktivitäten im Safety Case künftig einen größeren Stellenwert einzuräumen.

### Vorschlag

Entwicklungsarbeiten werden durchgeführt, um menschliche Einflüsse und Aktivitäten vermehrt in den Safety Case einzubeziehen und beim Prozess der Entwicklung von Safety Cases zu berücksichtigen.

### Begründung

Im Safety Case wird Realität nicht nur erkannt, sondern auch konstruiert (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität»). Auf die Personen und Organisationen, die Safety Cases entwickeln, wirken vielfältige Einflüsse ein, die nicht immer sicherheitsgerichtet sind. Diese Einflüsse prägen unter anderem die Wahrnehmung von Ungewissheiten und Entscheidungen, die angesichts von Ungewissheiten gefällt werden (vgl. «Psychologische Einflüsse»). Daher ist ein reflektierter Umgang mit menschlichen Einflüssen auf den Safety Case und im Safety Case erforderlich, der hohen Anforderungen gerecht wird.

Safety Cases werden von Spezialisten erstellt, wobei meistens wenige Schlüsselpersonen eine tragende Rolle einnehmen. Weltweit bilden diese Schlüsselpersonen eine überschaubare und gut vernetzte Fachgemeinschaft, die an internationalen Empfehlungen zusammenarbeitet. Bei Peer Reviews begutachten meistens Schlüsselpersonen die Arbeit anderer Schlüsselpersonen.

Beim Betrieb von Kernkraftwerken findet bereits seit längerem eine intensivere Auseinandersetzung mit Fragen der Sicherheitskultur statt. Zur Sicherheitskultur wird geforscht, Behörden entwickeln Leitlinien. In vielen Kernkraftwerken nimmt die Pflege einer guten Sicherheitskultur einen hohen Stellenwert ein und hat einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht. Umso erstaunlicher ist es, dass Sicherheitskultur bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle bisher kaum thematisiert wird.

Im Safety Case werden Aussagen über die künftige Entwicklung des Endlagersystems gemacht. Prospektives Wissen, insbesondere zu anthropogenen Entwicklungen, lässt sich nicht empirisch überprüfen. Prognosen künftiger Entwicklungen sind nicht nur ungewiss, sondern oft auch normativ geprägt und umstritten (vgl. «Gestalten von Vorhersagen künftiger Entwicklungen»). Reflexionen zu diesem Themenkomplex tragen dazu bei, die Aussagekraft und den Stellenwert von Aussagen, die im Safety Case gemacht werden, besser einzuschätzen. Zudem dürfte die vermehrte Auseinandersetzung mit menschlichen Einflüssen auf den Safety Case und im Safety Case das Vertrauen der interessierten Öffentlichkeit in den Safety Case stärken.

## Contra

International und national wurden bereits viele Anstrengungen unternommen, um zu gewährleisten, dass der Safety Case objektive und realitätsnahe Aussagen enthält. Dazu zählen die Empfehlungen internationaler Organisationen wie der IAEA und der NEA, nationales Recht, behördliche Leitlinien, breit abgestützte Arbeitsgrundlagen wie der Katalog von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen der NEA oder zertifizierte Qualitätsmanagementsysteme der Vorhabenträger (vgl. unter anderem «Verifikation und Objektivierung des Umgangs mit Ungewissheiten»).

Die Entwicklung von der Sicherheitsanalyse zum Safety Case und die Weiterentwicklungen des Safety Case in den vergangenen Jahren zeigen, dass in der Gemeinschaft der Spezialisten, die an Safety Cases arbeiten, eine hinterfragende Grundhaltung und Offenheit für Verbesserungsvorschläge vorhanden sind.

## Überlegungen zur Umsetzung

Entwicklungsarbeiten, um menschliche Einflüsse und Aktivitäten vermehrt in den Safety Case einzubeziehen und beim Prozess der Entwicklung von Safety Cases zu berücksichtigen, können auf bestehenden Grundlagen aufbauen. Diese Grundlagen stammen aus der Kerntechnik, aber auch aus anderen Branchen, in denen Sicherheit eine wesentliche Rolle spielt, wie beispielsweise der Luftfahrt. Sie beziehen sich allerdings auf den Betrieb von Anlagen. Zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle muss dagegen in den meisten Ländern vorerst vor allem geplant, untersucht und geforscht werden. Inwiefern sich Erkenntnisse aus dem Betrieb von Anlagen auf die Erstellung von Safety Cases übertragen lassen, sollte in einem Entwicklungsvorhaben evaluiert werden, das sowohl Spezialisten und Spezialistinnen mit praktischer Erfahrung als auch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler einbezieht – und damit transdisziplinär angelegt ist.

Blank, A. 2012: Rechtshilfe Gorleben: der Atomfilz und die Sicherheitsanalyse. <https://wendland-net.de/post/rechtshilfe-gorleben-der-atomfilz-und-die-sicherheits-analy-32031>. Abgerufen am 10.1.2021.

Buser, M.; Wildi, W. 2016: Über Ethik und Irreführung: Die Konsequenzen? Eine Floskel! <https://www.nuclearwaste.info/ueber-ethik-und-irrefuehrung-die-konsequenzen-eine-floskel-teil-5-und-ende-der-serie/>. Abgerufen am 10.1.2021.

EndlSiAnV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2019: Human factors engineering in the design of nuclear power plants. Specific safety guide No. SSG-51. Wien.

IAEA 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific safety guide No. SSG-23. Wien.

- Integration Group for the Safety Case – IGSC 2016: Scenario development workshop synopsis.
- Kahnemann, D. 2012: Schnelles Denken, langsames Denken. 15. Auflage. Siedler Verlag. München.
- Leveson, N. 2011: White paper on the use of safety cases in certification and regulation. ESD working paper series. Massachusetts Institute of Technology. Boston.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2012: Methods for safety assessment of geological disposal facilities for radioactive waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. NEA No. 6923. Paris.
- NEA 2009: International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC). Outcomes of the INTESC project. NEA No. 6251. Paris.
- PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case 2011: Project summary report. Deliverable D5.1.
- Sailer, M.; Kallenbach-Herbert, B.; Brohmann, B.; Spieth-Achtnich, A. 2010: Behandlung sozialwissenschaftlicher Aspekte im Safety Case. Öko-Institut e.V. Darmstadt.
- Wikipedia 2020: Schweizer-Käse-Modell. <https://de.wikipedia.org/wiki/Schweizer-Käse-Modell>. Abgerufen am 6.2.2020





# 11. Normative Ungewissheiten

Normative Ungewissheiten stellen eine mögliche neue Kategorie von Ungewissheiten dar, die im Safety Case betrachtet werden sollte. Sie werden im vorliegenden Arbeitspapier vorgestellt.

*Normative Ungewissheiten liegen vor, wenn Informationen fehlen oder uneindeutig sind, die für moralische Beurteilungen benötigt werden. Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist mit normativen Ungewissheiten verbunden.*

*Der Safety Case ist auf die Einhaltung der rechtlichen und behördlichen Endlagersicherheitsanforderungen ausgerichtet. Die Endlagersicherheitsanforderungen entlasten den Safety Case daher von normativen Ungewissheiten.*

*Angesichts der langen Bewertungszeiträume sind normative Ungewissheiten für die Sicherheit von Endlagersystemen relevant und sollten deshalb auch im Safety Case untersucht und diskutiert werden.*

Normative Ungewissheiten treten auf, wenn Informationen fehlen oder uneindeutig sind, die für moralische Beurteilungen benötigt werden. Normative Ungewissheiten umfassen epistemische Ungewissheiten zu Werthaltungen, zu schützenden Werten und zu Optionen, diese Werte zu schützen. Wenn normative Ungewissheiten darauf zurückgehen, dass nicht klar ist, was als akzeptabel zu beurteilen ist und was nicht, liegt eine normative Ambiguität vor.

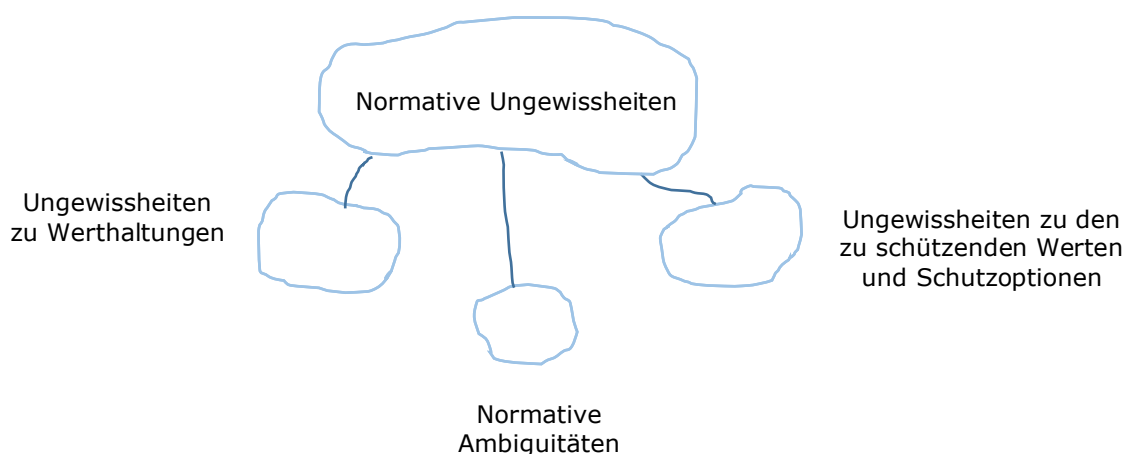


Abbildung 11-1: Formen normativer Ungewissheiten (eigene Darstellung). Normative Ungewissheiten, die die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle betreffen, lassen sich in die abgebildeten Kategorien unterteilen.

## Normative Ungewissheiten bei der Endlagerung

Bei normativen Ungewissheiten im Safety Case kann es sich um epistemische Ungewissheiten handeln, etwa darüber, ob sich die Empfindlichkeit von Menschen gegenüber ionisierender Strahlung in ferner Zukunft verändern wird oder ob es in 100'000 Jahren noch Menschen geben wird. Normative Ungewissheiten können aber auch auf Nicht-Wissen darüber zurückgehen, wie eine Beurteilung vorgenommen werden soll (MacAskill 2014, S. 2) – insbesondere angesichts unterschiedlicher moralischer Standpunkte und offener oder unklarer rechtlicher Regelungen.

Normative Ungewissheiten mit Bezug zur Endlagerung, die epistemische Ungewissheiten sind, betreffen zum Beispiel

- den gesellschaftlichen Wertewandel, der dazu führen kann, dass Risiken der Endlagerung in Zukunft anders beurteilt werden als heute
- Veränderungen der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, die dazu führen, dass sich die Ergebnisse von Abwägungen verschiedener Risiken gegeneinander, von Risiken und Chancen sowie von Risiken und risikovermindernden Maßnahmen verändern
- Veränderungen der zu schützenden Werte, beispielsweise Veränderungen von Ökosystemen oder Veränderungen der biologischen Konstitution von Menschen
- Veränderungen bei den Möglichkeiten, Werte vor Risiken zu schützen, zum Beispiel neue Instrumente des Strahlenschutzes oder neue Ansätze zur Behandlung von Krebserkrankungen

Normative Ungewissheiten, die auf Nicht-Wissen darüber beruhen, wie eine Beurteilung vorgenommen werden soll, werden auch als normative Ambiguitäten bezeichnet. Der Diskurs um die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist von normativ aufgeladenen Konflikten geprägt (Grunwald 2010, S. 76). Ambiguitäten sind häufig Ursache dafür, dass die Risikoeinschätzung und -beurteilung von Kontroversen und Polemiken begleitet ist (IRGC 2017, S. 18).

Normative Ambiguitäten mit Bezug zur Endlagerung betreffen zum Beispiel:

- Zukunftsverantwortung in Bezug auf Sicherheit. Muss über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ein konstantes Niveau an Sicherheit gewährleistet sein, weil die Verursacher der hochradioaktiven Abfälle grundsätzlich Verantwortung dafür tragen, das Risiko für künftige Generationen auf ein akzeptables Maß zu begrenzen? Oder nimmt die Verantwortung für die Sicherheit des Lagers mit wachsendem Zeithorizont ab, weil es Menschen nicht möglich ist, für eine Million Jahre Sicherheit zu gewährleisten, selbst wenn sie große Sorgfalt walten lassen?
- Zukunftsverantwortung in Bezug auf Handlungsfreiheit (Ott & Semper 2017). Ist die Handlungsfreiheit künftiger Generationen am besten gewährleistet, wenn ihnen keine Verpflichtungen auferlegt werden, sich aktiv mit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle befassen zu müssen, oder wenn sie die hochradioaktiven Abfälle aktiv kontrollieren und jederzeit so mit ihnen umgehen können, wie sie es für richtig halten?
- Die Beurteilung sehr geringer Strahlendosen. Sind sehr geringe Strahlendosen akzeptabel, wenn sie deutlich unter der mittleren natürlichen Strahlendosis und damit im Bereich des Grundrauschens alltäglicher Risiken liegen, oder sind sie nicht akzeptabel,

weil gemäß Linear-No-Threshold-Modell (LNT-Modell) auch sehr niedrige Strahlendosen Gesundheitsschäden verursachen können?

- Die Abwägung von Risiken und Ungewissheiten. Dürfen Abstriche bei der Langzeitsicherheit in Kauf genommen werden, um Rückholbarkeit und eine erleichterte Bergung zu ermöglichen? Ist bei der Abwägung von zusätzlichen Risiken in der näheren Zukunft und ungewissen Risikoreduktionen auf längere Frist den kurzfristig verminderten oder den langfristig verminderten Risiken der Vorzug zu geben? Diese Frage stellt sich beispielsweise, wenn Personen beim Monitoring eines Endlagers zusätzlichen Risiken ausgesetzt werden sollen mit dem Ziel, die Folgen von Ungewissheiten zur Langzeitsicherheit abzuwenden.

## Epistemische Ungewissheiten zu Werthaltungen

Wie sich gesellschaftliche Werthaltungen in Zukunft gestalten werden, ist aufgrund der Vielfalt und Komplexität gesellschaftlicher Entwicklungen, die sich auf Werthaltungen auswirken können, inhärent ungewiss. Für den Safety Case wird daher davon ausgegangen, dass Menschen und Umwelt über den gesamten Nachweiszeitraum vor Schäden durch die hochradioaktiven Abfälle geschützt werden sollen, wobei auf ein Schutzniveau Bezug genommen wird, das gegenwärtig als akzeptabel beurteilt wird.

Der Anspruch, dauerhaft Schutz auf einem Niveau zu gewährleisten, das gegenwärtig als akzeptabel beurteilt wird, ist prinzipiell mehrdeutig. Er könnte so verstanden werden, dass das Schutzniveau für menschliche Individuen, beispielsweise das maximal akzeptable individuelle Todesfallrisiko für Einzelpersonen, und das Schutzniveau für die Umwelt über den gesamten Nachweiszeitraum konstant gehalten werden soll. Wenn sich die Empfindlichkeit von Menschen und Umwelt gegenüber ionisierender Strahlung verändern sollte, müssten dann ggf. höhere Sicherheitsanforderungen eingehalten werden oder die bestehenden Sicherheitsanforderungen könnten gelockert werden.

Im Allgemeinen wird der Anspruch aber so interpretiert, dass die heute geltenden Dosisgrenzwerte während des gesamten Nachweiszeitraums eingehalten werden sollen, so zum Beispiel in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020). Erweisen sich Menschen und Umwelt in der Zukunft widerstandsfähiger gegenüber radiologischen Einwirkungen als heute, sinkt das Risiko und das Schutzniveau für sie steigt an. Nimmt ihre Empfindlichkeit gegenüber radiologischen Einwirkungen zu, nimmt das Risiko zu und das Schutzniveau ab.

Wenn künftige Generationen entscheiden, die Akzeptabilität von Risiken anders festzulegen als die gegenwärtigen Generationen, ist dies Teil ihrer Handlungsfreiheit. Da Menschen in der Zukunft ihre Entscheidungen selbst verantworten müssen, ist es nicht Aufgabe der Menschen der Gegenwart, Vorkehrungen für solche Fälle zu treffen. Denkbar sind allerdings auch Entwicklungen, die dazu führen, dass gesellschaftliche Werthaltungen angepasst werden müssen, ohne dass eine freie Entscheidung künftiger Generationen oder von weiten Teilen der künftigen Bevölkerung vorliegt. Mögliche Beispiele sind

- massive Auswirkungen des Klimawandels, die die Gesellschaft zwingen, Ressourcen von der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle zugunsten dringenderer Probleme abziehen, oder

- gesellschaftliche Konflikte, in denen Teile der Bevölkerung anderen Teilen der Bevölkerung ihre Wertvorstellungen aufzwingen.

Solchen Entwicklungen kann heute vor allem durch eine schnelle Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle, eine robuste Gestaltung des Entsorgungspfads und des Endlagersystems begegnet werden. Entsprechend müssten in einem ganzheitlichen Safety Case, der die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachverschlussphase eines Endlagers umfasst, Ungewissheiten, die zu Verzögerungen bei der Endlagerung führen können oder die Robustheit des Entsorgungspfads beeinträchtigen, ungünstiger beurteilt werden als solche, die keine Auswirkungen auf den zeitlichen Verlauf und die Robustheit des Entsorgungspfades zeigen.

## Epistemische Ungewissheiten zu den zu schützenden Werten

Bei den zu schützenden Werten bestehen ebenso wie bei den epistemischen Ungewissheiten zu Werthaltungen sehr große Ungewissheiten, mit denen im Safety Case umgegangen werden muss.

Über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre sind Veränderungen bei Menschen, Tieren und Umwelt aufgrund der natürlichen biologischen Evolution zu erwarten. Die biologische Evolution wird ihrerseits durch Veränderungen der Umwelt, zum Beispiel durch Klimaveränderungen, beeinflusst. In einer Million Jahren kann die biologische Evolution erhebliche Veränderungen in der Biosphäre hervorbringen. Die Art *Homo sapiens* entstand erst vor etwa 200'000 bis 300'000 Jahren. Die Fähigkeit, Laktose bis ins Erwachsenenalter hinein zu verdauen, bildete sich erst vor einigen Tausend Jahren in manchen menschlichen Populationen heraus. Die Entwicklung von Resistenzen gegen Krankheiten wie AIDS ist beim Menschen zurzeit im Gang. Tiere mit kurzen Generationszeiten sind in der Lage, sich veränderten Umweltbedingungen besonders schnell anzupassen. Populationen von Schmetterlingen beispielsweise wechselten verschiedentlich innerhalb weniger Jahrzehnte die Farbe, wenn sie sich damit besser vor Fressfeinden schützen konnten. Ein bekanntes Beispiel ist der Birkenspanner, der sich im 19. Jahrhundert in England an die durch Rußpartikel dunkel gefärbte Rinde der Bäume anpasste.

Neben der natürlichen Evolution gewinnen durch Menschen hervorgerufene Veränderungen von Menschen, Tieren und Umwelt immer mehr an Bedeutung. Der Klimawandel bringt großräumige Veränderungen der Umwelt mit sich. Weltweit existieren nur noch wenige Lebensräume, die nicht oder kaum vom Menschen beeinflusst sind. Mit Praktiken wie Jagen, Roden, Trockenlegen von Feuchtgebieten, landwirtschaftlicher Nutzung, Versiegeln von Böden oder dem Verschleppen und Einführen von Neobiota haben Menschen die natürliche Umwelt weltweit bereits erheblich beeinflusst. Nutztiere und -pflanzen wurden durch Züchtung verändert (NEA 2019, S. 46). International werden inzwischen zunehmend gentechnisch veränderte Nutzpflanzen angebaut. Durch Einsatz von Gene Drives sollen Insekten, die Krankheiten von Menschen und Tieren übertragen, unschädlich gemacht werden. Nicht zuletzt verändern Menschen auch ihre eigene biologische Konstitution mit Techniken wie Präimplantationsdiagnostik, Genome Editing und Gentherapie, Bioelektronik oder pharmakologischem Enhancement.

Beim Menschen hat die Forschung der letzten Jahre nicht dazu geführt, dass die bisherigen Grundlagen des Strahlenschutzes fundamental überdacht werden müssten. Der Schutz von ökologischen Systemen wird international thematisiert. Der bisherige Stand der Wissenschaft deutet jedoch nicht daraufhin, dass Dosen, die unterhalb der Grenzwerte für die Betriebs- und die Langzeitsicherheit von Endlagern liegen, zu Schädigungen ökologischer Systeme führen. Um konkrete Grenzwerte oder andere regulatorische Anforderungen festzulegen, ist es aber noch zu früh (Ikonen & Kangasniemi 2018, S. 63). Hier verbleibt also eine epistemische Ungewissheit zu den aktuell zu schützenden Werten, die noch vermindert werden muss und möglicherweise auch zusätzliche Erkenntnisse dazu liefert, welche Anforderungen an den Strahlenschutz künftiger ökologischer Systeme am Standort eines Endlagers zu stellen sind.

Was den Schutz menschlicher und nachmenschlicher Lebensformen der Zukunft anbelangt ist aus aktueller Perspektive zu vermuten, dass Menschen auch in Zukunft danach streben werden, ihre Gesundheit zu stärken und Krankheiten zu heilen. Wenn sie dabei erfolgreich sind und beispielsweise Krebserkrankungen zunehmend erfolgreich behandeln, wird es nicht erforderlich sein, die heute geltenden Grenzwerte herabzusetzen. Die reale künftige Entwicklung ist jedoch nicht bekannt und damit ungewiss.

## Normative Ambiguitäten

Von Ambiguitäten wird gesprochen, wenn Informationen mehrdeutig sind. Bei der Untersuchung von Ungewissheiten wird davon ausgegangen, dass sich der Safety Case auf eine Realität bezieht, die untersucht, verstanden und beurteilt werden kann. Gewissheiten sind damit möglich. Gleichzeitig wird im Safety Case aber auch Realität konstruiert – durch die Beiträge unterschiedlicher Fachdisziplinen, mit den verwendeten Instrumenten und Verfahren, mit den rechtlichen Vorgaben etc. (Eckhardt & Rippe 2016, S. 18f.). Ambiguitäten gehen unter anderem auf unterschiedliche Arten und Weisen, Realität zu konstruieren, aber auch auf unterschiedliche moralische Standpunkte zurück.

Bei den Ambiguitäten im Safety Case kann zwischen interpretativen und normativen Ambiguitäten unterschieden werden. Interpretative Ambiguitäten liegen vor, wenn eine Information auf verschiedene Arten und Weisen gedeutet werden kann. Bei normativen Ambiguitäten bestehen unterschiedliche Ansichten dazu, was als akzeptabel zu betrachten ist und was nicht (Renn et al. 2011, S. 5). Ambiguitäten sind verbreitet, wenn es um die Beurteilung von Sicherheit geht, wobei häufig interpretative und normative Ambiguitäten ineinandergreifen.

Der Interpretation sind vielfach unterschiedliche Wahrnehmungen vorgelagert (Marti 2016). Wahrnehmung bezeichnet das überwiegend unbewusste Aufnehmen und Zusammenführen von Informationen. Ambiguität bezieht sich dagegen auf die Reflexion, also die bewusste gedankliche Prüfung von Informationen.

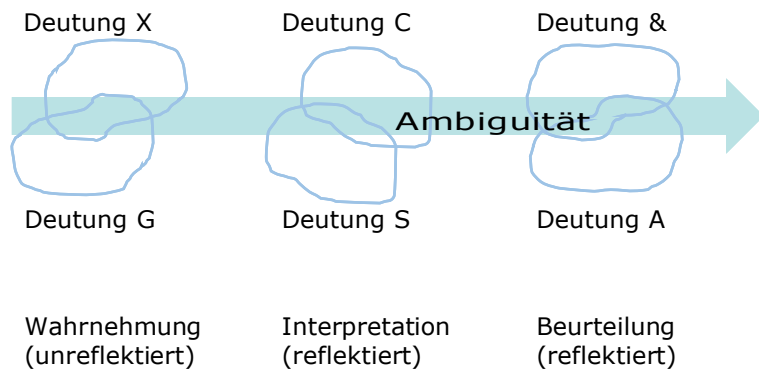


Abbildung 11-2: Ambiguitäten, die zu unterschiedlichen Beurteilungen von Informationen führen (eigene Darstellung). Sowohl bei der Wahrnehmung der Information als auch bei der darauffolgenden Interpretation und der anschließenden Beurteilung der Information kann Mehrdeutigkeit auftreten.

Wesentliche Ambiguitäten im Safety Case beruhen darauf, dass Konzepte wie «Risiko» und «Sicherheit» unterschiedlich verstanden werden und gleichzeitig verschiedene Einschätzungen von akzeptablem Risiko und akzeptabler Sicherheit bestehen, also sowohl interpretative als auch normative Ambiguitäten vorliegen. Bei Risiken spiegelt sich die Verbindung von Wahrnehmung, Interpretation und Beurteilung in verschiedenen «Risikoansichten» wider (Marti 2016). Zentrale Ambiguitäten bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle, die den Safety Case betreffen, beziehen sich, wie bereits erwähnt, auf «Sicherheit», die Beurteilung geringer Strahlendosen und «Handlungsfreiheit» im Kontext der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Eine grundlegende Ambiguität zeigt sich bei der Aussage: «Das Endlager ist sicher.» Sicherheit ist ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept (vgl. «Sicherheit»). Verschiedene Personen und verschiedene Gruppen der Gesellschaft vertreten unterschiedliche Konzepte von Sicherheit und unterschiedliche Ansichten dazu, wann eine akzeptable Sicherheit gewährleistet ist. Entsprechend sind nicht alle Personen und gesellschaftlichen Gruppierungen mit den rechtlichen und behördlichen Regelungen dazu, wann ein Endlager sicher ist, einverstanden. Das wirkt sich nicht nur auf ihre Beurteilung der Ergebnisse eines Safety Case, sondern auch auf ihre Beurteilung des Konzepts und der Durchführung eines Safety Case aus.

- Eckhardt, A.; Rippe, K.P. 2016: Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf-Verlag. Zürich.
- EndSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- Grunwald, A. 2010: Ethische Anforderungen an nukleare Endlager. Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe.
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.
- Ikonen, A.T.K; Kangasniemi, V. 2018: Overview of international status of considering radiological protection of non-human biota in the context of deep geological disposal of radioactive waste. Expertenbericht im Auftrag des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats. Brugg.
- IRGC – International Risk Governance Council 2017: Introduction to the IRGC risk governance framework. Revised version 2017. Lausanne.
- MacAskill, W. 2014: Normative uncertainty. Thesis for the degree of doctor of philosophy. St Anne's College. University of Oxford. Oxford.
- Marti, M. 2016: Risikoansichten. ENTRIA-Arbeitsbericht-05. Zollikerberg.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.
- Ott, K.; Semper, F. 2017: Nicht von meiner Welt. Zukunftsverantwortung bei der Endlagerung von radioaktiven Reststoffen. GAIA 26/2 (2017): 100–102. <https://doi.org/10.14512/gaia.26.2.9>.
- Renn, O.; Jovanovic, A.; Schröter, R. 2011: Social unrest. OECD/IFP Project on "Future Global Shocks".





# 12. Grundlagen der Regulierung von Ungewissheiten

Im Safety Case wird belegt, ob ein Endlagersystem den rechtlichen Sicherheitsanforderungen entspricht. Im vorliegenden Arbeitspapier werden daher grundsätzlich Ansätze vorgestellt, um den Umgang mit Risiken und Ungewissheiten zu regulieren.

*Der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case wird im Recht gegenwärtig vor allem prozedural geregelt. Regelungen, die Menschen, Tiere und Umwelt auch gegen größere als die derzeit angenommenen Risiken und bisher noch unbekannte Risiken schützen sowie Forschung zur Verminderung verbleibender Ungewissheiten fördern, entsprechen sinngemäß dem Vorsorgeprinzip.*

*Aufsichtsbehörden sollten eine Position dazu entwickeln, welche Ungewissheiten bei wesentlichen Entscheidungsschritten auf dem Entsorgungspfad akzeptabel sind und welche nicht.*

International besteht weitgehender Konsens dazu, dass die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle am besten in bergwergartigen Bauwerken im tiefen geologischen Untergrund erfolgen soll und dass es sich dabei um eine Aufgabe handelt, die auf nationaler Ebene zu erfüllen ist – zumindest von denjenigen Ländern, die ein Programm zur Nutzung der Kernenergie unterhalten oder unterhalten haben.

Da auch in Ländern mit größeren Programmen zur Nutzung der Kernenergie nur jeweils ein Endlager für hochradioaktive Abfälle benötigt wird, stellen die Standortauswahl, die Errichtung, der Betrieb und die Stilllegung des Endlagers für die meisten Länder ein einmaliges Projekt dar. Umso wichtiger ist der Erfahrungsaustausch auf internationaler Ebene. Die International Atomic Energy Agency (IAEA) und die Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD bieten dafür zentrale Plattformen. Die IAEA gibt ein Regelwerk heraus, das weltweit Standards für die Endlagerung setzt. Diese Standards werden teilweise von weiteren Organisationen wie der Europäischen Union oder der Western European Nuclear Regulators Association (WENRA) ergänzt bzw. konkretisiert und auf nationaler Ebene in Gesetze, Verordnungen und behördliche Vorgaben umgesetzt.

## Regelungen zur Beurteilung von Risiken

Für Risiken existieren verschiedene etablierte Regelungstechniken (vgl. Seiler 2000).

Ob ein bestimmtes Risiko akzeptabel ist oder nicht, kann mit Hilfe von Grenzwerten beurteilt werden, die im Recht oder in nachgeordneten Vorschriften, zum Beispiel in Leitlinien oder Normen, festgelegt sind. Dazu zählen beispielsweise Grenzwerte für jährliche individuelle Personendosen oder für das jährliche individuelle Todesfallrisiko. Liegt das Risiko oberhalb des Grenzwertes, wird es als nicht akzeptabel eingestuft. Risiken, die sich unterhalb des Grenzwertes bewegen, werden als akzeptabel beurteilt.

Der Festlegung von Grenzwerten liegen wissenschaftliche Erkenntnisse zugrunde, die technischen Möglichkeiten zur Risikoverminderung, ökonomische Abwägungen und die gesellschaftliche Akzeptanz des entsprechenden Risikos. Falls sich diese Grundlagen verändern, zum Beispiel, weil die Toleranz der Gesellschaft gegenüber einem Risiko abnimmt, sind Anpassungen von Grenzwerten möglich. Bei der Festlegung von Grenzwerten arbeiten in der Regel wissenschaftliche, rechtliche und politische Gremien zusammen (Brunnengräber et al. 2015, S. 4).

Die Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) beinhaltet einen impliziten Risikogrenzwert. Als Indikator für das Risiko wurde, im Einklang mit den Empfehlungen der IAEA, die zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung gewählt, die während des Nachweiszeitraums durch Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen auftreten kann (§7 EndlSiAnfV 2020). Vorgelagert ist ein Grenzwert zum maximal zulässigen jährlichen Austreten von Radionukliden aus den wesentlichen Sicherheitsbarrieren (§4 EndlSiAnfV 2020).

Die Beurteilung von Risiken anhand nur vermeintlich präziser Werte, die beispielsweise aus Modellrechnungen oder systematischen Risikoanalysen stammen, wurde in den letzten Jahren verschiedentlich kritisiert. Wenn Genauigkeit suggeriert wird, indem Ungewissheiten unterschlagen werden, kann dies zu Entscheidungen führen, die der realen Situation nicht angemessen (Saltelli & Funtowicz 2014) und nicht sicherheitsgerichtet sind. Die Anwendung von Indikatoren erscheint einfach und klar, obwohl die Ergebnisse immer im Kontext ihres Zustandekommens beurteilt werden müssten.

Mit der Anwendung des Sicherheitsindikators aus dem Regelwerk der IAEA und der EndlSiAnfV wird die Wahrnehmung der vielgestaltigen und vielschichtigen «Sicherheit» vielfach auf einen Aspekt, nämlich die effektiven Dosen an der Erdoberfläche, fokussiert. Diese Wahrnehmung ist dem offen und breit konzipierten Safety Case nicht angemessen, sondern erinnert an frühere Versuche, das Endlagerverhalten zu modellieren und auf diese Weise einen «Sicherheitsnachweis» zu erbringen. Mit der Wahl der effektiven Dosis als Indikator wird die Aufmerksamkeit auf eine natur- und ingenieurwissenschaftliche Beurteilung der Sicherheit gerichtet, obwohl Sicherheit interdisziplinär betrachtet werden muss. Zudem besteht die Gefahr, dass die im Safety Case ermittelten Dosen von der interessierten Öffentlichkeit als «reale Dosen» wahrgenommen werden, obwohl es sich in Wirklichkeit lediglich um stark formalisierte Kalkulationsergebnisse handelt.

Damit ist ein grundlegendes Problem angesprochen, das die Verwendung von Grenzwerten betrifft: «Grenzwerte stehen nie für sich allein, sondern immer im Kontext ganzer Regelwerke. Diese Kontexte und ihre Bedeutung werden von unterschiedlichen Akteuren jedoch

unterschiedlich stark und in unterschiedlicher Weise wahrgenommen» (Brunnengräber et al. 2015, S. 6).

Ein stärker diskursiv ausgerichteter Ansatz zur Beurteilung der Sicherheit könnte dazu beitragen, dass andere Aspekte der Sicherheit mehr in den Vordergrund treten. So ließe sich beispielsweise prüfen, ob der Vorhabenträgerin als «Anwältin», die die Sicherheit des Endlagersystems mit dem Safety Case belegt, institutionalisiert ein «Staatsanwalt» gegenübergestellt werden sollte, der den Safety Case einem fundierten «Stresstest» unterzieht. Die darauf gestützten politischen Entscheidungen würden von der Aufsichtsbehörde vorbereitet, die damit die Rolle der «Richterin» übernehme (vgl. auch «Safety Case oder Risk Case?»).

Generell kommen im Recht neben Grenzwerten auch präskriptive, deterministische Sicherheitsvorschriften zur Anwendung, Verweise auf den Stand von Wissenschaft und Technik oder Ähnliches sowie prozedurale Ansätze (Seiler 2000). Da alle diese Ansätze sowohl Vor- als auch Nachteile aufweisen, werden sie in Regelungen oft miteinander kombiniert.

## Regelungen zur Beurteilung von Risiken, die mit quantifizierbaren Ungewissheiten verbunden sind

Der Beurteilung von Risiken anhand von Grenzwerten liegt ein deterministischer Ansatz zugrunde, bei dem davon ausgegangen wird, dass sich ein Risiko präzise einschätzen lässt. Probabilistische Analysen, wie sie unter anderem im Rahmen von Safety Cases durchgeführt werden, zeigen jedoch eine Spannbreite auf, innerhalb der sich die erwartenden Risiken mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit bewegen werden. Wenn sowohl das Risiko als auch dessen Spannbreite quantifizierbar sind, lassen sich grenzwertbasierte Regelungen treffen, die eine eindeutige Unterscheidung zwischen akzeptablen und nicht akzeptablen Situationen versprechen. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für eine behördliche Vorgabe, die im Kontext des schweizerischen Standortauswahlverfahrens, dem Sachplan geologische Tiefenlager, zur Anwendung kommen kann.

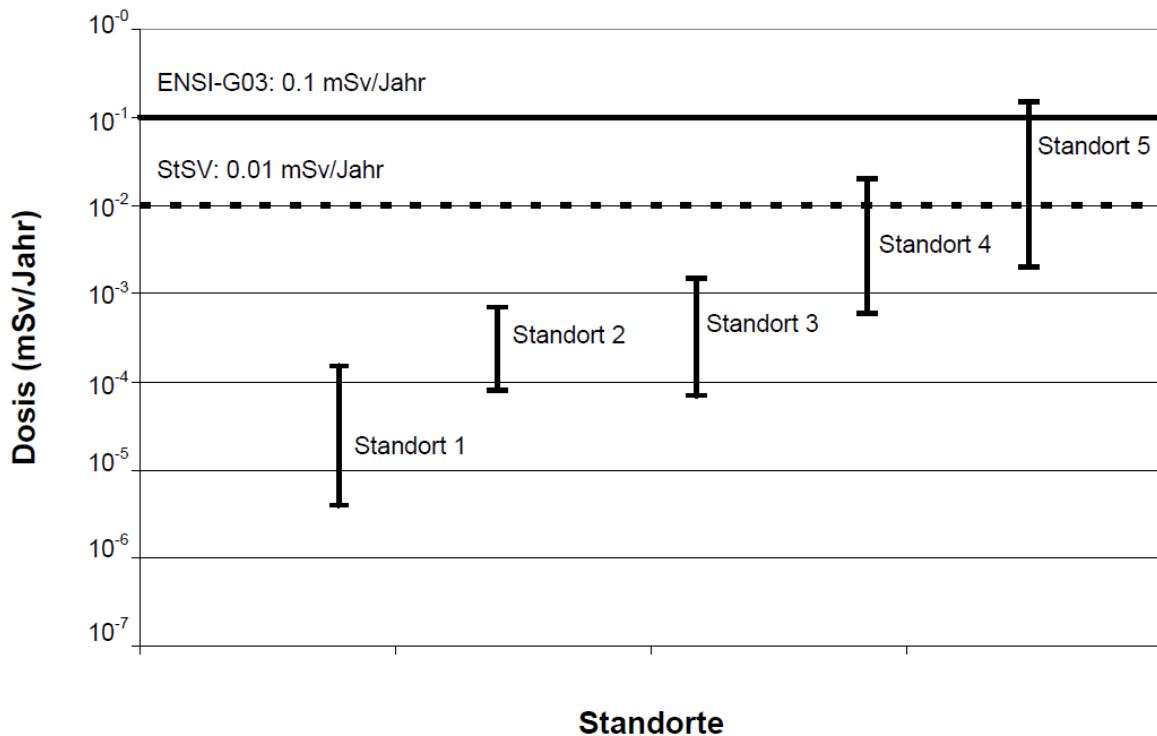


Abbildung 12-1: Behördliche Vorgabe zur Beurteilung der Ergebnisse aus provisorischen Sicherheitsanalysen für fünf Tiefenlager-Standorte (ENSI 2010, S. 16). Das generische Beispiel zeigt auf, welche Rolle Dosisintervalle bei der Beurteilung spielen sollen, ob die rechtlich verankerten und behördlich vorgegebenen Grenzwerte eingehalten sind.

Im vorliegenden Fall ist ein Dosisgrenzwert von 0.1 mSv pro Jahr einzuhalten. Die quantifizierten Ungewissheiten bei der Ermittlung der jährlichen individuellen Personendosen sind in Form von Dosisintervallen dargestellt. Der Ermittlung des Dosisintervalls liegt in diesem Fall ein standardisiertes Verfahren zugrunde (ENSI 2010, S. 14). Alternativ könnte bei bekannter Verteilung des zu prüfenden Werts auch angegeben werden, welche Perzentilen (Posiva 2019, S. 15) bzw. Quantilen zu berücksichtigen sind.

Das Dosisintervall von Standort 5 reicht über den Dosisgrenzwert hinaus. Daher kann nicht eindeutig festgestellt werden, dass ein Endlager an diesem Standort den Dosisgrenzwert einhalten würde. Im Standortauswahlverfahren scheidet Standort 5 aus. Die Standorte 1 bis 3 werden als sicherheitstechnisch gleichwertig beurteilt, da ihre Dosisintervalle vollständig unter dem Grenzwert liegen, unter dem gemäß schweizerischer Strahlenschutzgesetzgebung auf eine weitergehende strahlenschutztechnische Optimierung verzichtet werden kann.

Allgemein ist es angezeigt, bei Risiken, die eine Streubreite aufweisen, nicht nur auf den Mittelwert, sondern auch auf die Streuung Bezug zu nehmen. Bei sehr breiter Streuung der Risikowerte verliert die Beurteilung anhand von Grenzwerten an Aussagekraft. Entscheidungen zur Akzeptabilität von Risiken können dann zu berechtigten Kontroversen Anlass geben. Trotzdem bilden probabilistische Risikoanalysen auch hier eine sinnvolle Entscheidungsgrundlage, weil sie aufzeigen, wie groß die quantifizierbaren Ungewissheiten sind (Seiler 2000, S. 7f).

Nicht erfasst werden allerdings nicht quantifizierbare Ungewissheiten, und auch über die Qualität der Einschätzung der Ungewissheiten (vgl. «Vorgehen bei der Beurteilung von Ungewissheiten») verlangt die oben dargestellte behördliche Vorgabe keine Auskunft.

## Regelungen zur Beurteilung von Risiken, die mit einschätzbaren, aber nicht quantifizierbaren Ungewissheiten verbunden sind

Wenn sich Risiken aufgrund von Ungewissheiten nicht quantifizieren aber dennoch einschätzen lassen, besteht die Möglichkeit, sie semiquantitativ zu erfassen (zur Definition einschätzbare Ungewissheiten vgl. «Formen der Beschreibung von Ungewissheiten»). Dabei wird beispielsweise die Möglichkeit eines Schadens einer von mehreren Wahrscheinlichkeitsklassen und auch das Schadenausmaß einer von mehreren Klassen zugeordnet. Zur Beurteilung dient eine Risikomatrix.

Die folgende Abbildung gibt ein Beispiel aus dem Bereich der Arbeitssicherheit wieder.

Eintrittswahrscheinlichkeit	Schadensschwere				
	Keine gesundheitlichen Folgen	Bagatellfolgen (die Arbeit kann fortgesetzt werden)	Mäßig schwere Folgen (Arbeitsausfall, ohne Dauerschäden)	Schwere Folgen (irreparable Dauerschäden möglich)	Tödliche Folgen
Praktisch unmöglich	gering	gering	gering	mittel	mittel
Vorstellbar	gering	gering	mittel	mittel	hoch
Durchaus möglich	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
Zu erwarten	gering	mittel	hoch	hoch	hoch
Fast gewiss	gering	mittel	hoch	hoch	hoch

Abbildung 12-2: Beispiel einer Risikomatrix (VBG 2020). Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenausmaß werden semiquantitativ eingeschätzt. Die Matrix zeigt auf, wie spezifische Kombinationen von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenausmaß zu beurteilen sind.

Risiken, die im Bereich der mit «gering» bezeichneten Felder liegen, werden als akzeptabel, solche, die sich im Bereich der mit «hoch» bezeichneten Felder befinden, als inakzeptabel beurteilt. Bei Risiken, die im Bereich der mit «mittel» bezeichneten Felder liegen, sind Maßnahmen zur Risikoverminderung zu treffen, sofern sich diese Maßnahmen mit vertretbarem Aufwand realisieren lassen.

In der Praxis ist die Risikomatrix sehr verbreitet, da sie leicht verständlich ist und sich einfach anwenden lässt. Kritisiert wird an der Risikomatrix (vgl. vor allem Cox 2009, S. 101f.), dass

- oft nicht geklärt ist, wie das einzuordnende Risiko definiert ist, zum Beispiel inwiefern verschiedene Risiken mit geringeren Schadenausmaßen zu Risiken mit größeren Schadenausmaßen aggregiert werden dürfen
- die Einordnung der Risiken in Wahrscheinlichkeits- und Ausmaßklassen oft nicht zuverlässig ist, insbesondere weil
  - der Verwendung der Risikomatrix kein einheitliches Risikoverständnis zugrunde liegt
  - die Varianz der Wahrscheinlichkeiten und Schadenausmasse so groß ist, dass keine eindeutige Verortung in der Matrix möglich ist
  - die Einordnung in Klassen von Schadenausmaßen implizite Wertungen beinhaltet
  - Wechselwirkungen zwischen Risiken nicht erfasst werden
- eine optimale Ressourcenallokation im Risikomanagement mehr Informationen erfordert als sie die Risikomatrix enthält, zum Beispiel zu den Kosten risikovermindernder Maßnahmen und deren Wirksamkeit

Zudem muss geklärt sein, dass die semiquantitative Einordnung in die Risikomatrix nicht dadurch verfälscht wird, dass neben quantifizierbaren Ungewissheiten auch relevante nicht-quantifizierbare Ungewissheiten zu Wahrscheinlichkeiten und Schadenausmaßen bestehen.

## Sonstige Regelungen zum Umgang mit Ungewissheiten

Regelungen zu Ungewissheiten, die sich nicht oder nur eingeschränkt quantifizieren lassen, beruhen vor allem auf prozeduralen Ansätzen.

Ungewissheiten lassen sich beispielsweise durch Konservativitäten abfangen. Bei der Risikoanalyse etwa werden Beiträge zum Risiko, die mit Ungewissheiten behaftet sind, dann konsequent pessimistisch eingeschätzt. Der ermittelte Wert des Risikos bzw. die Risikoverteilung sollen damit im Vergleich zum realistischere zu erwartendem Wert oder der realistischere zu erwartender Verteilung im Bereich deutlich größerer Risiken zu liegen kommen. Da Konservativitäten vielfach implizit in die Risikoanalyse einfließen, lässt sich in der Regel nicht feststellen, wie hoch der Sicherheitszuschlag ist. Bei komplexen Systemen ist zudem nicht immer klar, in welche Richtung eine «pessimistische Einschätzung» von Modellannahmen, Parametern oder Szenarien zu erfolgen hat.

Ergänzend zu Konservativitäten besteht die Möglichkeiten, explizit einen Sicherheitsaufschlag oder eine Sicherheitsmarge (Schwarz 2014), also einen definierten Abstand zwischen einem ermittelten Wert und dem entsprechenden Grenzwert, einzufordern und einzubauen. Möglicherweise zielen auch Forderungen, Grenzwerte im Bereich der Endlagerung zu reduzieren, implizit auf eine stärkere Vorsorge gegen Ungewissheiten ab.

In Regelungen auf Gesetzes-, Verordnungs- oder Leitlinienstufe zur Sicherheit von Endlagern werden Ungewissheiten international thematisiert. Verbreitet sind allgemeine Anforderungen an das Vorgehen im Safety Case. Spezifischere Anforderungen können in behördlichen Dokumenten enthalten sein, die unterhalb der Leitlinienebene Wirkung entfalten, oder sich als (international abgestützte) best practices etablieren. Vorgaben unterhalb

der Leitlinienebene sind für die interessierte Öffentlichkeit jedoch meistens nicht ohne weiteres verfügbar, und es fehlt ihnen die demokratische Legitimation.

Beispiele für allgemeine regulatorische Anforderungen, die sich auf das Vorgehen im Safety Case beziehen, sind: «The analyses shall demonstrate the conformity with the safety requirements with high certainty. Any uncertainty in the results shall be assessed and considered when assessing the meeting of the safety requirements» (STUK 2018a, S. 4). «Für den Sicherheitsnachweis sind Daten, Prozesse und Modellkonzepte gemäss Stand von Wissenschaft und Technik zu verwenden und deren Unsicherheiten aufzuzeigen» (ENSI 2020, S. 13). Die Sicherheitsanforderungen des BMU sahen als Teil der Langzeitsicherheitsanalyse eine Unsicherheitsanalyse vor (BMU 2010, S. 6) und forderten «die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten» (BMU 2010, S. 13).

Bei allgemein gehaltenen Regelungen bleibt offen, auf welches Spektrum von Ungewissheiten sie sich beziehen. Spezifischere Hinweise darauf, welche Arten von Ungewissheiten betrachtet werden sollen, sind zum Beispiel:

- Mittels Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen soll ein Lösungsraum aufgezeigt werden. Dabei sind auch Modellungsgewissheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung numerischer Kriterien muss unter Berücksichtigung der Ungewissheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein (BMU 2010, S. 16).
- Datenungewissheiten, Szenariungewissheiten (im vorliegenden Bericht Systementwicklungsungewissheiten) und Modellungsgewissheiten müssen analysiert werden, wobei bei den Modellen sowohl Ungewissheiten zu betrachten sind, die auf die verwendeten mathematischen Verfahren zurückgehen als auch solche, die mit der Konzeption des Modells im Zusammenhang stehen (CNSC/CCSN 2006, S. 34).
- Der Safety Case ist eine quantitative Analyse, die auf experimentellen Untersuchungen basiert. Nur dort, wo quantitative Analysen nicht möglich oder mit erheblichen Ungewissheiten verbunden sind, sollten ergänzende Erwägungen zum Einsatz kommen (STUK 2018b, S. 14).
- Bei deterministischen Sicherheitsanalysen ist das Ausmaß der Ungewissheiten mittels Sensitivitäts- oder Importanzanalyse ausweisen, bei probabilistischen Analysen als Verteilung der Ergebnisse (CNSC/CCSN 2006, S. 34).

Beim Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case sind Wechselwirkungen zwischen den Eigenschaften des Standorts für ein Endlager, der Auslegung des Endlagers und dem Safety Case zu beachten (vgl. «Entsorgungskonzept»). In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung spielen Anforderungen an die Robustheit des Endlagers eine wesentliche Rolle (EndlSiAnfV 2020). Beim Review des schweizerischen Entsorgungsnachweises für hochradioaktive Abfälle stellte ein internationales Expertenteam fest, dass aufgrund der sehr günstigen Eigenschaften des Wirtsgesteins Opalinustons «eine grosse Bandbreite von Ungewissheiten im Verhalten der technischen Barrieren und der Abfallmatrizen toleriert werden» könne, ohne damit die Sicherheit eines Tiefenlagers in Frage zu stellen (NEA 2004, S. 10). Die kanadische Aufsichtsbehörde formuliert neben Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case auch Anforderungen an Sicherheitsaufschläge bei der Auslegung des Endlagers: «In particular, a radioactive waste management facility should



more than meet the regulatory limits, remaining below those limits by a margin that provides assurance of safety for the long term. This expectation is necessitated by the uncertainty of long term predictions, the uncertainty of future human actions» (CNSC/CCSN 2006, S.8).

Ein weiterer regulatorischer Ansatz zum Umgang mit Ungewissheiten besteht darin, festzulegen, wie gering die Wahrscheinlichkeit eines Parameterwerts, eines Szenariums etc. sein muss, damit es im Safety Case nicht mehr berücksichtigt werden muss (NEA 2009, S. 10). Auf diese Art und Weise werden unwahrscheinliche Szenarien, die oft mit größeren Ungewissheiten verbunden sind, aus der Betrachtung im Safety Case ausgeschlossen. Die EndISiAnfV sieht vor, zwischen zu erwartenden, abweichenden und hypothetischen Entwicklungen eines Endlagersystems zu unterscheiden. Die hypothetischen Entwicklungen müssen nur zur Optimierung des Endlagersystems beigezogen werden (§12 EndISiAnfV 2020).

2007 wies eine internationale Arbeitsgruppe darauf hin, dass von Seiten der Aufsicht eine Position dazu erforderlich sei, welche Ungewissheiten bei wesentlichen Entscheidungsschritten akzeptabel sind und welche nicht (Vigfusson et al. 2007). Eine spezifische derartige Positionierung ist nach unserem Wissen bisher noch in keinem Land, das eine Endlagerung plant, erfolgt.

## Rolle des Vorsorgeprinzips

Das Vorsorgeprinzip gewann in den 1970er Jahren an Bedeutung und wurde zunächst im Kontext von Risiken für die Umwelt diskutiert. Inzwischen kommt es auch in anderen Bereichen zur Anwendung, wo epistemische Ungewissheiten zu Risiken bestehen, zum Beispiel im Gesundheitswesen. Gemeinsame Schlüsselemente verschiedener Fassungen und Interpretationen des Vorsorgeprinzips sind (in Anlehnung an IDA Vorsorgeprinzip 2003, S. 4f.):

- Anwendung in Situationen mit mangelnder wissenschaftlicher Gewissheit zu Ursachen-Wirkungs-Zusammenhängen und gleichzeitig starken Hinweisen auf ernsthafte Gefahren für Menschen, Tiere und Umwelt
- Verpflichtung, vorsorgliche Maßnahmen zu ergreifen, um Menschen, Tiere und Umwelt zu schützen
- Bestreben, die wissenschaftliche Ungewissheit durch Forschung zu vermindern oder aufzuheben

Die Anwendung des Vorsorgeprinzips soll nicht dazu führen, dass Entscheidungen systematisch blockiert oder willkürliche Entscheidungen gefällt werden (Munthe 2011, S. 36). Zudem muss moralischen Dilemmata Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ein solches Dilemma entsteht beispielsweise, wenn die vorsorgliche Vermeidung bestimmter Risiken dazu führt, dass größere Risiken oder Schäden entstehen (Munthe 2011, S. 52).

Auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle ist das Vorsorgeprinzip nicht direkt anwendbar. Es ist bekannt, dass von den Abfällen «ernsthafte Gefahren für Menschen, Tiere und Umwelt» ausgehen. Daher müssen Maßnahmen nicht vorsorglich, sondern auf jeden Fall ergriffen werden. In Bezug auf die «mangelnde wissenschaftliche Gewissheit zu Ursachen-

Wirkungs-Zusammenhängen», die bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle in sicherheitsrelevanten Kontexten auftritt und auftreten kann, mahnt das Vorsorgeprinzip aber sinngemäß zu

- einem Vorgehen, das Menschen, Tiere und Umwelt auch gegen größere als die derzeit angenommenen Risiken und bisher noch unbekannt Risiken schützt
- Untersuchungen und Forschung zur Verminderung verbleibender Ungewissheiten

## Monitoring, Rückholbarkeit und Reversibilität

Das Konzept der Endlagerung ist auf passive Sicherheit ausgerichtet. Hochradioaktive Abfälle sollen langfristig von Menschen und Umwelt abgeschirmt werden, während ihre Radioaktivität abklingt, ohne dass dazu nach dem Verschluss des Endlagers menschliche Aktivitäten erforderlich wären. Auf diese Art und Weise sollen künftige Generationen von der Verpflichtung entlastet werden, Ressourcen für die sichere Entsorgung einsetzen zu müssen. Außerdem soll gewährleistet werden, dass die sichere Entsorgung auch in Krisenzeiten, wie beispielsweise während eines Krieges, weiter besteht.

In Teilen der interessierten Öffentlichkeit bestehen Zweifel daran, ob dieses Konzept ausreichende Sicherheit gewährleisten wird. Ein Grund für Zweifel sind Ungewissheiten zur künftigen Entwicklung des Endlagersystems, ein anderer Grund ist mangelndes Vertrauen in Vorhabenträger und Aufsichtsbehörden. Vereinzelt setzen sich daher mehr und mehr Tiefenlagerkonzepte durch, die das langfristige Ziel der Endlagerung mit einer vorgelagerten Phase verbinden, in der das Tiefenlager überwacht wird und Rückholbarkeit gewährleistet ist. Monitoring und Rückholbarkeit sind im Wesentlichen als Vorsorge gegen Ungewissheiten gedacht. Für den Fall, dass sich das Endlagersystem nicht so wie erwartet entwickelt, soll die Möglichkeit offengehalten werden, Korrekturen vorzunehmen.

Ähnliche Überlegungen leiten auch das Bestreben nach flexiblen und lernenden Verfahren im Verlauf des Endlagerprojekts. Hier soll unter anderem Handlungsspielraum beim Umgang mit Ungewissheiten gewonnen werden, die aus (NEA 2009, S. 84)

- unerwarteten Eigenschaften des Standorts für ein Endlager,
- unerwarteten technischen Schwierigkeiten auf dem Entsorgungspfad,
- neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen

resultieren.

Bei Regelungen, die Monitoring und Rückholbarkeit vorsehen, ist allerdings zu bedenken, dass sie zwar der Vorsorge gegen Ungewissheiten dienen, aber auch zusätzliche Risiken begründen (Kreusch et al. 2019, S. 55f). Solche Risiken betreffen beispielsweise den Strahlenschutz für Personen, die mit dem Monitoring befasst sind, oder die Gewährleistung der Kernmaterialüberwachung bei erleichterter Rückholung. Der Spielraum zur flexiblen Gestaltung von Verfahren wird dadurch eingeschränkt, dass

- Änderungen am Entsorgungspfad erhebliche Ressourcen beanspruchen können, insbesondere, wenn diese Änderungen erst spät erfolgen

Beispiel: In der letzten Etappe des Standortauswahlverfahrens wird deutlich, dass eine wichtige Anforderung an das Wirtsgestein zuvor nicht ausreichend berücksichtigt worden ist. Das bedeutet, dass das Standortauswahlverfahren noch einmal neu gestartet werden muss.

- Neuausrichtungen auf dem Entsorgungspfad den bisherigen Weg in Frage stellen und damit einen Neustart der Entsorgung erzwingen können  
Beispiel: Aufgrund neuer Erkenntnisse, die bei der Erkundung des Standorts für ein Endlager gewonnen wurden, soll die Auslegung des Lagers grundlegend verändert werden. Dies wirft die Frage auf, ob das Standortauswahlverfahren auch für das neue Lagerkonzept das Richtige war.
- ein Entsorgungspfad, dessen Ausrichtung sich verändert, weniger Orientierung und Planungssicherheit bietet als ein Entsorgungspfad mit stabiler Ausrichtung und damit auch das Vertrauen in die an der Entsorgung «Beteiligten» untergräbt  
Beispiel: Die Aufsichtsbehörde stellt immer neue Anforderungen an den Vorhabenträger, die zu erheblichen Verzögerungen bei der Standortauswahl führen und dazu, dass Terminpläne in der interessierten Öffentlichkeit generell als nicht mehr realistisch und verbindlich wahrgenommen werden.

BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2010: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.

Brunnengräber, A.; Hocke, P., Kalmbach, K.; König, C.; Kuppler, S.; Röhlig, K.-J.; Smeddinck, U.; Walther, C. 2015: Grenzwerte beim Umgang mit radioaktiven Reststoffen. Ein Thesenpapier. doi: 10.5445/IR/1000101246. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000101246>. Abgerufen am 16.1.2021.

Cox, L.A. 2009: Risk analysis of complex and uncertain systems. International series in operations research and management science. Springer. New York.

CNSC/CCSN – Canadian Nuclear Safety Commission / Commission Canadienne de sûreté nucléaire 2019: Safety Case for long-term radioactive waste management. REGDOC-2.11.1, Waste Management, Volume III, Version 2. Draft Mai 2019. <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/acts-and-regulations/consultation/comment/regdoc2-11-1-vol3-ver2.cfm#sec6-5>. Ottawa. Abgerufen am 7.2.2020.

EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

ENSI 2010: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2. Brugg.

IDA Vorsorgeprinzip – Interdepartementale Arbeitsgruppe «Vorsorgeprinzip» 2003: Das Vorsorgeprinzip aus schweizerischer und internationaler Sicht. Bern.

- Kreusch, J.; Neumann, W.; Eckhardt A. 2019: Entsorgungspfade für hoch radioaktive Abfälle. Analyse der Chance, Risiken und Ungewissheiten. Springer Fachmedien. Wiesbaden.
- Munthe, Ch. 2011: The price of precaution and the ethics of risk. Springer. Dordrecht, Heidelberg, London, New York.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2009: International experiences in safety cases for geological repositories (INTESC). Outcomes of the INTESC project. NEA No. 6251. Paris.
- NEA 2004: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. NEA No. 5569. Paris.
- Posiva 2019: Plan for uncertainty assessment in the safety case for the operating license application. Nummi, O. POSIVA 2018-02. Eurajoki.
- Saltelli A.; Funtowicz S. 2014: When all models are wrong. Issues in Science and Technology 30/2. <https://issues.org/andrea/>. Abgerufen am 28.2.2020.
- Schwarz, G. 2014: Auslegungsanforderungen der Behörde heute und morgen. Sicherheitsmargen in Kernkraftwerken: identifizieren, quantifizieren, erweitern. Nuklearforum Schweiz. Vertiefungskurs. Olten.
- Seiler, H. 2000: Risikobasiertes Recht. Wieviel Sicherheit wollen wir? Abschlussbericht des Projekts «Risk Based Regulation – ein taugliches Konzept für das Sicherheitsrecht?» Stämpfli Verlag AG. Bern.
- STUK – Säteilyturvakeskus 2018b: Guide YVL D.5, Disposal of nuclear waste (13/2/2018). Explanatory memorandum. Helsinki.
- VBG – Verwaltungs-Berufsgenossenschaft 2020: Risiko beurteilen. [http://www.vbg.de/DE/3\\_Praevention\\_und\\_Arbeitshilfen/2\\_Themen/11\\_Gefaehrdungsbeurteilung/3\\_So\\_gehts\\_Prozessueberblick/5\\_Durchfuehrung/Schritt\\_3\\_Risiko\\_beurteilen/Schritt\\_3\\_Risiko\\_beurteilen\\_node.html](http://www.vbg.de/DE/3_Praevention_und_Arbeitshilfen/2_Themen/11_Gefaehrdungsbeurteilung/3_So_gehts_Prozessueberblick/5_Durchfuehrung/Schritt_3_Risiko_beurteilen/Schritt_3_Risiko_beurteilen_node.html). Abgerufen am 7.2.2020.
- Vigfusson, J. et al. 2007: European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management. Vigfusson, J; Maudoux, J.; Rimbault, Ph.; Röhlig, K.J.; Smith, R.E.



# 13. Psychologische Einflüsse

Psychologische Einflüsse spielen bei der Erstellung und Prüfung des Safety Case eine Rolle und im Zusammenhang mit Human Factor-Ungewissheiten. Im vorliegenden Arbeitspapier wird daher auf die Wahrnehmung von Ungewissheiten und Entscheidungen unter Ungewissheit eingegangen.

*Wahrnehmung von Ungewissheit bezeichnet die Art und Weise, wie Personen eine bestimmte Ungewissheit charakterisieren und beurteilen. Dabei spielen vielfältige bewusste und unbewusste Einflüsse eine Rolle, zum Beispiel Werthaltungen, individuelle Erfahrungen und Persönlichkeitsmerkmale. Bei Entscheidungen unter Ungewissheit greifen Menschen angesichts der unvollständigen Informationen oft auf Heuristiken zurück. Solche Einflüsse wirken auch auf Personen, die beruflich mit Ungewissheiten umgehen.*

*Angesichts der vielfältigen unbewussten Einflüsse auf Entscheidungen unter Ungewissheit stellt sich die Frage, ob und wenn ja, wann die Bezugnahme auf intuitive Expertenentscheidungen im Safety Case zulässig und wann die Forderung nach einer bewussten, deliberativen und transparenten Auseinandersetzung mit Ungewissheiten angebracht ist. Da in komplexen Situationen die Tendenz zunimmt, sich zu stark auf einzelne Fragestellungen zu fokussieren, muss die ganzheitliche Analyse von Ungewissheiten im Safety Case besonders beachtet werden.*

«Wahrnehmung von Ungewissheit» bezeichnet die Art und Weise, wie Personen eine bestimmte Ungewissheit charakterisieren und beurteilen. Bei der Wahrnehmung von Ungewissheit spielen sowohl unbewusste als auch bewusste Einflüsse eine Rolle. Diese Einflüsse können vielfältig sein und beispielsweise mit Werthaltungen, individuellen Erfahrungen oder Persönlichkeitsmerkmalen in Zusammenhang stehen. Auch Personen, die beruflich mit Ungewissheiten umgehen, sind in ihren Einschätzungen und Beurteilungen durch die individuelle Wahrnehmung von Ungewissheit beeinflusst. Auf ihre Wahrnehmung von Ungewissheit üben jedoch zusätzlich die professionellen Anforderungen und Instrumente zum Umgang mit Ungewissheiten Einfluss aus.

## Ungewissheit und Lebenswirklichkeit

Ungewissheiten gehören zur Lebenswirklichkeit aller Menschen. Ungewiss ist, wie sich Politik und Wirtschaft entwickeln werden, welche Veränderungen sich in den kommenden Jahren am Arbeitsplatz ergeben, wie gut sich individuell gesteckte Ziele erreichen lassen, wie sich die Gesundheit verändert und ob nahestehende Menschen künftig Entscheidungen treffen, die sich positiv oder negativ auf das eigene Leben auswirken.

Ungewissheiten können neue Handlungs- und Entfaltungsspielräume eröffnen und sich damit als Chance erweisen – sowohl für einzelne Personen als auch für Gemeinschaften.

Dennoch scheint die negative Wahrnehmung von Ungewissheiten die positive zu überwiegen. Das gilt zumindest, wenn sich die Ungewissheiten auf mangelnde Information zu Risiken beziehen. Ungewissheit und mangelnde Kontrolle über eine Situation rufen Angst hervor. Sie begünstigen eine pessimistische Einschätzung der Lage; die Bereitschaft, Risiken einzugehen, sinkt (Maldonato & Dell'Orco 2011, S. 575). Dabei gibt es jedoch individuelle Unterschiede. Das Ausmaß, in dem Ungewissheiten als besorgniserregend wahrgenommen werden, ist ein stabiles Persönlichkeitsmerkmal (Tanovic et al. 2018).

## Risikowahrnehmung und Wahrnehmung von Ungewissheiten

Die Wahrnehmung von Risiken wird seit den 1970er Jahren eingehender untersucht. Eine der Motivationen für Forschung zur Risikowahrnehmung ist, dass sich die Risikoeinschätzungen von Spezialisten und von Nicht-Spezialisten oft deutlich unterscheiden. In den 1990er Jahren wurde noch vielfach zwischen dem wahren «objektiven» Risiko, wie es Spezialisten einschätzen, und einem verzerrten «subjektiven» Risiko, das Nicht-Spezialisten wahrnehmen, unterschieden. Inzwischen hat sich jedoch weitgehend die Erkenntnis durchgesetzt, dass Spezialisten ebenso wie Nicht-Spezialisten psychologischen Einflüssen unterliegen, die sich auf die Wahrnehmung und Einschätzung eines Risikos auswirken. Dazu gehören Werte, Affekte, Emotionen, kognitive Biases und Heuristiken. Entscheidungen zu Risiken werden durch viele Merkmale eines Risikos beeinflusst, die das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenausmaß nicht erfasst (vgl. zum Beispiel Marti 2016; Finkel 2008; Kunreuther 2002).

In der Forschung zur Risikowahrnehmung wird nicht immer klar zwischen Risiken und Ungewissheiten unterschieden. Daher enthalten manche Studien zur Wahrnehmung und Einschätzung von Risiken auch Informationen zur Wahrnehmung und Einschätzung von Ungewissheiten. Spezifische Forschungsarbeiten zur Wahrnehmung von Ungewissheiten wurden in den letzten Jahren vermehrt durchgeführt, unter anderem im Kontext des Klimawandels und von Entscheidungen, die die Gesundheit betreffen.

Die psychologische Forschung zur Wahrnehmung von Ungewissheiten deutet darauf hin, dass Ungewissheiten, die auf Expertendissens zurückgehen, relevanter eingeschätzt werden als solche, die auf mangelnder Präzision von Ergebnissen beruhen (Broomell & Kane 2017, S. 288). Auch Ungewissheiten, die auf fehlenden Daten beruhen, werden eher akzeptiert als wenn Expertendissens besteht oder die Daten widersprüchlich sind (Markon & Lemyre zitiert in Marti 2016, S. 31f.).

## Entscheidungen unter Ungewissheit

Entscheidungen werden getroffen, indem eine Option unter mehreren oder vielen Optionen ausgewählt und damit eine wichtige Frage, beantwortet wird. Entscheidungstheorien sind auf das Entscheidungsverhalten von einzelnen Menschen oder Gruppen von Menschen ausgerichtet. Sie beschreiben, wie Entscheidungen getroffen werden sollen (präskriptiv) oder wie sie in der Realität getroffen werden (deskriptiv) (Laux et al. 2014, S. 3f.).

Frühe Entscheidungstheorien gingen von Individuen aus, die über ein breites Wissen der relevanten Entscheidungsgrundlagen verfügen und rational handeln, um ein bestimmtes

Ziel zu erreichen, wie zum Beispiel die eigene Nutzenerwartung zu maximieren. Dieser Ansatz erwies sich allerdings als nur bedingt geeignet, um menschliche Entscheidungen zu verstehen. In einer realen Entscheidungssituation sind oft nicht alle relevanten Informationen verfügbar, oder die Entscheidenden sind damit überfordert, die vorhandenen Informationen zu verarbeiten. Menschen müssen daher nach Wegen suchen, um auch dann zu zufriedenstellenden Entscheidungen zu kommen, wenn die verfügbaren Informationen unvollständig und die Verarbeitungsmöglichkeiten limitiert sind (Simon 1955).

Forschungsarbeiten zu realen Entscheidungen von Menschen führten zur Entdeckung einer Vielzahl von Heuristiken. Heuristiken sind einfache Denkstrategien, die es Menschen erlauben, mit unvollständigen Informationen – also in Situationen der Ungewissheit – in kurzer Zeit zu zufriedenstellenden Aussagen, Entscheidungen und Lösungen zu kommen. Evolutionstheoretisch können Heuristiken als Bindeglied zwischen Instinkt und Kognition verstanden werden. Die Fähigkeit, intuitiv Entscheidungen zu fällen und schnell einschätzen zu können, welche Informationen relevant sind und welche nicht, zeichnet insbesondere auch «Experten» aus (Gigerenzer 2007). Im Safety Case stellt sich damit die Frage, ob und wenn ja, wann die Bezugnahme auf intuitive Expertenentscheidungen zulässig und wann die Forderung nach einer bewussten, deliberativen und transparenten Auseinandersetzung mit Ungewissheiten angebracht ist.

Entscheidungsträger zeigen in manchen Situationen Aversionen gegenüber Ungewissheiten, in anderen nicht. Ungewissheitsaversionen treten auf, wenn eine Wahl zwischen kalkulierbaren Risiken bzw. Chancen auf der einen Seite und ungewissen Risiken bzw. Chancen auf der anderen Seite besteht (Fox & Tversky 1995; Ellsberg 1961). In Situationen mit garantierten Gewinnen werden weniger Risiken eingegangen als in Situationen, in denen Verluste unausweichlich sind (Kahneman & Tversky 1979). Sind Optionen wenig wahrscheinlich, nimmt die Bereitschaft, Risiken einzugehen, zu (Kocher et al. 2015). Generell legt die Verhaltensökonomie nahe, dass Personen weniger gegenüber Ungewissheiten als gegenüber Verlusten avers sind (Tversky zitiert in Bernstein 1996, S. 274).

Je nachdem ob die zur Auswahl stehenden Optionen einzeln oder gemeinsam und vergleichend betrachtet werden, fallen Entscheidungen unterschiedlich aus, weil dann beim Entscheiden jeweils andere Eigenschaften der Optionen in den Vordergrund rücken. Eigenschaften, die schwer zu evaluieren sind – beispielsweise aufgrund von Ungewissheiten –, werden beim Vergleich stärker herangezogen als dann, wenn jeweils nur eine Option betrachtet wird (Hsee et al. 1997, S. 578; Hsee 1996). Generell tendieren Menschen in komplexen Situationen dazu, einzelne Teile eines Problems zu analysieren und nicht deren Gemeinsamkeiten und Wechselwirkungen (Bernstein 1996, S. 271). Im Safety Case muss daher der ganzheitlichen Analyse von Ungewissheiten besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Aus normativer oder präskriptiver Sicht führen Heuristiken, Aversionen und andere psychologische Einflüsse, obwohl sie in der Praxis oft hilfreich sind, nicht zwangsläufig zu guten Entscheidungen. Menschliche Entscheidungen sind aber auch weder chaotisch noch nicht-nachvollziehbar, sondern folgen Gesetzmäßigkeiten, die sich in einer Vielzahl von experimentellen Studien bestätigt haben (Bernstein 1996, S. 282).

Bei der Durchführung und Prüfung von Safety Cases ist es nützlich, solche Gesetzmäßigkeiten zu kennen und einzubeziehen, um unerwünschte Einflüsse, wie beispielsweise das



Auftreten unbekannter Bekannter, zu vermindern und sicherheitsgerichtet mit Human Factor-Ungewissheiten umzugehen.

Bernstein, P.L. 1996: *Against the gods. The remarkable story of risk.* Jon Wiley & Sons, Inc. New York.

Broomell, S.P.; Kane, P.B. 2017: Public perception and communication of scientific uncertainty. *Journal of Experimental Psychology: General* 2017, Vol. 146, No. 2, 286–304.

Ellsberg, D. 1961: Risk, ambiguity, and the Savage axioms. *The Quarterly Journal of Economics*, 75, 643–669.

Finkel, A.M. 2008: Perceiving others' perceptions of risk. Still a task for Sisyphus. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1125: 121–137 (2008). doi: 10.1196/annals.1399.013.

Fox, C. R., & Tversky, A. 1995: Ambiguity aversion and comparative ignorance. *The Quarterly Journal of Economics*, 110, 585–603.

Gigerenzer, G. 2007: *Gut feelings. The intelligence of the unconscious.* Viking. Published by the Penguin Group. New York.

Hsee, Ch.K.; Blount, S.; Loewenstein, G.; Bazerman, M. 1999: Preference reversals between joint and separate evaluations of options: A review and theoretical analysis. *Psychological Review* 125:576-590.

Hsee, Ch.K.; 1996: The evaluability hypothesis: An explanation for preference reversal between joint and separate evaluations of alternatives. *Organizational behavior and human decision processes*. Vol. 67, No. 3, September, pp. 247–257.

Kahneman, D., Tversky, A. 1979: Prospect theory: an analysis of decision under risk. *Econometrica* 47, 263–291.

Kocher, M.G.; Lahno, A.M.; Trautmann, S.T. 2015: Ambiguity aversion is the exception. Munich Discussion Paper No. 2015-2. Volkswirtschaftliche Fakultät Ludwig-Maximilians-Universität München

Kunreuther, H. 2002: Risk analysis and risk management in an uncertain world. *Risk Analysis*, Vol. 22, No. 4. S. 655-664.

Laux, H.; Gillenkirch, R.; Schenk-Matthes, H. 2014: *Entscheidungstheorie. 9., vollständig überarbeitete Auflage.* Springer Gabler. Heidelberg.

Maldonato, M.; Dell'Orco, S. 2011: How to make decisions in an uncertain world: Heuristics, biases, and risk perception. *World Futures*, 67:8, 569-577, doi: 10.1080/02604027.2011.615591.

Marti, M. 2016: Risikoansichten. ENTRIA-Arbeitsbericht-05. Zollikerberg.

Simon, H.S. 1955: A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 69, No. 1 (Feb., 1955), pp. 99-118.

Tanovic, E.; Gee, D.G.; Joormann, J. 2018: Intolerance of uncertainty: Neural and psychophysiological correlates of the perception of uncertainty as threatening. *Clinical Psychology Review* 60 (2018) 87–99.

# 14. Identifizieren von Ungewissheiten

Der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case erfolgt in vier Schritten. Im vorliegenden Arbeitspapier wird der erste Schritt behandelt.

*Ungewissheiten müssen im Safety Case möglichst vollständig identifiziert werden. Als Grundlage für die Identifikation von Ungewissheiten eignen sich insbesondere die Beschreibung des Endlagersystems und ein umfassender Katalog von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen (features, events and processes, FEP). Audits und interdisziplinäre Reviews durch Spezialisten innerhalb und außerhalb der Endlagercommunity können dazu beitragen, dass Ungewissheiten nicht übersehen oder übergangen werden.*

*Für den Safety Case werden zwei grundsätzliche Ansätze zur Erfassung der Ungewissheiten diskutiert, ein zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten und die Erfassung der Ungewissheiten im jeweiligen Kontext, in dem sie für den Safety Case relevant sind. Vorteile beider Ansätze lassen sich im Safety Case miteinander verbinden.*

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case eignet sich ein schrittweises Vorgehen (in Anlehnung an GRS 2012a):

- Identifizieren der Ungewissheiten
- Beschreiben der Ungewissheiten
- Beurteilen der Ungewissheiten
- Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten

Diese Vorgehensweise wird auf dem Entsorgungspfad bei jeder neuen Fassung des Safety Case durchlaufen und ist daher als iterativer Prozess zu verstehen (GRS 2012a, S. 17). Auch innerhalb eines Safety Case können diese Schritte iterativ durchlaufen werden.

Gegenstand des vorliegenden Arbeitspapiers ist das «Identifizieren der Ungewissheiten». Dieser Schritt zielt darauf ab, alle wesentlichen Ungewissheiten innerhalb der Grenzen des Endlagersystems aufzuspüren und zu dokumentieren.

Vordergründig scheint das Ermitteln und Dokumentieren von Ungewissheiten der einfachste Schritt beim Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case zu sein. In der Realität kann sich aber bereits dieser Schritt als anspruchsvoll erweisen. Um dies zu erläutern wird auf die Unterscheidung von «Bekanntem» und «Unbekanntem» Bezug genommen (vgl. «Bekanntes und Unbekanntes»).

## Hinterfragen bekannter Bekannter

Bekanntes Bekanntes sind abgesicherte Tatsachen und absehbare Entwicklungen. Sie liegen vor, wenn Parameter und Prozesse gründlich untersucht wurden, die Ergebnisse dieser Untersuchungen kritischen Prüfungen standgehalten haben und wenn Modelle validiert und verifiziert sind. Im Safety Case wird Sicherheit anhand bekannter Bekannter belegt.

Dass bekannte Bekannte gelegentlich korrigiert oder revidiert werden müssen, ist aus wissenschaftlicher Perspektive zu erwarten. Da neue Erkenntnisse bekannte Bekannte in Frage stellen oder zu einer anderen Einordnung der bekannten Bekannten führen können, ist es erforderlich, die bekannten Bekannten im Safety Case immer wieder daraufhin zu überprüfen, ob Anpassungen notwendig sind (Eckhardt & Rippe 2016, S. 58f.).

Die Identifikation von Ungewissheiten kann also auch dort notwendig sein, wo zunächst keine Ungewissheiten vermutet werden. Sie betrifft sowohl das Wissen über das Endlager-system (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität») als auch die im Safety Case verwendeten Methoden und Instrumente (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität»).

Auf dem Entsorgungspfad, der zu einem verschlossenen Endlager führt, werden mehrere Safety Cases erstellt, deren Umfang und Bearbeitungstiefe die Position auf dem Entsorgungspfad und die Erfordernisse des jeweils aktuellen Verfahrens – wie Standortauswahl oder Genehmigung – widerspiegelt. Dieses iterative Vorgehen bietet die Möglichkeit, bei jedem neuen Safety Case die bekannten Bekannten aus dem vorangegangenen Safety Case kritisch zu prüfen, vor allem anhand neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und neuer internationaler Erfahrungen zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle.

Das Infragestellen bekannter Bekannter bedeutet in der Regel Mehraufwand für weitere Abklärungen und Anpassungen. Es kann Anlass zur Kritik am gewählten Entsorgungspfad, am bisherigen Vorgehen und am Safety Case bieten und zu Verzögerungen bei der Entsorgung führen. Daher ist damit zu rechnen, dass das Hinterfragen auf Widerstände trifft – vor allem auf Seiten des Vorhabenträgers oder der Vorhabenträgerin, ggf. aber auch auf Seiten der Aufsichtsbehörden oder auf Seiten von Vertretern von Politik und Wirtschaft.

Die Endlager-Kommission empfahl, die Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland als lernendes Verfahren zu konzipieren und Möglichkeiten vorzusehen, um im Verlauf der Standortsuche Korrekturen vorzunehmen (Endlager-Kommission 2016, S. 23). Der Auswahlprozess soll als selbsthinterfragendes System gestaltet werden (Endlager-Kommission 2016, S. 371). Falls der Ansatz des selbstlernenden Verfahrens zu einem generellen Kulturwandel auf dem Entsorgungspfad führt, mit dem Korrekturen vermehrt als Zeichen von Stärke und als Chancen verstanden werden, könnte davon auch der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case profitieren.

## Erfassen bekannter Unbekannter

Bekannte Unbekannte sind Informationen, von denen bekannt ist, dass sie (noch) fehlen oder unvollständig sind. Im Safety Case spielen bekannte Unbekannte eine wichtige Rolle, unter anderem deshalb, weil viele Informationen erst später auf dem Entsorgungspfad gewonnen oder vertieft werden können. Der Umgang mit bekannten Unbekannten hat sich daher im Safety Case bereits gut etabliert.

Bei der Identifikation bekannter Unbekannter, insbesondere von Systementwicklungsungewissheiten (vgl. «Etablierte Klassifikation im Safety Case»), spielen die Beschreibung des Endlagersystems und Kataloge von Eigenschaften, Ereignissen und Vorgängen (features, events and processes, FEP), die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen und sicherheitsrelevant sind, eine wichtige Rolle. Solche Kataloge werden als Grundlage

für Safety Cases entwickelt, und es bestehen Bestrebungen, die Kataloge zu vergleichbaren Endlagersystemen international zu konsolidieren. Auf der Grundlage von FEP-Katalogen lassen sich Unbekannte strukturiert identifizieren und damit in bekannte Unbekannte überführen.

In manchen FEP-Katalogen sind neben Kenntnissen auch Ungewissheiten ausgewiesen. So werden im FEP-Katalog der NEA (NEA 2019) Ungewissheiten zu Standorteigenschaften und künftigem Wissen über das Endlager angesprochen. Im FEP-Katalog zur vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) werden unter anderem Ungewissheiten zu Erdbebenhäufigkeit und -intensität erwähnt, zur Prognose kaltzeitlicher Entwicklungen und ihrer Auswirkungen auf die Schachtverschlüsse, zur Prognose der Salzgruskompanktion und zu möglichen Lösungszutritten in die Grubengebäude (GRS 2012b). Mit der Weiterentwicklung von FEP-Katalogen werden auch Grundlagen geschaffen, um Ungewissheiten systematisch und möglichst vollständig zu erfassen. Der internationale Austausch zwischen Institutionen, insbesondere auf Seiten der Vorhabenträger, die jeweils eigene FEP-Kataloge erstellt haben, bietet die Chance, umfassende und fachlich gut abgesicherte Kataloge zur Identifikation von Ungewissheiten zu nutzen.

Systematisch und detailliert werden die wesentlichen Ungewissheiten («main uncertainties») im FEP-Katalog zum Safety Case zur Endlagerung abgebrannter Brennelemente am Standort Olkiluoto in Finnland dokumentiert. Die Erfassung von Verknüpfungen («couplings») zwischen FEPs liefert auch Hinweise auf Verknüpfungen zwischen Ungewissheiten (Posiva 2012). Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die Darstellung von Ungewissheiten am Beispiel des Prozesses «Radioaktiver Zerfall».

***Uncertainties in the understanding of the FEP:***

There are no uncertainties in the understanding of radioactive decay and the in-growth of daughter products. Uncertainties derive in the input data used to calculate the inventory evolution as a function of time. Radioactive decay as a function of time can be calculated with great accuracy when the initial radionuclide content is known. This depends on the fuel characteristics and irradiation history, which are recorded and known with sufficient precision for long-term safety purposes. The total uncertainty in the calculated actinide inventories is estimated to be about 20 % and the total uncertainty in fission product inventories is about 12 % (Håkansson 1999, p. 18).

The half-lives of the relevant radionuclides are generally known with good accuracy. The international Decay Data Evaluation Project has the objective of reviewing and updating decay data (DDEP 2011). The most significant recent change concerns the half life of Se-79 which has been updated to  $3.27 \cdot 10^5$  years. For other radionuclides, the evaluations published by the Decay Data Evaluation Project will be used when available. Uncertainties concerning the inventory at deposition and the half-lives are discussed further in *Models and Data for the Repository System*.

Abbildung 14-1: Dokumentation von Ungewissheiten im zum Safety Case zur Endlagerung abgebrannter Brennelemente am Standort Olkiluoto in Finnland am Beispiel des Prozesses «Radioaktiver Zerfall» (Posiva 2012, S. 56). In diesem Fall handelt es sich um einen Prozess, der das Radionuklidinventar betrifft, und mit wenig Ungewissheit verbunden ist.

## Aufdecken unbekannter Bekannter

Unbekannte Bekannte sind bekannte Tatsachen und vorhersehbare Entwicklungen, die bei der Erstellung und Prüfung eines Safety Case nicht zur Kenntnis genommen werden. Dabei kann es durchaus möglich sein, dass diese Tatsachen und Entwicklungen im Kontext des Safety Case thematisiert, aber nicht aufgenommen oder weiterverfolgt wurden. Die bewusste oder unbewusste Entscheidung, sie nicht aufzunehmen oder weiterzuverfolgen, kann auf verschiedenen Ebenen (Röhlig 2021) getroffen werden:

- von der Person, die Tatsache oder Entwicklung im Kontext des Safety Case entdeckt (P1)
- von einer Person, die von P1 beraten wird (P2)
- von dem Team, dem P1 oder P2 angehört
- von einer Person, die P1 oder P2 vorgesetzt ist
- von der (internationalen) Gemeinschaft der Safety Case-Spezialisten
- von einem Gremium, in dem sowohl Vorhabenträgerin als auch Aufsichtsbehörde vertreten sind
- von Entscheidungsträgern, die nicht direkt in den Safety Case involviert sind

Im Safety Case können unbekannte Bekannte zu fehlerhaften Aussagen und Ergebnissen führen, weil wesentliche Ungewissheiten nicht identifiziert wurden. Daher muss den unbekanntem Bekannten bei der Erstellung und Beurteilung des Safety Case besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden (Eckhardt & Rippe 2016, S. 65f.).

Bekannte Unbekannte zählen zu den Human Factor-Ungewissheiten, die bei der Entwicklung und Überprüfung des Safety Case auftreten. Einflüsse, die das Auftreten bekannter Unbekannter begünstigen, sind:

- Druck, auf dem Entsorgungspfad schnell weiter voranzuschreiten
- Druck, wenig(er) Ressourcen für die Entsorgung einzusetzen
- Fehlende Interdisziplinarität bei der Durchführung und Überprüfung des Safety Case
- Durchführung und Überprüfung des Safety Case innerhalb weitgehend geschlossener Gemeinschaften von Fachspezialisten
- Mängel in der Sicherheitskultur von Vorhabenträgern und Aufsichtsbehörden
- Gesellschaftliche Haltung, die Schuldzuweisungen («blaming culture») Vorrang vor Selbstreflexion und dem Bestreben, Schwachstellen zu beheben («just culture») einräumt – etwa in Politik und Medien

Das Festlegen klarer Prozesse für die Erstellung von Safety Cases und entsprechende Audits (STUK 2015, S. 73) sowie Reviews durch Spezialisten innerhalb und außerhalb der Endlagercommunity können dazu beitragen, dass Ungewissheiten nicht übersehen oder zurückgestellt werden. Interdisziplinäres Arbeiten, die Pflege einer guten Sicherheitskultur und lernender Verfahren tragen ebenfalls zur Identifikation unbekannter Bekannter bei.

## Auffinden unbekannter Unbekannter

Unbekannte Unbekannte sind nicht bekannte Tatsachen und unvorhersehbare Entwicklungen (Eckhardt & Rippe 2016, S. 63). Diese inhärenten Ungewissheiten lassen sich im Safety Case nicht identifizieren.

Beim Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad werden sich jedoch voraussichtlich immer wieder unbekannte Unbekannte zu bekannten Unbekannten oder bekannten Bekannten entwickeln, zum Beispiel aufgrund neuer Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung oder aufgrund neuer Erkenntnisse aus angewandter Forschung zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Bei der Identifikation von Ungewissheiten ist es daher wesentlich, die bekannten Bekannten immer wieder zu prüfen und die Grundlagen zur Identifikation von bekannten Unbekannten auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft, Technik und Erfahrung zu halten, um zuvor unbekannte Unbekannte zu identifizieren.

In der folgenden Abbildung sind die bisher beschriebenen Ansätze zur Identifikation von Ungewissheiten zusammengefasst:

	Informationen sind verfügbar	Informationen sind nicht verfügbar
Informationen werden zur Kenntnis genommen	<b>Bekannte Bekannte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Periodisches Hinterfragen und Überprüfen der Kenntnisse des Endlagersystems, der verwendeten Methoden und Instrumente</li> </ul>	<b>Bekannte Unbekannte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Systematische Identifikation, insbesondere bei der Beschreibung des Endlagersystems und mittels FEP-Katalogen</li> </ul>
Informationen werden nicht zur Kenntnis genommen	<b>Unbekannte Bekannte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interdisziplinäres Arbeiten</li> <li>• Prozesse und Audits</li> <li>• Externe Reviews</li> <li>• Sicherheitskultur</li> <li>• Lernende Verfahren</li> </ul>	<b>Unbekannte Unbekannte</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verfolgen des Stands von Wissenschaft und Technik</li> <li>• Forschung zur Endlagerung und zum Safety Case</li> </ul>

Abbildung 14-2: Ansätze, um eine möglichst vollständige Identifikation von Ungewissheiten im Safety Case zu gewährleisten (eigene Darstellung). Die Abbildung lehnt sich an Abbildung 7-1 an und fasst die Ergebnisse der vorangehenden Abschnitte im Arbeitspapier «identifizieren von Ungewissheiten» zusammen.

## Praxis im Safety Case

2007 empfahl eine Expertengruppe, der Vertreter von Aufsichtsbehörden aus Belgien, Frankreich, Großbritannien und der Schweiz sowie ein Vertreter der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) angehörten, im Safety Case ein Verzeichnis («register») der wesentlichen («significant») Ungewissheiten anzulegen (Vigfusson et al. 2007, S. 10). Wie wesentliche von nicht wesentlichen Ungewissheiten unterschieden werden, blieb dabei offen. Allerdings stellen die Autoren des Berichts klar, dass Ungewissheiten nicht einfach als unwichtig («unimportant») verworfen werden dürfen. Dafür, Ungewissheiten nicht weiter zu behandeln, bedarf es guter Gründe, die im Verzeichnis der Ungewissheiten aufzuführen sind. Ein guter Grund kann beispielsweise darin bestehen, dass sich in einer Sensitivitätsanalyse gezeigt hat, dass die Relevanz der Ungewissheit für die Sicherheit gering ist (Vigfusson et al. 2007, S. 11).

2008 griff ein internationales Expertenteam, das den Safety Case für ein Endlager für abgebrannte Brennelemente im Schwedischen Forsmark prüfte, den Vorschlag der Expertengruppe auf und empfahl ebenfalls, ein zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten anzulegen. Dieses Verzeichnis sollte eine Beschreibung jeder Ungewissheit enthalten samt einer Begründung dafür, warum die Ungewissheit basierend auf dem Sicherheitskonzept behandelt wird, eine gründliche Beschreibung der Methoden, mit denen die Ungewissheit quantitativ und/oder qualitativ untersucht wird, die Grundlagen für eine Bewertung der Ungewissheit, die Ergebnisse der Bewertung und deren Beurteilung sowie Folgerungen bezüglich weiterer Arbeiten (Sagar et al. 2008, S. 27).

Sowohl die schwedischen Behörden als auch die finnische Vorhabenträgerin, die in ihrem Plan für einen Safety Case zum Endlager für abgebrannte Brennelemente am Standort Olkiluoto auf das Peer Review zum schwedischen Safety Case Bezug nimmt, sahen in diesem Vorgehen jedoch keine Vorteile. Sie beurteilen es als sinnvoller, wenn die Ungewissheiten im Safety Case dort beschrieben werden, wo das Thema, auf das sich die Ungewissheiten beziehen, behandelt wird. Begründet wird die Ablehnung damit, dass der Umgang mit Ungewissheiten die zentrale Existenzberechtigung («essence») des Safety Case sei. Ein Verzeichnis der Ungewissheiten würde daher zu erheblichen Doppelspurigkeiten führen. Stattdessen strebt die finnische Vorhabenträgerin eine systematische und umfassende Diskussion der Ungewissheiten an, die den gesamten Safety Case durchdringt (Posiva 2008, S. 62).

Beide Ansätze zur Identifikation und Dokumentation von Ungewissheiten weisen Vorteile auf und ergänzen sich daher gegenseitig:

Vorteile im Hinblick auf	Zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten	Behandlung der Ungewissheiten im jeweiligen thematischen Kontext
Vollständigkeit der Identifikation von Ungewissheiten	Gesamtübersicht kann hilfreich sein, um weiteren Handlungsbedarf bei der Identifikation von Ungewissheiten zu erkennen	Identifikation von Ungewissheiten setzt Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Kontext, in dem Ungewissheiten bestehen, voraus
Übersichtlichkeit	Vermittelt einen Gesamtüberblick über die Ungewissheiten Strukturiertes elektronisches Verzeichnis lässt sich nach unterschiedlichen Kriterien auswerten	Darstellung im jeweiligen Kontext ist erforderlich, um das entsprechende Themenfeld im Safety Case zu behandeln Ansatz ist etabliert und international erprobt
Konsistenz im Umgang mit Ungewissheiten	Vermittelt einen Gesamteindruck des Umgangs mit Ungewissheiten im Safety Case und erleichtert damit die Überprüfung der Konsistenz im Umgang mit Ungewissheiten	Handlungsbedarf beim Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case wird oft erst am konkreten Fallbeispiel in seinem jeweiligen Kontext deutlich
Auswertbarkeit bezüglich Sicherheitsrelevanz	Bietet gute Voraussetzung, um Verknüpfungen zwischen Ungewissheiten zu identifizieren und insbesondere auch ein mögliches Versagen von Barrieren aufgrund gemeinsamer Ursache aufzudecken	Zur Einordnung der Sicherheitsrelevanz sind Kenntnisse des jeweiligen Kontexts erforderlich
Vergleichbarkeit der Sicherheitsrelevanz	Vermittelt einen Überblick darüber, welche Ungewissheiten besonders sicherheitsrelevant sind	Vermittelt ein Bild davon, wie stark einzelne thematische Bereiche von Ungewissheiten geprägt sind

Abbildung 14-3: Vorteile verschiedener Ansätze zur Identifikation und Dokumentation von Ungewissheiten (eigene Darstellung). Die Vorteile, die ein zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten aufweist, ergänzen sich mit den Vorteilen, die mit der Behandlung der Ungewissheiten im jeweiligen thematischen Kontext verbunden sind.

Angesichts der aktuellen Möglichkeiten zur informationstechnischen Verarbeitung lassen sich ein zentrales Verzeichnis der Ungewissheiten und die Diskussion der Ungewissheiten im jeweiligen Kontext, in dem sie für den Safety Case relevant sind, vermutlich miteinander verbinden, ohne dass dadurch ein erheblicher Mehraufwand entsteht. Voraussetzung dafür ist eine strukturierte Darstellung der Ungewissheiten und ihrer Eigenschaften im gesamten Safety Case, ggf. auch eine Umstellung vom Safety Case als Berichtswerk auf einen elektronischen Safety Case. Damit könnten sowohl die Vorteile einer Übersicht über alle Ungewissheiten als auch der Betrachtung von Ungewissheiten im jeweiligen Kontext für den Safety Case genutzt werden.

Wesentliche Inhalte eines zentralen Verzeichnisses von Ungewissheiten wären (vgl. auch «Beschreiben von Ungewissheiten», «Beurteilen von Ungewissheiten» und «Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten»):

- Eine Beschreibung der Ungewissheit, einschließlich der Ergebnisse von Analysen der Ungewissheit



- Der Kontext im Safety Case, in dem die Ungewissheit besteht, verbunden mit einer Verknüpfung zur relevanten Komponente des Safety Case, zum Beispiel im FEP-Katalog, sowie zu relevanter Literatur
- Der Abschnitt, in dem die Ungewissheit im Bewertungszeitraum relevant ist
- Die Verknüpfungen mit anderen Ungewissheiten
- Die Beurteilung der Sicherheitsrelevanz der Ungewissheit
- Entscheidungen und Planung zum weiteren Umgang mit der Ungewissheit

Dabei sind jeweils auch die Grundlagen und Methoden anzugeben, die diesen Inhalten zugrunde liegen. Während der Weiterentwicklung des Verzeichnisses sollten alle Änderungen, die am Verzeichnis vorgenommen wurden, dokumentiert werden. Zudem sollte festgehalten werden, wer für Einträge im Verzeichnis verantwortlich ist und welche die Ansprechpartner zu bestimmten Ungewissheiten sind.

Ein informationstechnisch basiertes Verzeichnis kann nach unterschiedlichen Kriterien strukturiert werden, was sich für die Bearbeitung von Ungewissheiten im Safety Case voraussichtlich als nützlich erweisen wird. So wäre es beispielsweise möglich, alle Ungewissheiten einzusehen, die im Zusammenhang mit einer bestimmten Barriere oder Sicherheitsfunktion von Bedeutung sind.

Eckhardt, A., Rippe, K.P. 2016: Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Vdf-Verlag. Zürich.

Endlager-Kommission – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016: Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.

GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2012a: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 4. Juni 2011 mit Corrigendum Dezember 2011 und Änderung der Vorbemerkung Dezember 2012. Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltus, B., Peiffer, F., Fischer-Appelt, K. GRS. Braunschweig.

GRS 2012b: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Erstellt von BGR, DBEtec, GRS, IfG, KIT. GRS-283.

NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.

Posiva 2012: Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – features, events and processes 2012. POSIVA 2012-07. Eurajoki.

Posiva 2008: Safety Case plan 2008. POSIVA 2008-05. Eurajoki.

Röhlig, KJ. 2021: Kommentar mit Hinweis auf das Johari-Fenster (<https://de.wikipedia.org/wiki/Johari-Fenster>) im Rahmen des Reviews des vorliegenden Berichts.

Sagar B., Egan M., Röhlig, K.-J., Chapman, N., Wilmot, R. 2008: International expert review of Sr-Can: Safety assessment methodology – External review contribution in support of SSI's and SKI's review of SR-Can). SSI report 2008:05. SSI, Stockholm.

STUK – Säteilyturvakeskus 2015: Review of safety assessment in Posiva's construction license application for a repository at Olkiluoto. Ed. Sagar, B. STUK-TR 19. Helsinki.

Vigfusson, J., Maudoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.J., Smith, R.E. 2007: European pilot study on the regulatory review of the Safety Case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management.



# 15. Beschreiben von Ungewissheiten

Der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case erfolgt in vier Schritten. Im vorliegenden Arbeitspapier wird der zweite Schritt behandelt.

*Ungewissheiten lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise beschreiben. Die Spannweite reicht von Ungewissheiten, die quantifiziert werden können, über Ungewissheiten, die sich in einer natürlichen Sprache beschreiben lassen, bis zu Ungewissheiten, über die keine Informationen vorliegen.*

*Da sich viele Ungewissheiten im Lauf der Zeit verändern bzw. nur zu bestimmten Zeiten für ein Endlagersystem relevant sind, sollte jede Beschreibung von Ungewissheiten eine Angabe darüber enthalten, auf welchen Abschnitt des Bewertungszeitraums sie sich bezieht.*

*Die Art und Weise, wie Ungewissheiten beschrieben werden, ist wesentlich dafür, welche Ansätze sich zur Beurteilung der Ungewissheiten nutzen lassen.*

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case eignet sich ein schrittweises Vorgehen, das iterativ durchlaufen wird:

- Identifizieren der Ungewissheiten
- Beschreiben der Ungewissheiten
- Beurteilen der Ungewissheiten
- Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten

Im vorliegenden Arbeitspapier wird der Schritt «Beschreiben der Ungewissheiten» behandelt. Zum Beschreiben der Ungewissheiten zählt auch, Ungewissheiten zu analysieren und ggf. zu quantifizieren.

Beim Umgang mit technischen Risiken und Naturgefahren hat sich ein Vorgehen eingespielt, bei dem das Risiko anhand der Ergebnisse einer Risikoanalyse genauer beschrieben werden kann. Risiko wird dabei als Funktion von Schadenausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit quantifiziert oder häufig auch quantitativ oder semiquantitativ eingeschätzt und entsprechenden Risikoklassen zugeordnet. Zur Analyse der Risiken stehen verschiedene Instrumente zur Verfügung, die es erlauben, Risiken zu beschreiben und anschließend anhand von Grenzwerten oder anderen regulatorischen Vorgaben (vgl. «

Regelungen zur Beurteilung von Risiken») festzustellen, ob das Risiko akzeptabel ist oder nicht.

Da Ungewissheiten sowohl verschiedenen Kategorien angehören als auch jede für sich oft vielschichtig sind, ist eine quantitative Analyse nur für einen Teil der Ungewissheiten im Safety Case möglich und aussagekräftig. Ungewissheiten, die sich ausschließlich oder überwiegend in einer natürlichen menschlichen Sprache beschreiben lassen, erfordern in erster Linie verbal-argumentative Einschätzungen.

## Formen der Beschreibung von Ungewissheiten

Verschiedene Kategorien von Ungewissheiten (vgl. «Klassifikation von Ungewissheiten»), aber auch Ungewissheiten innerhalb einer Kategorie lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise beschreiben:

- Eine Ungewissheit ist quantifizierbar, wenn sich ihr Ausmaß mathematisch ausdrücken lässt. Das gilt zum Beispiel, wenn sich die Ungewissheit darüber, wo der reale Wert eines Parameters liegt, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Parameterwerten ausdrücken lässt (vgl. auch «Regelungen zur Beurteilung von Risiken, die mit quantifizierbaren Ungewissheiten verbunden sind»).
- Eine Ungewissheit ist einschätzbar, wenn sie quantifizierbar ist oder sich ihr Ausmaß semiquantitativ einordnen lässt. Bei einem Risiko, bei dem genaue Informationen zur Eintrittswahrscheinlichkeit fehlen, lässt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit dann beispielsweise als «gering» einordnen, in Abgrenzung zu höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten (vgl. auch «Regelungen zur Beurteilung von Risiken, die mit einschätzbaren, aber nicht quantifizierbaren Ungewissheiten verbunden sind»).
- Eine Ungewissheit ist charakterisierbar, wenn es sich um eine einschätzbare Ungewissheit handelt oder um eine bekannte Unbekannte, die sich mit Merkmalen in einer natürlichen menschlichen Sprache beschreiben lässt. Ein Beispiel ist die «Ungewissheit zu räumlich eng begrenzten Anomalien beim Vorkommen und der Vernetzung kleiner Klüfte im Wirtsgestein Kristallin am künftigen Standort für ein Endlager».
- Eine Ungewissheit ist verortbar, wenn sie sich Elementen des Endlagersystems oder Rahmenbedingungen für das Endlager zuordnen lässt, die für den Safety Case relevant sind. Ein Beispiel sind «anthropogen beeinflusste klimatische Entwicklungen der Zukunft».

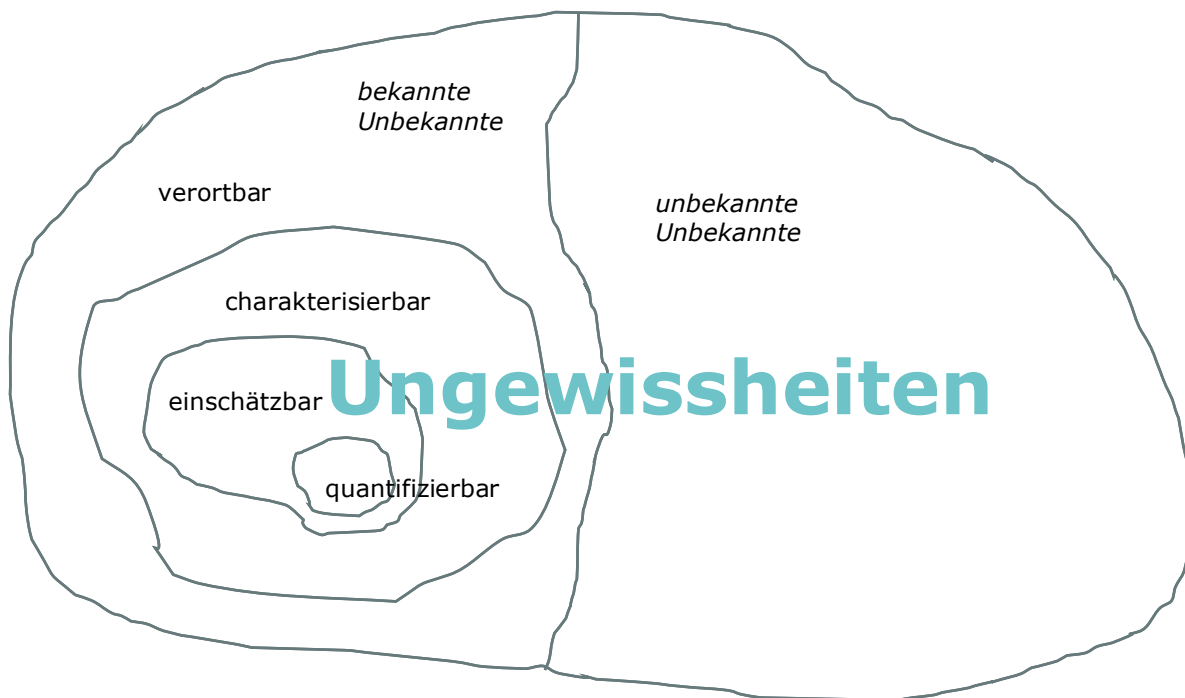


Abbildung 15-1: Beschreibbarkeit von Ungewissheiten – schematische Abbildung. Bekannte Unbekannte, die verortbar sind, können, falls eine genauere Beschreibung möglich ist, auch als charakterisierbar eingestuft werden. Quantifizierbare Ungewissheiten zählen zu den einschätzbaren, einschätzbare zu den charakterisierbaren Ungewissheiten. Zu unbekanntem Bekannten lassen sich dagegen keine Aussagen machen. Die Fläche der dargestellten Bereiche sagt nichts über das Ausmaß der Ungewissheiten aus

Da sich viele Ungewissheiten im Lauf der Zeit verändern bzw. nur zu bestimmten Zeiten für ein Endlagersystem relevant sind, sollte jede Beschreibung von Ungewissheiten eine Angabe darüber enthalten, auf welchen Abschnitt des Bewertungszeitraums sie sich bezieht.

Die oben erwähnten Beispiele deuten darauf hin, dass sich Ungewissheiten auch unterschiedlich präzise beschreiben lassen. Für den Prozess «Klimaveränderung» gibt die finnische Vorhabenträgerin Posiva Ungewissheiten an zum Verständnis der natürlichen Verknüpfungen innerhalb des Klimasystems Erde (verortbare Ungewissheit). Diese Ungewissheiten verstärken sich, wenn der Einfluss der von Menschen verursachten Klimaerwärmung miteinbezogen werden soll (verortbare Ungewissheit). Erwähnt wird auch Ungewissheit darüber, wann im Zeitraum zwischen 50'000 und 100'000 Jahren in die Zukunft hinein die nächste Kaltzeit eintreten wird (charakterisierbare Ungewissheit) (Posiva 2012, S. 448).

Der Bericht «Climate Change 2013: The physical science basis» des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) listet 30 zentrale Ungewissheiten oder Schlüsselungewissheiten («key uncertainties») zur anthropogen bedingten Klimaerwärmung im 20. und 21. Jahrhundert auf. Darunter befinden sich Ungewissheiten abrupten und nicht-linearen Veränderungen im Klimasystem, zu Trockenheitsperioden, zum Anstieg des Meeresspiegels oder zu Wechselwirkungen zwischen Wolken und Aerosolen (charakterisierbare Ungewissheiten). Im Bericht werden zahlreiche spezifische Ungewissheiten genauer eingeschätzt oder quantifiziert, beispielsweise zu Projektionen der Temperaturentwicklung oder zur Aufnahme von Kohlendioxid aus der Atmosphäre an Land und durch die Ozeane (IPCC 2013, S. 114f.).

Manche Ungewissheiten lassen sich also umso präziser beschreiben, je präziser die Beschreibung von Elementen des Endlagersystems ist, in die die Beschreibung der Ungewissheit eingebettet ist. Zudem ist die zeitliche Dimension zu beachten. Die aktuellen Berichte des IPCC sind im Wesentlichen auf das 21. Jahrhundert ausgerichtet. Bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle muss ein Bewertungszeitraum von einer Million Jahre untersucht werden, wobei die Präzision der Beschreibung in der Regel mit zunehmendem Betrachtungshorizont abnimmt.

## Kategorien von Ungewissheiten und Formen der Beschreibung

Der Safety Case ist wesentlich darauf ausgerichtet, Ungewissheiten zu diskutieren (Posiva 2008, S. 53f.). Die Quantifizierung von Ungewissheiten trägt nicht notwendigerweise dazu bei, dass ein Safety Case aussagekräftiger wird, sondern kann sich auch als kontraproduktiv erweisen: «Quantification and mathematical treatment of uncertainties may be possible in some cases, but it does not necessarily make the assessment more exact than thorough verbal explanations. In fact, the quantification of uncertainty in complex matters or issues usually means losing information and transparency. For instance, most of the site descriptions consist of differentiating between what is known and unknown; the numbers could never convey the same meanings as these descriptions» (Posiva 2008, S. 62).

Quantifizierbar sind im Safety Case vor allem Parameterungewissheiten. Zum Umgang mit Parameterungewissheiten existieren mathematische Instrumente, vor allem aus dem Bereich der Stochastik, sowie vielfältige Erfahrungen mit der Anwendung solcher Instrumente in den Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften. Dort, wo Parameter, die für die Sicherheit eines Endlagers relevant sind, noch zu den bekannten Unbekannten zählen, kann teilweise immerhin mit generischen Daten oder Näherungswerten gearbeitet werden. Die spezifischen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind am Beginn eines Standortauswahlverfahrens noch nicht bekannt. Aus den Geowissenschaften sind aber Kenntnisse zu den charakteristischen Eigenschaften der in Frage kommenden Wirtsgesteine vorhanden.

Viele Modell-, Systementwicklungs- und Human Factor-Ungewissheiten zählen zu den einschätzbaren oder charakterisierbaren Ungewissheiten. Bei der Einschätzung, Charakterisierung und Verortung spielen Expertenaussagen im Safety Case eine wichtige Rolle. Diese Expertenaussagen beruhen oft auf Ergebnissen empirischer Untersuchungen, beispielsweise zur Zuverlässigkeit menschlicher Handlungen oder zum Korrosionsverhalten von Endlagerbehältern unter den spezifischen Bedingungen in einem Endlager in Salzformationen. Unterschiedlich ausgeprägt können jedoch die Anzahl und die Untersuchungstiefe der empirischen Untersuchungen sein, auf denen die Aussage der Experten beruht, die Relevanz der Untersuchungen für die jeweilige Aussage und persönliche Interpretationen der empirischen Grundlagen durch die Experten. Bei der Beurteilung der Ungewissheiten müssen daher unterschiedliche Qualitäten von Expertenaussagen berücksichtigt werden (vgl. «Vorgehen bei der Beurteilung von Ungewissheiten»).

Nur verortbar, aber nicht charakterisierbar sind in erster Linie anthropogene und normative Ungewissheiten, da die Komplexität und das oft hohe Tempo gesellschaftlicher Entwicklungen die Beschreibung von Ungewissheiten deutlich erschweren. Wird ein Zeithorizont von 15 bis 20 Jahre überschritten, lassen sich diese Ungewissheiten ebenso wie die mit ihnen

verbundenen Human Factor-Ungewissheiten kaum noch charakterisieren. Der Einfluss aus heutiger Perspektive unbekannter Unbekannter dürfte im Bereich der anthropogenen Entwicklungen über die Zeit stark zunehmen und die bekannten Unbekannten mit zunehmendem Bewertungszeitraum schließlich dominieren.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Posiva 2012: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto – features, events and processes 2012. POSIVA 2012-07. Eurajoki.

Posiva 2008: Safety case plan 2008. POSIVA 2008-05. Eurajoki.





# 16. Beurteilen von Ungewissheiten

Der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case erfolgt in vier Schritten. Gegenstand des vorliegenden Arbeitspapiers ist der dritte Schritt.

*Die Beurteilung einer Ungewissheit richtet sich daran aus,*

- *wie stark die Ungewissheit die Einschätzung der Möglichkeit eines Schadens im Safety Case direkt und indirekt beeinträchtigt,*
- *wie empfindlich die Ergebnisse des Safety Case auf Veränderungen der Ungewissheit reagieren,*
- *wie fundiert die Aussagen sind, die über die Sicherheitsrelevanz der Ungewissheit gemacht werden können.*

*Da Ungewissheiten unterschiedlich beschrieben werden, ist eine ganzheitliche Beurteilung, die Vergleiche und Abwägungen von Ungewissheiten umfasst, anspruchsvoll.*

*Ein wichtiges Ziel für die Weiterentwicklung des Safety Case ist es, spezifischere Ansätze für eine transparente Beurteilung von Ungewissheiten und eine transparente Abwägung zwischen unterschiedlichen Ungewissheiten zu entwickeln.*

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case eignet sich ein schrittweises Vorgehen, das iterativ durchlaufen wird:

- Identifizieren der Ungewissheiten
- Beschreiben der Ungewissheiten
- Beurteilen der Ungewissheiten
- Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten

Im vorliegenden Arbeitspapier wird der Schritt «Beurteilen der Ungewissheiten» behandelt.

## Rechtliche Anforderungen

Eine wesentliche Grundlage für die Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case stellen die rechtlichen Anforderungen an die Sicherheit eines Endlagersystems und die Durchführung von Safety Cases dar.

Angesichts der letztlich doch erheblichen Ungewissheiten zur Entwicklung des Entsorgungspfads und zur Entwicklung eines Endlagersystems über den Bewertungszeitraum ist zu erwarten, dass Ungewissheiten im Recht einen hohen Stellenwert einnehmen. Tatsächlich werden Ungewissheiten international in Endlagersicherheitsanforderungen und Anforderungen an Safety Cases thematisiert. An den Umgang mit Ungewissheiten werden jedoch im Allgemeinen nur wenige, grundlegende Anforderungen gestellt (vgl. auch «Grundlagen der Regulierung von Ungewissheiten»).

In der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) werden Ungewissheiten lediglich gestreift, zumindest, was die direkte Regulierung des Umgangs mit Ungewissheiten betrifft. Bei der Auslegung der untertägigen Bereiche des Endlagers sind alle Ergebnisse der Erkundung des Endlagerstandortes einschließlich ihrer Ungewissheiten und deren Relevanz für die Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems zu berücksichtigen (§11 EndlSiAnfV 2020). Zudem wird die Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Berechnung des Neutronenmultiplikationsfaktors gefordert (Anlage Zu §8 Absatz 2 EndlSiAnfV 2020). Indirekt sind Ungewissheiten ein Thema, wenn zum Beispiel von Entwicklungen des Endlagersystems, von Robustheit oder Sicherheitsreserven die Rede ist.

In der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) ist der Bewertung von Ungewissheiten ein eigener Paragraph (§11 EndlSiUntV 2020) gewidmet. Dort wird gefordert, Ungewissheiten systematisch auszuweisen und zu charakterisieren, Verknüpfungen von Ungewissheiten untereinander und Modellungewissheiten zu berücksichtigen, aufgrund von Ungewissheiten getroffene Annahmen darzulegen und zu begründen, den Umgang mit den Ungewissheiten und deren Auswirkungen auf die Aussagekraft des Ergebnisses der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung zu dokumentieren und darzulegen, ob und in welchem Umfang Ungewissheiten durch weitere Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen reduziert werden können und in welchem Maß dadurch die Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Aussagen erhöht werden kann.

Im schweizerischen Kernenergiegesetz (KEG 2018) und der zugeordneten Kernenergieverordnung (KEV 2019) werden Ungewissheiten nicht erwähnt. Die Richtlinie der Sicherheitsaufsichtsbehörde zu geologischen Tiefenlagern enthält einzelne grundlegende Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten. Demnach sollen Ungewissheiten bei Sicherheitsnachweisen aufgezeigt werden. Die sicherheitstechnische Relevanz von Ungewissheiten ist darzulegen, zur Ermittlung des Einflusses von Ungewissheiten auf die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse ist eine systematische Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse durchzuführen und Ungewissheiten sind «soweit notwendig und möglich, durch Forschung und Datenerhebung zu reduzieren» (ENSI 2020, S. 13f.).

In Finnland überträgt das Kernenergiegesetz der Sicherheitsaufsichtsbehörde die Kompetenz, eigene Regelungen zu erlassen (Finlex 2020). Eine der Regelungen der Sicherheitsaufsichtsbehörde bezieht sich auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle (STUK 2018a). Dort wird gefordert, dass die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen für ein Endlager mit hoher Zuverlässigkeit nachzuweisen sei. Wenn geprüft wird, ob die Sicherheitsanforderungen eingehalten sind, müssen Ungewissheiten einbezogen werden (Chapter 2, STUK 2018a). Im Safety Case zur Langzeitsicherheit eines Endlagers sollen Ungewissheiten und deren Auswirkungen eigens bewertet werden (Chapter 8, STUK 2018a). Die Regelung der Aufsichtsbehörde wird durch eine Leitlinie konkretisiert (STUK 2018b). Sie hält fest, dass im Safety Case ausgewiesen werden muss, auf welchem Vertrauensniveau die Sicherheitsanforderungen erreicht werden und welche Ungewissheiten und Annahmen das Vertrauensniveau am stärksten beeinflussen. Die Bedeutung der Ungewissheiten im Safety Case muss systematisch untersucht und eine Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Zudem ist auszuweisen, wo Bedarf an einer weiteren Verminderung von Ungewissheiten besteht.

Im Safety Case wird belegt, dass ein Endlagersystem die rechtlichen Anforderungen erfüllt. Wenn rechtliche Regelungen den Betrachtungsumfang des Safety Case einschränken, wird

dadurch auch das Spektrum der Ungewissheiten, die im Safety Case identifiziert, beschrieben und beurteilt werden müssen, vermindert (STUK 2015, S. 71).

Davon betroffen sind Ungewissheiten zu künftigen menschlichen Aktivitäten: Die EndSi-AnfV sieht vor, dass als Referenzentwicklungen für zukünftige menschliche Aktivitäten Entwicklungen dienen sollen, die durch derzeit übliche menschliche Aktivitäten ausgelöst werden können (§3 EndSiAnfV 2020). Bei der Abschätzung der Dosiswerte im Bewertungszeitraum sind generell die Lebensbedingungen zum Zeitpunkt der Antragstellung zu unterstellen (§7 EndSiAnfV 2020). Auch die schweizerische Richtlinie hält fest: «Szenarien, in denen die Sicherheit des geologischen Tiefenlagers durch menschliche Handlungen beeinflusst wird, sind so anzunehmen, wie es mit Blick auf die heutige Gesellschaft glaubhaft erscheint». Die Berechnung der effektiven Dosis für Einzelpersonen soll aufgrund von Lebensbedingungen erfolgen, die aus heutiger Sicht realistisch sind. (ENSI 2020, S. 16). Im finnischen Safety Case darf davon ausgegangen werden, dass sich auch die belebte Umwelt am Standort des Endlagers nicht verändert (3.2.5, STUK 2018b).

## Fallbeispiel Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben

In der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) basierten die Identifikation, Beschreibung und Beurteilung von Ungewissheiten vielfach auf «plausiblen fachlich begründeten Annahmen», die mittels Expertenaussagen getroffen wurden. Ein begleitendes Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur Verminderung von Ungewissheiten war aus zeitlichen Gründen nicht durchführbar (GRS 2013, S. 236).

Annahmen, die aufgrund mangelnder Kenntnisse über die innere Struktur des Salzstocks Gorleben getroffen werden mussten und von grundlegender Bedeutung für die Gesamtsicherheitsaussage sind, wurden als Prämissen deklariert (GRS 2013, S. 237). Weitere Annahmen wurden offengelegt, zum Beispiel zur Auslegung von Endlagerbehältern, Streckenverfüllung und Schachtverschlüssen (GRS 2013, S. 239) oder zur auslegungsgerechten Errichtung der Strecken- und Schachtverschlüsse (GRS 2013, S. 243).

Im Katalog der Eigenschaften, Ereignisse und Vorgänge (features, events and processes, FEP), die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen und sicherheitsrelevant sind, wurden für jedes FEP der Kenntnisstand und die identifizierten Ungewissheiten dokumentiert. Eine inhärente Ungewissheit stellt die Vollständigkeit des FEP-Katalogs dar. Gegenseitige Abhängigkeiten, Wechselwirkungen und die Einordnung der FEPs in Wahrscheinlichkeitsklassen waren «stark geprägt durch die Notwendigkeit, subjektive Entscheidungen vornehmen zu müssen, wenn der Kenntnisstand für eine objektive Entscheidung nicht ausreicht» (GRS 2013, S. 240). Um die Qualität der getroffenen Einschätzungen zu verbessern, stützte sich die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS) auf vorlaufende Arbeiten und Ergebnisse aus aktuellen Forschungsprojekten ab, zog Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachdisziplinen bei, vergab externe Gutachten und bildete einen Arbeitskreis, dem 19 Wissenschaftler aus verschiedenen Fachdisziplinen und Institutionen angehörten, um den FEP-Katalog zu erstellen (GRS 2013, S. 240f). Parameterungewissheiten wurden unter anderem im Rahmen deterministischer Unsicherheitsanalysen untersucht (GRS 2013, S. 274). Durch Anwendung von Modellen, die auf verschiedenen Modellkonzepten beruhen, wurden Modellungewissheiten identifiziert und in der Folge auch reduziert (GRS 2013, S. 244f).

Die Szenarienentwicklung stützte sich wesentlich auf den FEP-Katalog und die geowissenschaftliche Langzeitprognose sowie grundlegende Annahmen, die für die Referenzszenarien verwendet wurden, ab. Zu diesen Annahmen zählen eine Klimaentwicklung mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten in einem 100'000-Jahre-Zyklus und die auslegungsgerechte Erstellung der Strecken- und Schachtverschlüsse (GRS 2013, S. 242f). Bei der Erstellung des FEP-Katalogs und bei der Szenarienentwicklung zeigte sich, dass manche Entwicklungen kaum prognostizierbar sind. Ein Beispiel sind exogene Lastfälle, die sich aus klimatischen Entwicklungen ableiten, ein anderes die hydrogeologische Situation nach einer Kaltzeit mit Gletscherüberfahrung. Bei den Sicherheitsfunktionen zur Rückhaltung von Radionukliden wurde das Deckgebirge daher nicht miteinbezogen (GRS 2013, S. 244), was auch dem Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entspricht.

In der «Zusammenfassung der Ergebnisse» (GRS 2013, S. 257 f.) wird auf die grundlegenden Annahmen verwiesen, die Prämissen des Safety Case darstellen. Die entsprechenden Ungewissheiten werden als «signifikant» hervorgehoben (GRS 2013, S. 274), ebenso Ungewissheiten zum langfristigen Kompaktionsverhalten von Salzgrus (GRS 2013, S. 267) sowie zur zukünftigen Klimaentwicklung und ihrer Auswirkung auf das Endlagersystem (GRS 2013, S. 272). Zur modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen werden Ungewissheiten, die zehn Prozesse betreffen, explizit aufgeführt (GRS 2013, S. 273). Zu Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen geht die GRS davon aus, «dass alle aus heutiger Sicht denkbaren zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems berücksichtigt und die hieraus resultierenden sicherheitstechnischen Konsequenzen im Vorhaben VSG analysiert wurden» (GRS 2012, S. 272). Nicht prognostizierbare zukünftige Entwicklungen betreffen aus ihrer Sicht vor allem zukünftig klimatischen Entwicklungen (GRS 2013, S. 272).

Im Zusammenhang mit Ungewissheiten weist die GRS in vielen Fällen Forschungs- und Entwicklungsbedarf aus. Die Zusammenfassung des wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs umfasst sechs Themenfelder, unter anderem die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften von Salzgrusversatz und die Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse (GRS 2013, S. 337). Die systematische Zusammenstellung des Forschungs- und Entwicklungsbedarf stellte ein explizites Vorhabenziel der VSG dar (GRS 2013, S. 5).

Aus der VSG lassen sich also «Schlüsselungewissheiten» (vgl. unten «Vorgehen bei der Beurteilung von Ungewissheiten») herauslesen, auch wenn diese Ungewissheiten nicht systematisch als Schlüsselungewissheiten ausgewiesen werden. Anhaltspunkte bieten, die in der Synthese zur VSG erwähnten «signifikanten Ungewissheiten» und der «wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf».

Die Synthese enthält keine ganzheitliche Beurteilung der Ungewissheiten. Angesichts des vorläufigen Charakters der Sicherheitsanalyse, die ein Forschungsprojekt war und kein entscheidungsrelevanter Safety Case, ist das verständlich. Angesichts des «prototypischen Charakter für zukünftige Sicherheitsanalysen» (GRS 2013, S. 1) wäre der Versuch, eine ganzheitliche Beurteilung der Ungewissheiten vorzunehmen, allerdings interessant gewesen.

## Vorgehen bei der Beurteilung von Ungewissheiten

Der Safety Case ist eine formale Zusammenstellung von Argumenten, Belegen und Analysen, mit der die Sicherheit eines Endlagersystems über den Bewertungszeitraum geprüft wird (vgl. «Der Safety Case»). Bei der Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case steht daher im Vordergrund, wie stark eine Ungewissheit die Aussagen zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen im Safety Case beeinträchtigt. Eine Ungewissheit beeinträchtigt diese Aussagen stark, wenn sie wesentlich zur Gesamtungewissheit der Ergebnisse des Safety Case beiträgt und die Ergebnisse des Safety Case empfindlich auf Veränderungen dieser Ungewissheit reagieren.

Zu den künftigen Entwicklungen des Klimasystems hat das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Schlüsselungewissheiten identifiziert (IPCC 2013, S. 114f.). Ein solcher Ansatz lässt sich auch im Safety Case anwenden. Bei der Prüfung des Safety Case für das finnische Endlager für abgebrannte Brennelemente am Standort Olkiluoto bezog sich die Sicherheitsbehörde auf Schlüsselparameter und -daten (STUK 2015, S. 45f.), Schlüsselfaktoren, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen, und Schlüsselsicherheitsfunktionen (STUK 2015, S. 23f.), Schlüsselargumente für die Sicherheit (STUK 2015, S. 54) und Schlüsselungewissheiten (STUK 2015, S. 40f.).

Schlüsselungewissheiten sind aufgrund einer Integration aller Analysen von Ungewissheiten im Safety Case zu ermitteln (STUK 2015, S. 72). Weiter geht die Forderung, einer Expertengruppe der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD, die ermittelten Ungewissheiten nach Prioritäten zu ordnen (NEA 2004, S. 53), die sich dann auch als Grundlage für ein Programm zum weiteren Vorgehen nutzen lassen (STUK 2015, S. 7).

Um die Zuverlässigkeit, mit der die Sicherheitsrelevanz einer Ungewissheit beurteilt werden kann, einzuordnen, eignen sich die Fragen (in Anlehnung an Funtowicz & Ravetz 1990; van der Sluijs 2013):

- Wie gut sind die Kenntnisse zur Ungewissheit und ihrer Sicherheitsrelevanz empirisch fundiert?
- Wie gut sind die Kenntnisse zur Ungewissheit und ihrer Sicherheitsrelevanz theoretisch fundiert?
- Wie gut ist die Qualität der Methoden, die zur Beurteilung der Ungewissheiten verwendet wurden?

Die Zuverlässigkeit wird damit wesentlich anhand der Art und Weise beurteilt, wie eine Aussage zustande kam. Spezifischere Fragen zur Beurteilung von Aussagen über Ungewissheiten sind:

- Basiert die Information zur Ungewissheit auf einer Fachpublikation, die unabhängig begutachtet wurde, einer nicht begutachteten Fachpublikation, einem Konferenzbeitrag, einem internen Dokument oder einer Einzelmeinung?
- Beruht die Information zur Ungewissheit auf einer großen Stichprobe empirisch gewonnener Daten, einer kleinen Stichprobe empirisch gewonnener Daten, auf historischen Daten oder Felddaten, kalkulierten Daten, fundierten Vermutungen, nicht-fundierten Vermutungen oder Spekulation?

- Wurde die Beurteilung der Ungewissheit unabhängig begutachtet, in einem strukturierten Verfahren von unabhängigen Experten durchgeführt, unstrukturiert von unabhängigen Experten durchgeführt, in einem internen Team vorgenommen, oder entspricht sie der Meinung einer einzelnen Person?

Wesentlich ist zudem, dass bei der Beurteilung der Sicherheitsrelevanz einer Ungewissheit die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Ungewissheiten im Safety Case berücksichtigt werden. Da sich viele Ungewissheiten im Lauf der Zeit verändern oder nur zu bestimmten Zeiten für ein Endlagersystem relevant sind, muss neben der Beschreibung auch die Beurteilung einer Ungewissheit Angaben dazu enthalten, auf welchen zeitlichen Abschnitt des Bewertungszeitraums sie sich bezieht.

## Ganzheitliche Beurteilung

Ein wichtiges Ziel für die Weiterentwicklung des Safety Case ist es, Kriterien für eine transparente Beurteilung von Ungewissheiten und eine transparente Abwägung zwischen unterschiedlichen Ungewissheiten zu entwickeln (Grunwald 2010, S. 81; Vigfusson et al. 2007).

Zur Zuverlässigkeit, mit der die Sicherheitsrelevanz einer Ungewissheit beurteilt werden kann, können Forschungsarbeiten und Anwendungsbeispiele herangezogen werden, wie sie beispielsweise in (Funtowicz & Ravetz 1990; van der Sluijs 2013) dokumentiert sind. Diese Arbeiten werden es voraussichtlich erlauben, spezifische Kriterien zur Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case zu entwickeln. Eine transparente und nachvollziehbare Beurteilung ist auf dieser Grundlage möglich.

Die ganzheitliche Beurteilung und Abwägung von Ungewissheiten wird dadurch erschwert, dass im Safety Case unterschiedliche Formen von Ungewissheiten auftreten, die sich unterschiedlich beschreiben lassen (vgl. «Beschreiben von Ungewissheiten»).

Bei Modellierungen der technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren lassen sich mathematisch beschreibbare Parameter- und Modellungsgewissheiten zu einer Gesamtungewissheit zusammenführen, die ebenfalls mathematisch formuliert werden kann.

Ungewissheiten zu anthropogenen Einwirkungen auf die technischen, geotechnischen und geologischen Barrieren zum Beispiel lassen sich dagegen nicht mathematisch beschreiben, sondern müssen verbal-argumentativ dargelegt werden. In manchen Fällen sind Beschreibungen nur ansatzweise («verortbare Ungewissheiten», vgl. «Beschreiben von Ungewissheiten») möglich. Dieser Schwierigkeit wird durch einen spezifischen Umgang mit anthropogenen Ungewissheiten im Safety Case begegnet (vgl. «Anthropogene Ungewissheiten» und «Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager»). Die Auswirkungen von Ungewissheiten, die sich ausschliesslich in natürlicher Sprache beschreiben lassen, werden zum Beispiel durch Anforderungen an Konservativität, Sicherheitsaufschläge oder Robustheit abgefangen (vgl. «Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten») und damit die Beurteilung der Ungewissheit positiv beeinflusst.

Mit dem Ziel einer ganzheitlichen und doch differenzierten Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case vor Augen scheint es lohnend, weitere Anstrengungen zu unternehmen, um Beurteilungsgrundlagen zu entwickeln, die sowohl den verschiedenen Kategorien von Ungewissheiten (vgl. «Klassifikation von Ungewissheiten») als auch Ungewissheiten, die

unterschiedlich beschrieben werden (vgl. «Beschreiben von Ungewissheiten»), gerecht werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die Akzeptabilität mancher Ungewissheiten über den Verlauf des Bewertungszeitraums verändern kann (vgl. «Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten»). Neue Ansätze, wie die Kartierung von Ungewissheiten (Dienel & Henseler 2017) und Erfahrungen aus anderen Bereichen wie dem Klimaschutz könnten bei der ganzheitlichen Beurteilung hilfreich sein.

Ein generell wichtiges Ziel für die Weiterentwicklung des Safety Case ist es zudem, spezifischere Ansätze für eine transparente Beurteilung von Ungewissheiten und eine transparente Abwägung zwischen unterschiedlichen Ungewissheiten zu entwickeln.

## Anforderungen an Entscheidungsgrundlagen

Auf dem Entsorgungspfad nehmen Safety Cases eine wichtige Rolle als Entscheidungsgrundlagen ein. Als Ergebnis des Safety Case muss den Entscheidungsträgern und -trägerinnen letztlich in konzentrierter Form vermittelt werden, ob die Sicherheit so gut belegt ist, dass der nächste Schritt auf dem Entsorgungspfad in Angriff genommen werden kann.

Die Vorhabenträger verfassen in der Regel einen Synthesebericht, in dem die Ergebnisse des Safety Case zusammengefasst sind (Posiva 2012 und sinngemäß GRS 2013). Aufsichtsbehörden berichten über die Ergebnisse ihrer Beurteilung des Safety Case (STUK 2015). Ggf. erstellen weitere Expertengremien Gutachten zum Safety Case (NEA 2004; KSA 2005). Politische Entscheidungen werden auf der Grundlage dieser Dokumente von der öffentlichen Verwaltung vorbereitet.



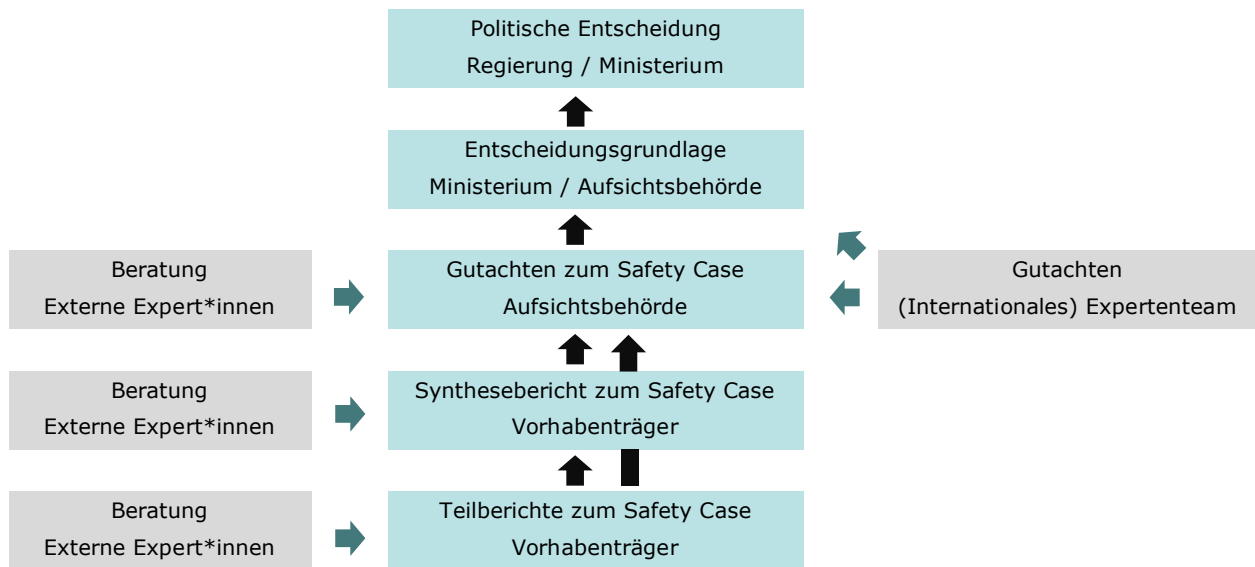


Abbildung 16-1: Beurteilung der Einhaltung der Sicherheitsanforderungen im Safety Case als Grundlage für politische Entscheidungen – Dokumente und Gremien (eigene Darstellung). Die Ergebnisse der Teilberichte zum Safety Case werden im Synthesebericht des Vorhabenträgers zusammengeführt. Die Aufsichtsbehörde stützt ihre Beurteilung, die in die Grundlage für eine politische Entscheidung eingeht, auf den Synthesebericht und die Teilberichte ab.

Eine Gesamtbeurteilung der Ungewissheiten muss mindestens im Gutachten der Aufsichtsbehörde und in der Entscheidungsgrundlage enthalten sein, damit eine informierte Entscheidung auf politischer Ebene möglich wird. Die Entscheidungsgrundlage wird beispielsweise in Form eines Antrags an die Regierung formuliert.

Die finnische Aufsichtsbehörde Säteilyturvakeskus (STUK) beurteilte 2015 den Safety Case der Vorhabenträgerin Posiva zum Baugenehmigungsgesuch für ein Lager für abgebrannte Brennelemente am Standort Olkiluoto. Sie kam zum Schluss, dass Posiva die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen ausreichend belegt habe, um eine Baubewilligung zu erhalten. Zur Langzeitentwicklung des Endlagersystems verblieben aber wesentliche Ungewissheiten, die während dem weiteren Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad vermindert werden müssten. Im Rahmen der Beurteilungen der Langzeitsicherheit widmete STUK den Ungewissheiten ein eigenes Beurteilungsfeld («review area») und fasste ihre Aussagen dazu wie in der folgenden Abbildung dargestellt zusammen.

### *Summary*

*(1) Posiva's approach for handling uncertainties is based on identifying, avoiding, reducing, and assessing; "avoiding" plays a big part because Posiva assumes an almost flawless implementation of its QA/QC program. Posiva should consider more uncertainties due to potential human errors.*

*(2) Posiva does not differentiate between aleatory and epistemic uncertainties; this is reasonable in this first phase of licensing but greater attention should be paid to uncertainties arising from 'lack of knowledge' or epistemic uncertainties.*

*(3) Uncertainties are handled in compliance demonstration by defining various types of calculation cases; this approach is reasonable but greater use of the PSA should be made.*

*(4) Posiva should consider using a traditional reference biosphere calculation, using local data, to enhance confidence in the dose calculations.*

Abbildung 16-2: Zusammenfassung zum Beurteilungsfeld Ungewissheiten im Bericht der Aufsichtsbehörde (STUK 2015, S. 74), in der zu vier Themen Handlungsbedarf festgestellt wird.

Generell ist festzuhalten, dass eine Gesamtbeurteilung der Ungewissheiten nicht in ein Vertrauensintervall münden oder in einer einfachen Beurteilungsmatrix dargestellt werden kann. Sie muss vielmehr, wie es dem grundlegenden Ansatz des Safety Case entspricht, auf einer differenzierten Abwägung beruhen. Als wesentliche Grundlage für diese Abwägung muss ausgewiesen werden, welche Ungewissheiten als akzeptabel beurteilt werden und warum.

Dienel, H-L.; Henseler C. 2017: Landkarten des Ungewissen – ein Werkzeug für die Kommunikation von Ungewissheit in den Wissenschaften. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin. 131 (2017), S. 165–188.

EndSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

EndSiUntV – Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung 2020: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.

- Finlex 2020: Nuclear Energy Act (990/1987; amendments up to 862/2018 included). Translation completed 16.10.2019. <https://www.finlex.fi/en/laki/kaannokset/1987/en19870990>. Abgerufen am 25.7.2020.
- Funtowicz, S.O.; Ravetz, J.R. 1990: Uncertainty and quality in science for policy. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.
- Grunwald, A. 2010: Ethische Anforderungen an nukleare Endlager. Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2013: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Fischer-Appelt, K.; Baltes, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J. GRS-290.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change 2013: Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- KEG – Kernenergiegesetz 2018: Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 (Stand am 1. Januar 2018). SR 732.1
- KEV – Kernenergieverordnung 2019: Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (Stand am 1. Februar 2019). SR 732.11
- KSA – Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen 2005: Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). KSA 23/170. Villigen PSI.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2004: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. NEA No. 5569. Paris.
- Posiva 2012: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012. Eurajoki.
- STUK – Säteilyturvakeskus 2018a: Radiation and nuclear safety authority regulation on the safety of disposal of nuclear waste. Regulation STUK Y/4/2018. Adopted in Helsinki on 10 December 2018. Unofficial Translation from Finnish. <https://www.stuklex.fi/en/maarays/stuk-y-4-2018>. Abgerufen am 25.7.2020.
- STUK 2018b: Disposal of nuclear waste. Guide YVL D.5. 13.2.2018. Helsinki. <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLD-5>. Abgerufen am 25.7.2020.
- STUK 2015: Review of safety assessment in Posiva's construction license application for a repository at Olkiluoto. Ed. Sagar, B. STUK-TR 19. Helsinki.
- van der Sluijs, J. 2013: Dealing with uncertainty in integrated assessment: The NUSAP approach. Presentation at the ICA-RUS/CCRP-PJ2 international workshop 2013 Now and future of global climate risk management. Tokyo 5 December 2013.

Vigfusson, J., Maudoux, J., Rimbault, Ph., Röhlig, K.J., Smith, R.E. 2007: European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management.



# 17. Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten

Der Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case erfolgt in vier Schritten. Im vorliegenden Arbeitspapier wird der letzte Schritt behandelt.

*Ansätze zum Umgang mit Ungewissheiten sind im Recht, in behördlichen Leitlinien, in Entsorgungsprogrammen, technischen Berichten, wissenschaftlichen Publikationen und im Safety Case selbst zu finden.*

*Die Art und Weise, wie mit Ungewissheiten, die im Safety Case verbleiben, weiter umgegangen werden soll, hängt wesentlich von der Position des Safety Case auf dem Entsorgungspfad ab. Zu Beginn des Entsorgungspfads muss der Umgang mit Ungewissheiten so erfolgen, dass im Sinn eines lernenden Verfahrens genügend Flexibilität für Anpassungen und Kurskorrekturen besteht, da die Ungewissheiten hier noch groß sind. Mit zunehmendem Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad nehmen Pfadabhängigkeiten zu.*

*Sowohl beim iterativen Vorgehen innerhalb eines Safety Case als auch zwischen aufeinanderfolgenden Safety Cases können Ansätze zum weiteren Umgang mit Ungewissheiten auf die Identifizierung, Beschreibung und Beurteilung von Ungewissheiten rückwirken.*

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case eignet sich ein schrittweises Vorgehen, das iterativ durchlaufen wird:

- Identifizieren der Ungewissheiten
- Beschreiben der Ungewissheiten
- Beurteilen der Ungewissheiten
- Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten

Im vorliegenden Arbeitspapier wird der Schritt «Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten» behandelt.

Die Art und Weise, wie mit Ungewissheiten, die im Safety Case verbleiben, umgegangen werden soll, hängt wesentlich von der Position des Safety Case auf dem Entsorgungspfad ab. Bei einem Safety Case, der als Grundlage für eine Standortgenehmigung dient, sind mehr Ungewissheiten unausweichlich und akzeptabel als bei einem Safety Case, der als Grundlage für die Stilllegung eines Endlagers durchgeführt wird.

Zum (weiteren) Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case finden sich Ansätze in nationalen und internationalen Regelwerken, in wissenschaftlichen Publikationen und technischen Berichten sowie in den Berichtswerken von Safety Cases. Sowohl beim iterativen Vorgehen innerhalb eines Safety Case als auch bei Safety Cases, die auf dem Entsorgungspfad einander folgen, können diese Ansätze auf die Identifizierung, Beschreibung und Beurteilung von Ungewissheiten rückwirken.

Grundlegende Ansätze werden im Folgenden beschrieben.

## Forschung, Entwicklung, Untersuchung, Interpretation und Klärung

Im Safety Case besteht Ungewissheit, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, die Möglichkeit eines Schadens im Bewertungszeitraum zu einzuschätzen (vgl. «Ungewissheit und Unsicherheit»). Der weitere Umgang mit Ungewissheiten setzt daher in erster Linie beim Gewinnen und Klären von Informationen an.

### 1. Gewinnen weiterer Informationen

Der Safety Case stellt eine wichtige Grundlage für ein priorisierte Programm dar, das Untersuchungen, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten umfasst. In Schweden und der Schweiz beispielsweise sind die Vorhabenträgerinnen Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) und Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) verpflichtet, ihr Forschungs- und Entwicklungsprogramm periodisch zu aktualisieren und der Aufsichtsbehörde Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) bzw. dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) zur Prüfung zu unterbreiten. Aufsichtsbehörden verfügen vielfach über eigene Forschungsprogramme, die mit der Forschung der Vorhabenträger koordiniert sind.

Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm kann sich ggf. an einer Strategie zum künftigen Umgang mit Ungewissheiten (IAEA 2012, S. 61; Vigfusson et al. 2007, S. 10) ausrichten und offene Fragen klären, die sich im Zusammenhang mit einem Arbeitsprogramm zur Verminderung von Ungewissheiten (NEA 2004, S. 17) stellen.

Ungewissheiten, die den Betrieb eines Endlagers betreffen, lassen sich nicht nur durch Forschung und Entwicklung, sondern auch durch einen Probetrieb vermindern. Beispiele sind der vorgesehene Probetrieb des Endlagers vor Einlagerung radioaktiver Abfälle (§16 EndSiAnfV 2020) in Deutschland oder der Testbetrieb zur Erprobung sicherheitsrelevanter Techniken (Art. 65 KEV 2019) in der Schweiz. Da dem Probetrieb große Bedeutung für die Sicherheit eines Endlagers zukommt, ist er typischerweise im Recht verankert, in Deutschland und der Schweiz jeweils auf Verordnungsstufe.

Ungewissheiten werden zudem dadurch vermindert, dass Entscheidungen zum weiteren Fortschreiten auf dem Entsorgungspfad getroffen werden, zum Beispiel zum Wirtsgestein, zum Standort für ein Endlager oder zur Auslegung des Endlagers. Was entschieden werden muss, wann wichtige Entscheidungen zu treffen sind und wer die Entscheidungen zu treffen hat, ist im Recht, in behördlichen Leitlinien und im Entsorgungsprogramm festgelegt.

### 2. Interpretation und Klärung von Information

Ungewissheiten lassen sich auch vermindern, indem Informationen geklärt werden, die uneindeutig sind. Im Safety Case liegen interpretative Ambiguitäten vor, wenn eine Infor-

mation auf verschiedene Arten und Weisen gedeutet werden kann. Bei normativen Ambiguitäten bestehen unterschiedliche Ansichten dazu, was als akzeptabel zu betrachten ist und was nicht (vgl. «Normative Ungewissheiten»).

Regelungen, vor allem internationale Empfehlungen und rechtliche Regelungen, sind im Allgemeinen so formuliert, dass bei ihrer Umsetzung Ermessensspielraum besteht. Flexible, lernende Verfahren profitieren von diesem Ermessensspielraum. In Deutschland aber auch in vielen anderen Ländern, die ein Endlager planen oder realisieren, ist die Notwendigkeit flexibler, lernender Verfahren heute anerkannt. Daher enthalten auch Regelungen, die den Safety Case betreffen, gewisse interpretative oder normative Ambiguitäten. Welche Entwicklungen gemäss Endlagersicherheitsanforderungenverordnung als zu erwartend, abweichend oder hypothetisch zu betrachten sind (§3 EndlSiAnfV 2020), ist beispielsweise noch zu klären.

Erkenntnisse aus der Entwicklung von Safety Cases können einen Beitrag zur Interpretation internationaler Empfehlungen und nationaler rechtlicher und behördlicher Vorgaben leisten.

## Vermindern von Ursachen und Wirkungen von Ungewissheiten

### 3. Wahl eines gut charakterisierbaren, robusten Standorts

Ungewissheiten lassen sich durch die Wahl eines geeigneten Standorts für ein Endlager vermindern. Die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV 2020) fordert, bei der Analyse des Endlagersystems auch dessen räumliche Charakterisierbarkeit zu berücksichtigen und die langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse (§7 EndlSiUntV 2020). Bei der Langzeitsicherheitsanalyse und der umfassenden Bewertung des Endlagersystems spielt die Robustheit, darunter auch die Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine wesentliche Rolle (§9 und 10 EndlSiUntV 2020).

Der schweizerische Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2011) enthält Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit, die bei der Standortauswahl zum Tragen kommen. Einige dieser Kriterien sind direkt darauf ausgerichtet, Ungewissheiten zu vermeiden. So werden zum Beispiel homogene Wirtsgesteine günstig bewertet und Gesteine, zu denen bereits Kenntnisse und Erfahrungen vorliegen. Einfache Lagerungsverhältnisse und eine einfache Geometrie des Wirtsgesteins werden ebenso positiv beurteilt wie eine zuverlässige Prognostizierbarkeit sicherheitsrelevanter Eigenschaften des Wirtsgesteins.

### 4. Einfache, bewährte und robuste Auslegung des Endlagersystems

Einige Ungewissheiten lassen sich durch geeignete Auslegung des Endlagersystems vermeiden bzw. vermindern. Der Safety Case kann aufzeigen, wo Ansatzpunkte zum Vermeiden und Vermindern von Ungewissheiten bestehen.

Grundsätzlich werden Ungewissheiten dadurch geringgehalten, dass das Endlagersystem mit einfachen technischen Konzepten möglichst gut verständlich gestaltet wird und gut bekannte Techniken und Materialien zum Einsatz kommen. Beispiele für Anpassungen, die Ungewissheiten verringern, sind die Verwendung etablierter Materialien (IAEA 2012,



S. 68), etwa von Stahl statt neuartiger Keramiken für Endlagerbehälter (KNS 2018), und generell die Verwendung der besten bekannten Technik («best available technique») (NEA 2012, S. 107).

Die vielfach geforderte robuste Gestaltung des Endlagersystems (IAEA 2012, S. 74, EndlSiAnfV 2020) kann durch Überbemessung von Sicherheitsbarrieren (IAEA 2012, S. 68), Sicherheitsreserven bei der Herstellung und Errichtung von Barrieren (§5 EndlSiAnfV 2020) oder die Wahl von Barrieren mit sehr günstigen Eigenschaften (NEA 2004, S.10) unterstützt werden. Ein konkreterer Vorschlag lautet beispielsweise, den Abstand zwischen den Endlagerbehältern im Endlager zu vergrößern, um Ungewissheiten zum Verhalten des Versatzmaterials Bentonit unter höheren Temperaturen zu vermeiden (NEA 2004, S. 78).

## Akzeptieren von Ungewissheiten

### 5. Begründete Beurteilung

Generell werden Ungewissheiten im Safety Case als akzeptabel beurteilt, wenn sie als nicht-sicherheitsrelevant beurteilt werden. Als akzeptabel werden auch inhärente, nicht reduzierbare Ungewissheiten eingestuft, denen das Sicherheitskonzept entgegenwirkt. Dazu zählen menschliche Aktivitäten in ferner Zukunft, die durch die Tiefenlage des Endlagers und die mehrfachen Sicherheitsbarrieren abgefragt werden sollen.

Die Sicherheitsrelevanz von Ungewissheiten wird im Safety Case untersucht und beurteilt (vgl. «Beurteilen von Ungewissheiten»). Die entsprechenden Untersuchungen und die darauf basierende Beurteilung müssen im Safety Case transparent und nachvollziehbar dokumentiert sein. Beispiele für nicht-sicherheitsrelevante Ungewissheiten sind «unwesentliche Ungewissheiten» (IAEA 2012, S. 18) und Ungewissheiten, die sich in Sensitivitäts- bzw. Unsicherheitsanalysen als nicht sicherheitsrelevant erwiesen haben (IAEA 2012, S. 60). Nicht sicherheitsrelevant sind zum Beispiel Ungewissheiten zur Aufnahme von Radionukliden durch aquatische Organismen mit in Wasser gelösten Gasen, weil Radionuklide von aquatischen Organismen weit überwiegend direkt aus dem Wasser aufgenommen werden (Posiva 2012, S. 412).

Eine Ungewissheit kann auch dann als akzeptabel, weil nicht-sicherheitsrelevant, beurteilt werden, wenn nachgewiesen wurde, dass die Relevanz der Komponente, auf die sich die Ungewissheit bezieht, für die Sicherheit des Endlagersystems gering ist. Ein Beispiel stellen Ungewissheiten zum Deckgebirge dar, das nicht als «wesentliche Barriere» eingestuft wird (GRS 2013, S. 244; §4 EndlSiAnfV 2020).

Ungewissheiten werden als inhärent betrachtet, wenn gegenwärtig keine überzeugenden Methoden zur Verfügung stehen, um sie zu vermeiden oder zu vermindern. Beispiele sind Ungewissheiten zur detaillierten Beschaffenheit des Wirtsgesteins (IAEA 2012, S. 41) und zu künftigem menschlichem Verhalten (Vigfusson 2007, S. 14). Auch wenn dem Safety Case die Annahme zugrunde gelegt wird, dass sich die Beschaffenheit der Biosphäre am Lagerstandort über den Bewertungszeitraum nicht verändert (SSM 2008, S. 3) oder bei der Abschätzung der effektiven Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung die Lebensbedingungen zum Zeitpunkt der Antragstellung für den gesamten Bewertungszeitraum zu unterstellen sind (§7 EndlSiAnfV), wird damit auf eine als inhärent betrachtete Ungewissheit reagiert.

## 6. Einschränkungen bei Sicherheitsanforderungen

Im Verlauf der Entwicklung des Safety Case wurden neue Möglichkeiten, die Sicherheit zu belegen, entwickelt aber auch Grenzen früherer Ansprüche und Erwartungen deutlich.

Daher werden inzwischen manche Aussagen zur Einhaltung von Sicherheitsanforderungen abgeschwächt. Beispiele sind Relativierungen der Anwendung der Dosisgrenzwerte für die ferne Zukunft (STUK 2018, S. 8; IAEA 2011, S. 14; Vigfusson et al. 2007, S. 41), die Verwendung des Begriffs «Dosisabschätzung» (§7 EndlSiAnfV 2020) statt «Dosisberechnung» (ENSI 2020, S. 15), die Anmerkung, dass die Aussagekraft von Berechnungen zur Einhaltung der Dosisgrenzwerte angesichts der Verwendung von stilisierten Modellannahmen eingeschränkt ist (NEA 2004, S. 16) sowie die Empfehlung, ein gutes Verständnis der Sicherheitsfunktionen zu belegen, statt eine Prognose der künftigen Entwicklung des Endlagersystems vorzunehmen (Vigfusson et al. 2007, S. 25).

Dieser Ansatz steht im Einklang mit der Entwicklung vom «Sicherheitsnachweis», bei dem die künftige Entwicklung des Endlagersystems modelliert werden sollte, zum Safety Case, in dem das vielgestaltige und vielschichtige Konzept Sicherheit auf verschiedene Art und Weise belegt wird. Der unrealistische Anspruch, Sicherheit über den gesamten Bewertungszeitraum nachweisen zu können, wurde damit aufgegeben.

## 7. Treffen von Annahmen und Prämissen

Manche Ungewissheiten können von der Untersuchung im Safety Case ausgeschlossen werden, indem entsprechende Annahmen getroffen oder Prämissen gesetzt werden. Dies ist häufig dann der Fall, wenn gute Gründe dafürsprechen, die Ungewissheiten erst auf einem späteren Abschnitt des Entsorgungspfads näher zu untersuchen. Das trifft beispielsweise auf die Ungewissheiten zu, die sich mit der rechtlich verankerten dauerhaften Markierung eines Endlagers in der Schweiz verbinden. Ein Konzept für die dauerhafte Markierung muss erst mit dem Baubewilligungsgesuch vorgelegt und entsprechend auch erst mit dem Safety Case, der der Baubewilligung zugrundeliegt, von der Aufsichtsbehörde begutachtet werden (ENSI 2020, S. 7) – unter anderem im Hinblick auf den Umgang mit Ungewissheiten. In einem Entsorgungsprogramm (Nagra 2016; BMU 2015) wird der weitere Verlauf des Entsorgungspfads festgelegt. International ist in vielen Regelungen festgehalten, dass Annahmen und Prämissen im Safety Case ausgewiesen, begründet und ihre Auswirkungen auf die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen dargelegt werden müssen (§11 EndlSiUntV 2020; STUK 2018, S. 37; SSM 2008, S. 3).

Andere Ungewissheiten müssen nur in beschränktem Umfang in den Safety Case einbezogen werden. Dieses Vorgehen lässt sich unter anderem mit der Inhärenz von Ungewissheiten begründen (vgl. oben «Akzeptieren von Ungewissheiten») und ermöglicht, auch dort an Belegen der Sicherheit zu arbeiten, wo das Ausmaß der Ungewissheiten groß ist. Beispiele sind die Verwendung stilisierter Modellannahmen zu menschlichen Aktivitäten und klimatischen Entwicklungen (STUK 2018, S. 9f; SSM 2008, S. 8; NEA 2004, S. 16), das Verwenden von Randbedingungen, wo das tatsächliche Ausmaß der Ungewissheiten nicht bekannt ist (NEA 2012, S. 20f) oder das Treffen von Vereinfachungen für Modellierungen

zum Endlagersystem (Vigfusson et al. 2007, S. 26). Gemäss EndlSiAnfV müssen Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten nur insoweit beschrieben werden, wie «deren Berücksichtigung der weiteren Optimierung des Endlagersystems oder der Überprüfung der Robustheit des Endlagersystems dienen kann» (§3 EndlSiAnfV 2020).

## Verbessern des Umgangs mit Ungewissheiten

### 8. Human Factor-Maßnahmen

Durch Maßnahmen, die im Bereich von Mensch und Organisation angesiedelt sind, soll gewährleistet werden, dass Ungewissheiten möglichst vollständig identifiziert werden und mit ihnen im Safety Case sicherheitsgerichtet umgegangen wird.

Beispiele sind die Institutionalisierung einer unabhängigen Zweitmeinung zur Sicherheitsaufsicht (Art. 71 KEG 2018), die Durchführung von Peer Reviews zu Safety Cases (NEA 2012; Vigfusson et al. 2007, S. 27f; NEA 2004) oder Qualitätssicherung (EndlSiAnfV 2020; Vigfusson et al. 2007, S. 27f).

### 9. Grundlegende Prozessvorgaben

Lernendes Verfahren, Reversibilität und Rückholbarkeit sind Ansätze, um die Auswirkungen von Ungewissheiten bei Bedarf durch Korrekturen am Entsorgungspfad begrenzen zu können.

Beispiele sind der Grundsatz der Reversibilität bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle, der ein schrittweises Vorgehen impliziert (Assemblée Nationale 2018, S. 8f) sowie die Rückholbarkeit und Bergung eingelagerter Endlagergebäude (§13 und 14 EndlSiAnfV 2020). In der Schweiz wurde eine Beobachtungsphase für geologische Tiefenlager festgelegt, das heißt ein längerer Zeitraum, in dem ein Lager überwacht wird und die Abfälle ohne großen Aufwand rückgeholt werden können (Art. 3 KEG 2018).

Lernendes Verfahren, Reversibilität und Rückholbarkeit stellen einen grundlegenden und aufwändigen Schutz vor den Auswirkungen von Ungewissheiten dar und sind daher typischerweise im Recht verankert (StandAG 2017; KEG 2018). Wie lernende Verfahren, Reversibilität und Rückholbarkeit ausgestaltet und gelebt werden sollen, wird typischerweise auf der Ebene behördlicher Vorgaben und der Managementsysteme von Vorhabenträger und Aufsichtsbehörde konkretisiert.

Assemblée Nationale 2018 : Compte rendu. Commission d'enquête sur la sûreté et la sécurité des installations nucléaires – Audition de M. Leny Patinaux, auteur d'une thèse sur Cigéo 2.

BFE – Bundesamt für Energie 2011: Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. 2. April 2008 (Revision vom 30. November 2011). Bern.

- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit 2015: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). Bonn.
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- EndlSiUntV – Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung 2020: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vom 6. Oktober 2020. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.
- ENSI – Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat 2020: Geologische Tiefenlager. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen. Richtlinie ENSI-G03/d. Ausgabe Dezember 2020. Brugg.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2013: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Fischer-Appelt, K.; Baltens, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Mönig, J. GRS-290.
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific Safety Guide No. SSG-23. Wien.
- IAEA 2011: Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien.
- KEG – Kernenergiegesetz 2018: Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 (Stand am 1. Januar 2018). SR 732.1
- KEV – Kernenergieverordnung 2019: Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (Stand am 1. Februar 2019). SR 732.11
- KNS – Kommission für nukleare Sicherheit 2018: Stellungnahme des ENSI zum Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Stellungnahme der KNS. KNS-02858. Brugg.
- Nagra – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle 2016: Entsorgungsprogramm 2016 der Entsorgungspflichtigen. Technischer Bericht 16-01. Wettlingen.
- NEA – Nuclear Energy Agency 2012: The post-closure radiological safety case for a spent fuel repository in Sweden. An international peer review of the SKB license-application study of March 2011 (Final report). NEA/RWM/PEER (2012) 2. Paris.
- NEA 2004: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. NEA No. 5569. Paris.
- Posiva 2012: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto - Features, events and processes 2012. POSIVA 2012-07. Eurajoki.

SSM – Strålsäkerhetsmyndigheten 2008: The Swedish radiation safety authority's regulations and general advice concerning the protection of human health and the environment in connection with the final management of spent nuclear fuel and nuclear waste. SSMFS 2008:37. Stockholm.

Stand AG Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr.26, S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808).

STUK – Säteilyturvakeskus 2018: Disposal of nuclear waste. Guide YVL D.5. 13.2.2018. Helsinki. <https://www.stuklex.fi/en/ohje/YVLD-5>. Abgerufen am 25.7.2020.

Vigfusson, J. et al. 2007: European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management. Vigfusson, J; Maudoux, J.; Raimbault, Ph.; Röhlig, K.J.; Smith, R.E.

# 18. Verifikation und Objektivierung des Umgangs mit Ungewissheiten

*Objektivierung bezeichnet das Bestreben, weitgehende Unabhängigkeit einer Information von Personen, Organisationen und gesellschaftlichen Bedingungen, Fachdisziplinen, Verfahren und Instrumenten zu erreichen – und damit die Erkenntnis der Realität zu verbessern. Mit der Verifikation wird belegt, dass eine Information wahr ist, also der Realität entspricht.*

*Zur Verifikation und Objektivierung eignen sich Ansätze, die im Safety Case umgesetzt werden oder die Rahmenbedingungen betreffen, unter denen der Safety Case durchgeführt wird. Die Verifikation stösst allerdings an Grenzen, weil im Safety Case nicht nur Realität erkannt, sondern vor allem künftige Realitäten konstruiert werden. Diese Konstruktionen der Realität können auf Plausibilität geprüft, ihre Wahrheit aber nicht belegt werden.*

Im Safety Case wird Realität erkannt (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Erkenntnis von Realität»), vor allem aber zukünftige Realität konstruiert (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität»). Der Bewertungszeitraum, den der Safety Case abdecken soll, beträgt in Deutschland und in der Schweiz eine Million Jahre.

Auf dem Entsorgungspfad wird der Safety Case über mehrere Jahrzehnte hinweg weiterentwickelt und als Entscheidungsgrundlage aktualisiert. Beteiligte, Betroffene und Interessierte müssen daher bereits zu Beginn eines Entsorgungspfads ein hohes Maß an informiertem Vertrauen darin entwickeln können, dass der Safety Case die künftige Realität angemessen abbildet.

Dies geschieht durch verschiedene Ansätze, die darauf abzielen, den Safety Case zu verifizieren und zu objektivieren. Objektivierung bezeichnet das Bestreben, weitgehende Unabhängigkeit einer Information von Personen, Organisationen und gesellschaftlichen Bedingungen, Fachdisziplinen, Verfahren und Instrumenten zu erreichen – und damit die Erkenntnis der Realität zu verbessern. Mit der Verifikation wird belegt, dass eine Information wahr ist, also der Realität entspricht.

## Ansätze zur Verifikation und Objektivierung

Eine Grundbedingung für die Verifikation und Objektivierung des Umgangs mit Ungewissheiten ist, Informationen über Ungewissheiten transparent und nachvollziehbar zu gestalten, also insbesondere gut zu dokumentieren und diese Dokumentation allen Interessierten zugänglich zu machen. Dazu gehört auch, einen Prozessbericht zu führen, in dem der aktuelle Wissensstand und die verbleibenden Ungewissheiten festgehalten sind.

Ansätze, um einen realitätsnahen und objektiven Umgang mit Ungewissheiten im Rahmen des Safety Case zu gewährleisten, sind (vgl. zum Beispiel NEA 2019; IAEA 2012, S. 18; PAMINA 2011; NEA 2009; Vigfussion et al. 2007; NEA 2004):

- Regulierung: Empfehlungen international, nationales Recht
- Standardisierung: Verwendung (international) vereinheitlichter Informationen und Prozesse, zum Beispiel von Katalogen der Merkmale, Ereignisse und Abläufe (features, events and processes, FEPs) zur Identifikation von Ungewissheiten
- Strukturiertes Vorgehen: Systematisches Ausloten der Sicherheitsrelevanz von Ungewissheiten, beispielsweise durch strukturierte Parametervariationen oder «What if»-Fälle; Einschätzung von Ungewissheiten, die sich nicht empirisch oder mathematisch einschätzen lassen, in strukturierten Verfahren, die auf Expertenmeinungen basieren
- Diversität: Verwendung unterschiedlicher Ansätze der Beweisführung; Verwendung unterschiedlich konzipierter Modelle, um das Verhalten des Endlagersystems abzubilden; Verbindung von deterministischen und probabilistischen Ansätzen der Risikoanalyse im Safety Case

## Gestaltung der Rahmenbedingungen für den Safety Case

Wesentlich für den realitätsnahen und objektiven Umgang mit Ungewissheiten sind zudem die Rahmenbedingungen, unter denen der Safety Case erstellt wird. International haben sich hier ebenfalls verschiedene Ansätze etabliert:

- Vorhabenträger: Bereitstellung ausreichender personeller und finanzieller Ressourcen für die Erstellung des Safety Case, Festlegung geeigneter Prozesse im (integrierten) Management-System, Pflege einer guten Sicherheitskultur, Einholen von Unterstützung oder Peer Reviews durch externe Spezialistinnen und Spezialisten
- Aufsichtsbehörde(n): Konkretisierung der rechtlichen Vorgaben für den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case, beispielweise in Leitlinien, Bereitstellung ausreichender personeller und finanzieller Ressourcen für die Prüfung des Umgangs mit Ungewissheiten im Safety Case, Festlegung geeigneter Prozesse im (integrierten) Management-System, Pflege einer guten Sicherheits- und Aufsichtskultur, Einholen von Unterstützung oder Peer Reviews durch externe Spezialistinnen und Spezialisten
- Legislative und Exekutive: Festlegung grundlegender Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten im Recht, Schaffung geeigneter Rahmenbedingungen, zum Beispiel in Form von Ressourcen für die Aufsicht, Etablierung einer guten Governance, Einholen unabhängiger Drittmeinungen (Erstmeinung: Vorhabenträger; Zweitmeinung: Aufsichtsbehörde(n)), zum Beispiel von beratenden Kommissionen
- Zwischenstaatliche Organisationen: Entwicklung international abgestimmter Empfehlungen zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case, Bereitstellen von Plattformen für den internationalen Erfahrungsaustausch zu Ungewissheiten im Safety Case, Durchführung von Projekten zu Ungewissheiten im Safety Case
- Nichtregierungsorganisationen: Prüfung und ggf. Stellungnahmen zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case

## Empirische Überprüfung prospektiver Informationen

Prospektive Informationen sind nicht empirisch prüfbar. Im Safety Case lassen sich eine Vielzahl von prospektiven Aussagen aber immerhin empirisch unterlegen, zum Beispiel indem experimentelle Ergebnisse in die Zukunft extrapoliert werden (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität»).

Die langen Zeiträume, über die ein Endlager Sicherheit für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gewährleisten muss, eröffnen die Chance, Konstruktionen zukünftiger Entwicklungen im Safety Case rückwirkend zu überprüfen. Besondere Aufmerksamkeit hat dabei in den letzten Jahren das rückholungsbezogene Monitoring des Endlagers erlangt. Während des Betriebs des Endlagers und ggf. darüber hinaus soll verfolgt werden, wie sich das Endlagersystem entwickelt und ob diese Entwicklung den im Safety Case formulierten Erwartungen folgt. Wird der Safety Case im Monitoring bestätigt, wird dieser Befund voraussichtlich das Vertrauen in die Sicherheit des Endlagers stärken und damit die Entscheidung zum Verschluss des Endlagers unterstützen. Ergeben sich Widersprüche zu den gemäß Safety Case zu erwartenden Entwicklungen, muss das weitere Vorgehen neu evaluiert werden.

Da die Betriebsdauer des Endlagers im Vergleich zum gesamten Nachweiszeitraum sehr kurz ist, wird allgemein erwartet, dass das rückholungsbezogene Monitoring keinen wesentlichen Beitrag zur Verifikation des Safety Case leisten können. Über die Möglichkeiten, die Konstruktion künftiger Entwicklungen des Endlagersystems im Safety Case in einigen Jahrzehnten oder Jahrhunderten rückwirkend zu überprüfen, lassen sich heute noch keine Aussagen machen.

IAEA – International Atomic Energy Agency 2012: The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste. Specific Safety Guide No. SSG-23. Wien.

NEA – Nuclear Energy Agency 2019: International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste. Version 3.0. Paris.

NEA 2009: International experiences in safety cases for geological repositories (IN-TESS). Outcomes of the INTESC project. NEA No. 6251. Paris.

NEA 2004: Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz. Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. NEA No. 5569. Paris.

PAMINA – Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case 2011: Project summary report. Deliverable D5.1.

Vigfusson, J; Maudoux, J.; Raimbault, Ph.; Röhlig, K.J.; Smith, R.E. 2007: European pilot study on the regulatory review of the Safety Case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management.



# Folgerungen

## Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case

Zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case existieren vielfältige Erfahrungen und Empfehlungen, die in der internationalen Fachliteratur und in Safety Case-Berichten dokumentiert sind. Die folgende Tabelle vermittelt einen Überblick über Erkenntnisse zur Regulierung und zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case aus der Literaturstudie.

Themenfeld	Gute Praxis und Empfehlungen
Rechtliche Regelungen	<ul style="list-style-type: none"><li>• Festlegung von Endlagersicherheitsanforderungen, deren Einhaltung im Safety Case dargelegt wird, und<ul style="list-style-type: none"><li>• die Menschen und Umwelt gegen größere als die derzeit bekannten Risiken schützen (als Vorsorge gegenüber Ungewissheiten)</li><li>• bei denen sich die Beurteilung der Sicherheit nicht nur auf wenige Sicherheitsindikatoren abstützt (so dass Ungewissheiten auf unterschiedliche Art und Weise in die Beurteilung einbezogen werden können und die Beurteilung dem vielgestaltigen und vielschichtigen Konzept Sicherheit gerecht wird)</li><li>• die fordern, bei der Prüfung der Einhaltung von Grenzwerten auch die Ungewissheiten differenziert zu berücksichtigen</li><li>• die grundsätzliche Angaben dazu enthalten, welche Ungewissheiten im Bewertungszeitraum als akzeptabel beurteilt werden</li></ul></li><li>• Differenzierung des Geltungsanspruchs von Elementen der Endlagersicherheitsanforderungen über den Bewertungszeitraum angesichts von mit der Zeit zunehmenden Ungewissheiten</li><li>• Festlegung von Anforderungen an den Probetrieb eines Endlagersystems (mit dem Ungewissheiten vermindert werden)</li><li>• Festhalten zentraler Entscheidungen, die auf dem Entsorgungspfad getroffen werden müssen (als Grundlage für Anforderungen an den zeitlich gestaffelten Umgang mit Ungewissheiten auf Leitlinien-Ebene)</li><li>• Festlegung eines lernenden Verfahrens, von Monitoring, Reversibilität und Rückholbarkeit (als Vorkehrungen zum Umgang mit Ungewissheiten)</li><li>• Formulierung prozeduraler Regelungen (um einen transparenten Umgang mit Ungewissheiten zu fördern)<ul style="list-style-type: none"><li>• zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case</li><li>• zur Durchführung und Prüfung des Safety Case sowie ggf. zu seiner Nutzung als Entscheidungsgrundlage</li></ul></li><li>• Formulierung grundlegender Anforderungen an den sicherheitsgerichteten Umgang mit Ungewissheiten durch Human Factor-Maßnahmen (um einen Umgang mit Ungewissheiten zu fördern, der nicht durch psychologische Einflüsse verzerrt ist)</li><li>• Anforderung an den Vorhabenträger, periodisch ein priorisiertes Programm zu Untersuchungen, Forschung und Entwicklung vorzulegen, das darauf abzielt, Ungewissheiten zu vermindern (um die systematische Verminderung von Ungewissheiten</li></ul>

Themenfeld	Gute Praxis und Empfehlungen
	<p>durch Informationsgewinn zu gewährleisten) und Prüfung dieses Programms, zum Beispiel durch die zuständige Aufsichtsbehörde</p>
Leitlinien	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorgaben, wie Ungewissheiten zu berücksichtigen sind, wenn die Einhaltung der rechtlich festgelegten Endlagersicherheitsanforderungen geprüft wird <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ggf. Festlegung von Vertrauensintervallen für quantifizierbare Ungewissheiten, die bei der Beurteilung der Einhaltung von Grenzwerten einbezogen werden müssen</li> <li>• Anforderungen, die an die Beurteilung von Ungewissheiten als akzeptabel oder nicht-akzeptabel gestellt werden</li> <li>• Ggf. Festlegung von Ungewissheiten, die im Safety Case nur begrenzt untersucht werden müssen</li> <li>• Ggf. Ausweisen von Elementen des Endlagersystems, die als nicht sicherheitsrelevant beurteilt werden (und damit auch keine oder nur eine eingeschränkte Untersuchung von Ungewissheiten erfordern)</li> </ul> </li> <li>• Methodische Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case, zum Beispiel betreffend Konservativitäten und Sicherheitsaufschläge</li> <li>• Spezifizierung von Anforderungen an den Probetrieb eines Endlagers</li> <li>• Festlegung von Anforderungen an den Umgang mit Ungewissheiten bei zentralen Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad</li> <li>• Konkretisierung lernender Verfahren, von Reversibilität und Rückholbarkeit</li> <li>• Spezifische Anforderungen an den sicherheitsgerichteten Umgang mit Ungewissheiten durch Human Factor-Maßnahmen</li> <li>• Konkretisierung der Anforderungen an den Vorhabenträger, eine Strategie und ein Programm zur systematischen Identifizierung, Beschreibung und Beurteilung von Ungewissheiten vorzulegen</li> </ul>
Entsorgungsprogramm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plan zum schrittweisen Untersuchen, Beurteilen und Abbauen von Schlüsselungewissheiten mit Bezug zu zentralen Entscheidungen auf dem Entsorgungspfad</li> <li>• Informationen zum aktuellen Stand des priorisierten Programms zu Untersuchungen, Forschung und Entwicklung (siehe oben «Rechtliche Regelungen») und zur weiteren Planung dieses Programms</li> </ul>

### Genereller Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case

- Deklaration und Begründung von Prämissen, die dem Safety Case zugrundeliegen
- Deklaration und Begründung von Annahmen, die aufgrund von Ungewissheiten im Safety Case getroffen werden
- Iteratives Durchlaufen der Schritte 1. Identifizieren, 2. Beschreiben, 3. Beurteilen und 4. Festlegen des weiteren Umgangs mit den Ungewissheiten
- Führen eines zentralen informationstechnisch basierten Verzeichnisses der Ungewissheiten, das mindestens folgende Angaben enthält
  - eine Beschreibung der Ungewissheit einschließlich der Ergebnisse von Analysen der Ungewissheit, die dem Informationsstand zur Ungewissheit angepasst sind
  - den thematischen Kontext im Safety Case, in dem die Ungewissheit besteht, verbunden mit einer Verknüpfung zum relevanten Aspekt des Safety Case, zum Beispiel im FEP-Katalog, sowie zu entsprechender Fachliteratur
  - den Abschnitt, in dem die Ungewissheit im Bewertungszeitraum relevant ist
  - Darlegung der Grundlagen und Methoden, auf denen die Beschreibung der Ungewissheit beruht
  - die Verknüpfungen der Ungewissheit mit anderen Ungewissheiten
  - Angaben zur Beurteilung der Ungewissheit (siehe «Vierfelder-Schema zur Beurteilung von Ungewissheiten»):
    - die Einschätzung der Sicherheitsrelevanz des Aspekts, auf den sich die Ungewissheit bezieht
    - die Einschätzung der Tragweite der Ungewissheit
    - die Einschätzung der Aussagequalität zur Ungewissheit
    - die Einschätzung des Behebungspotenzials der Ungewissheit
  - Verantwortlichkeiten für die Einträge und Ansprechpartner zum Thema
  - Entscheidungen und Planung zum weiteren Umgang mit der Ungewissheit
- Führen eines (mit dem Verzeichnis der Ungewissheiten verbundenen) Prozessberichts, in dem der Umgang mit Ungewissheiten dokumentiert ist, einschließlich der für Entscheidungen jeweils verantwortlichen Personen
- Interdisziplinäre Bearbeitung der Ungewissheiten im Safety Case
- Pflege einer guten Sicherheitskultur und Just Culture bei Vorhabenträger und Aufsichtsbehörde
- Festlegung geeigneter Prozesse im Managementsystem von Vorhabenträger und Aufsichtsbehörde, interne und externe Audits
- Peer Reviews
- Beratung und Reviews durch Spezialisten, die sich ausserhalb der Fachgemeinschaft der Safety Case-Spezialisten bewegen

### Identifikation von Ungewissheiten im Safety Case

- Systematisches und strukturiertes Erfassen bekannter Unbekannter, unter anderem auf der Grundlage der Beschreibung des Endlagersystems und eines FEP-Katalogs

Themenfeld	Gute Praxis und Empfehlungen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vermeiden unbekannter Bekannter, insbesondere durch interdisziplinäres Arbeiten, Prozesse und Audits, externe Reviews, Pflege einer guten Sicherheitskultur und lernender Verfahren</li> <li>• Aufdecken unbekannter Unbekannter durch kontinuierliches Verfolgen des Stands von Wissenschaft und Technik sowie durch Forschung zur Endlagerung und zum Safety Case</li> <li>• Systematische Überprüfung bekannter Bekannter anhand neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse und neuer Erfahrungen</li> </ul>
Beschreibung von Ungewissheiten im Safety Case	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beschreibung der Ungewissheit in natürlicher und – soweit möglich – mathematischer Sprache</li> <li>• Darlegung der Grundlagen, auf denen die Beschreibung der Ungewissheit beruht</li> <li>• Beschreibung des Kenntnisstands zur Ungewissheit</li> <li>• Darlegung der Kontexte im Safety Case, auf die sich die Ungewissheit bezieht</li> <li>• Angabe, auf welchen Abschnitt des Bewertungszeitraums sich die Beschreibung der Ungewissheit bezieht</li> <li>• Systematische Erfassung von Verknüpfungen der Ungewissheit mit anderen Ungewissheiten, insbesondere auch von Verkettungen von Ungewissheiten</li> <li>• Analyse der Ungewissheit, insbesondere im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz, mit Verfahren, die an den aktuellen Informationsstand angepasst sind</li> <li>• Darstellung der Analyseergebnisse</li> </ul>
Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Begründete Beurteilung jeder Ungewissheit in Bezug auf <ul style="list-style-type: none"> <li>• die Einschätzung der Sicherheitsrelevanz des Aspekts, auf den sich die Ungewissheit bezieht</li> <li>• die Einschätzung der Tragweite der Ungewissheit</li> <li>• die Einschätzung der Aussagequalität zur Ungewissheit</li> <li>• die Einschätzung des Behebungspotenzials der Ungewissheit</li> </ul> </li> <li>• Spezifizieren, auf welchen Abschnitt des Bewertungszeitraums sich die Beurteilung bezieht</li> <li>• Entwicklung eines Ansatzes zur ganzheitlichen Beurteilung aller Ungewissheiten im Safety Case</li> <li>• Ermittlung von Schlüsselungewissheiten aufgrund einer Integration aller Analysen von Ungewissheiten im Safety Case</li> <li>• Priorisierung der Ungewissheiten im Hinblick auf weitere Untersuchungen, Forschung und Entwicklung mit Begründung</li> </ul>
Festlegung des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten im Safety Case	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewinnen und klären von Informationen</li> <li>• weiterführende Untersuchungen zu Fragen, die für den Safety Case relevant sind</li> <li>• Forschungs- und Entwicklungsprogramm</li> <li>• Probe- oder Testbetrieb zur Erprobung sicherheitsrelevanter Techniken</li> <li>• Entscheidungen zum weiteren Vorgehen auf dem Entsorgungspfad</li> </ul>

- Beiträge zur Interpretation internationaler Empfehlungen sowie nationaler rechtlicher und behördlicher Vorgaben
- Vermindern von Ursachen und Wirkungen von Ungewissheiten
  - Wahl eines gut charakterisierbaren, robusten Standorts
  - Einfache, bewährte und robuste Auslegung des Endlagersystems
- Akzeptieren von Ungewissheiten
  - Beurteilung von Ungewissheiten als nicht-sicherheitsrelevant
  - Akzeptieren von Ungewissheiten, die nicht reduzierbar sind
  - Einschränkungen bei Sicherheitsanforderungen
  - Setzen von Prämissen und Treffen von Annahmen, verbunden mit der Einschätzung von deren Relevanz und ggf. der Festlegung der Adressierung in späteren Schritten
  - Festlegen eines entsprechenden Untersuchungsumfangs im Safety Case
- Verbessern des Umgangs mit Ungewissheiten
  - Treffen von Human Factor-Maßnahmen
  - Prozessvorgaben wie lernendes Verfahren, Beobachtungsphase, Reversibilität und Rückholbarkeit

Abbildung Folgerungen-1: Gute Praxis und Empfehlungen zum Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case (eigene Darstellung), die Orientierung für künftige Safety Cases und deren regulatorische Rahmenbedingungen bieten.

# Vier-Felder-Schema zur Beurteilung von Ungewissheiten

## Ausgangslage

Ein wichtiges Ziel für die Weiterentwicklung des Safety Case ist es, Kriterien für eine transparente Beurteilung von Ungewissheiten und eine transparente Abwägung zwischen unterschiedlichen Ungewissheiten zu entwickeln (Grunwald 2010, S. 81; Vigfusson et al. 2007). Die Vorhabenträgerin muss in der Lage sein, Ungewissheiten zu beurteilen, während sie einen Safety Case entwickelt. Die Aufsicht muss eine Position dazu entwickeln, welche Ungewissheiten bei wesentlichen Entscheidungsschritten akzeptabel sind und welche nicht (Vigfusson et al. 2007).

Die Entwicklung von Kriterien zur Beurteilung von Ungewissheiten ist angesichts der Vielfalt der Ungewissheiten, mit denen im Safety Case umgegangen werden muss, anspruchsvoll. Manche Ungewissheiten sind nur ansatzweise in natürlicher Sprache skizzier- oder umreißbar, andere können in natürlicher Sprache ausführlich dargestellt werden oder lassen sich auch mathematisch beschreiben (vgl. «Beschreiben von Ungewissheiten»).

Bei den Ungewissheiten, die im Safety Case behandelt werden, handelt es sich um bekannte Unbekannte (vgl. «Bekannte und Unbekannte»). Während der Erstellung eines Safety Case muss aber auch immer die Möglichkeit unbekannter Bekannter im Auge behalten werden, also von Informationen, die eigentlich verfügbar wären, aber (noch) nicht zur Kenntnis genommen werden. Forschung zur Endlagerung und die Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik können zudem bisher unbekannte Unbekannte ans Licht bringen oder dazu führen, dass bekannte Bekannte, auf die sich der Safety Case bisher abgestützt hat, hinterfragt werden müssen.

In diesem weiten und sich ständig veränderten Feld der Ungewissheiten einen einheitlichen Ansatz zur Beurteilung von Ungewissheiten (vgl. «Beurteilen von Ungewissheiten») zu finden, ist anspruchsvoll.

Da der Safety Case darauf ausgerichtet ist, die Sicherheit eines Endlagersystems zu belegen, liegt nahe, dass die Sicherheitsrelevanz einer Ungewissheit bei der Beurteilung eine zentrale Rolle spielen muss. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei Sicherheit um ein vielgestaltiges und vielschichtiges Konzept handelt, das selbst nicht einfach zu beurteilen ist (vgl. «Sicherheit»). Als wesentlich für die Beurteilung von Ungewissheiten im Safety Case hat sich zudem erwiesen, inwieweit sich eine Ungewissheit vermeiden bzw. vermindern lässt oder deren Auswirkungen mit vernünftigem Aufwand begrenzt werden können. Die Arbeiten von Funtowicz, Ravetz und van der Sluijs zur Zuverlässigkeit von Aussagen über Ungewissheiten weisen auf die Bedeutung der Qualität von Aussagen zur Ungewissheit für deren Beurteilung hin (vgl. «Vorgehen bei der Beurteilung von Ungewissheiten»).

Einen ersten Ansatz, um eine systematische Beurteilung von Ungewissheiten vorzunehmen, stellt das Vier-Felder-Schema dar, das im Rahmen der vorliegenden Literaturstudie entwickelt wurde. Es kann als Arbeitsinstrument bei der Erstellung von Safety Cases genutzt aber auch zur Beurteilung von Ergebnissen eines Safety Case beigezogen werden.

## Beschreibung

Im Vier-Felder-Schema bezeichnet «Aspekt» einen für den Safety Case relevanten Umstand, zum Beispiel einen Zustand, ein Ereignis oder einen Prozess, der auf das Endlagersystem oder im Endlagersystem wirkt. Ungewissheit besteht, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um die Möglichkeit eines Schadens im Bewertungszeitraum einzuschätzen.

Im Zentrum stehen vier Fragen:

- **Sicherheitsrelevanz:** Betrifft die Ungewissheit einen Aspekt, der für die Sicherheit des Endlagersystems wichtig ist?

Betrifft er ein Element des Sicherheitskonzepts, die Sicherheitsfunktionen oder -barrieren? Trägt er indirekt wesentlich dazu bei, dass das Sicherheitskonzept seine Funktion erfüllt? Oder handelt es sich um einen bisher nicht oder wenig beachteten Aspekt, dessen Sicherheitsrelevanz nun in einem neuen Licht erscheint? ...


Einschätzung in Feld 1; markiert, falls ja

- **Tragweite:** Ist die Ungewissheit zum betrachteten Aspekt erheblich oder potenziell erheblich?

Ist die Ungewissheit so groß, dass sie die Einschätzung des Aspekts beeinträchtigt? Weckt die Ungewissheit Zweifel daran, ob der Aspekt richtig verstanden wurde? Ist die Ungewissheit so ausgeprägt, dass die Rolle des Aspekts im Safety Case ggf. überdacht werden muss? ...


Einschätzung in Feld 2; markiert, falls ja

- **Aussagenqualität:** Sind die Aussagen, die über die Tragweite der Ungewissheit gemacht werden können, gut fundiert?

Sind die Kenntnisse zur Ungewissheit und ihrer Sicherheitsrelevanz empirisch ausreichend belegt? Sind sie theoretisch überzeugend fundiert? Ist die Qualität der verwendeten Methoden hochwertig? ...


Einschätzung in Feld 3; markiert, falls ja

- **Behebungspotenzial:** Kann die Ungewissheit wirksam behoben werden? Lässt sich die Ungewissheit mit vernünftigem Aufwand vermeiden, vermindern oder lassen sich deren Auswirkungen mit vernünftigem Aufwand begrenzen? ...


Einschätzung in Feld 4; markiert, falls ja

## Anwendung

Angesichts der Vielfalt der Ungewissheiten und des vielgestaltigen und vielschichtigen Konzepts der Sicherheit sind die Antworten auf die zum Vier-Felder-Schema gestellten Fragen oft nicht ohne Weiteres naheliegend.

Daher wird empfohlen, die Beurteilung von Ungewissheiten diskursiv vorzunehmen (vgl. «Gewissheit und Ungewissheit: Konstruktion von Realität»). In der diskursiven Auseinandersetzung mit der Beurteilung werden Argumente geprüft und neue Argumente hervorgebracht, wodurch die Qualität der Beurteilung verbessert werden kann. Die Beurteilung wird gegenüber einem breiten Spektrum von Wissen und Erfahrungen und idealerweise auch Werthaltungen und Interessenlagen geöffnet. Letztlich kann damit das sowohl das Vertrauen der am Safety Case Beteiligten als auch der interessierten Öffentlichkeit in die Aussagen des Safety Case gestärkt werden.

Aus den möglichen «ja/nein» Antworten auf die vier gestellten Fragen lässt sich ein erstes Schema zur Beurteilung von Ungewissheiten ableiten, das auf den folgenden Seiten dargestellt ist. Die Erweiterung des Schemas auf differenziertere Antworten, wie «ja eindeutig, ja plausibel, Antwort unbekannt, nein plausibel oder eindeutig nein» ist möglich und in wird voraussichtlich auch in vielen Fällen angezeigt sein.

Die vorgeschlagenen Antworten beziehen sich auf die abschließende Beurteilung von Ungewissheiten in einem bestimmten Safety Case – also auf eine Situation, in der entschieden werden muss, ob die Sicherheit eines Endlagersystems mit diesem Safety Case ausreichend belegt werden konnte. Damit spiegeln sie im Wesentlichen die behördliche Perspektive wider.

Wird das Vier-Felder-Schema als Arbeitsinstrument während der Erstellung eines Safety Case benutzt, weisen vor allem weiße Felder bei Aussagenqualität und Behebungspotenzial darauf hin, dass weitere Abklärungen angezeigt sein können, um darauf hinzuarbeiten, dass die Ungewissheit besser beurteilt wird.



Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit muss vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen begrenzt werden.

Begründung: Sicherheitsrelevanz und Tragweite der Ungewissheit sind gut belegt, daher besteht Handlungsbedarf. Zudem ist es gut möglich, die Ungewissheit zu beheben.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit sollte vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen begrenzt werden, falls dies mit verhältnismäßigem Aufwand möglich ist.

Begründung: Da die Sicherheitsrelevanz gering ist, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Im Interesse der Vorsorge sollte jedoch geprüft werden, zur Verfügung stehende Maßnahmen umzusetzen, um die Tragweite der Ungewissheit zu begrenzen.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit sollte vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen begrenzt werden, falls dies mit verhältnismäßigem Aufwand möglich ist.

Begründung: Da die Tragweite gering ist, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Im Interesse der Vorsorge sollte jedoch geprüft werden, zur Verfügung stehende Maßnahmen umzusetzen, um die Tragweite der Ungewissheit noch weiter zu begrenzen.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Aussagenqualität muss rasch verbessert werden. Falls das nicht möglich ist, muss die Ungewissheit vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen begrenzt werden.

Begründung: Sicherheitsrelevanz und Tragweite begründen Handlungsbedarf – auch wenn die Aussagenqualität (noch) schlecht ist.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es muss sorgfältig nachgeprüft werden, ob eine Verminderung etc. tatsächlich nicht möglich ist.

Falls dies der Fall ist, besteht die Möglichkeit, die Ungewissheit zu akzeptieren.

Der gesamte Prozess von der Prüfung bis zum Akzeptieren der Ungewissheit erfordert ein hohes Maß an Transparenz und sollte idealerweise diskursiv erfolgen. Bei stark sicherheitsrelevanten Ungewissheiten ist eine politische Entscheidung erforderlich.

Begründung: Ob eine Ungewissheit, die sich potenziell stark auf die Sicherheit des Endlagers auswirkt, als akzeptabel betrachtet werden kann, ist eine normative Frage, die nicht von Spezialisten geklärt werden kann, sondern von der Gesellschaft (im soziologischen Sinn verstanden), die das Endlager plant und errichtet, beantwortet werden muss.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf

Begründung: Die geringe Tragweite der Ungewissheit ist gut belegt und das Behebungspotenzial gering.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit sollte vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen begrenzt werden, falls dies mit verhältnismäßigem Aufwand möglich ist.

Begründung: Da die Sicherheitsrelevanz gering ist, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Im Interesse der Vorsorge sollte jedoch geprüft werden, zur Verfügung stehende Maßnahmen umzusetzen, um die vermutlich große Tragweite der Ungewissheit zu begrenzen.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Aussagenqualität muss rasch verbessert und dann eine Entscheidung zum weiteren Vorgehen gefällt werden.

Begründung: Diese Ausgangslage stellt die Akzeptabilität des Endlagers in Frage, weil eine Ungewissheit besteht, die sowohl sicherheitsrelevant als auch von potenziell erheblicher Tragweite ist, aber nicht behoben werden kann. Falls die Ausgangslage nicht aufgelöst werden kann, ist ggf. eine politische Entscheidung zum weiteren Vorgehen erforderlich.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist gering und die geringe Tragweite gut belegt.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit muss vermieden, vermindert oder deren Auswirkungen müssen begrenzt werden

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist groß und aufgrund der geringen Aussagenqualität ist nicht klar, ob die Tragweite tatsächlich gering ist.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es muss sorgfältig nachgeprüft werden, ob eine Verminderung etc. nicht möglich ist. Falls dies tatsächlich der Fall ist, besteht kein Handlungsbedarf.

Begründung: Da die Sicherheitsrelevanz gering ist, besteht kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Allerdings ist die große Tragweite gut belegt. Vorsorgliche Maßnahmen sind nicht angezeigt – allerdings nur dann, wenn das geringe Behebungspotenzial gut bestätigt ist.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Die Ungewissheit muss besser untersucht und dann eine Entscheidung zum weiteren Vorgehen gefällt werden.

Begründung: Diese Ausgangslage stellt die Akzeptabilität des Endlagers in Frage, da die Tragweite einer sicherheitsrelevanten Ungewissheit aufgrund der geringen Aussagenqualität nicht bekannt ist. Falls die Ausgangslage nicht aufgelöst werden kann, ist ggf. eine politische Entscheidung erforderlich.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf.

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist gering und ob die Tragweite tatsächlich groß ist, steht aufgrund der geringen Aussagequalität in Frage.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf.

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist gering und die geringe Tragweite gut belegt.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf.

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist gering. Das trifft möglicherweise auch auf die Tragweite zu.

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

➤ Es besteht kein Handlungsbedarf.

Begründung: Die Sicherheitsrelevanz ist gering. Das trifft möglicherweise auch auf die Tragweite zu.

## Fallbeispiele

Die Anwendung des Schemas wird an drei Fallbeispielen skizziert:

- Ungewissheiten zur Korrosion der Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle in Schweden unter den Bedingungen, die im Endlager herrschen

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

Der Behälter stellt in Schweden eine wichtige Barriere im Endlager dar. Daher ist die Sicherheitsrelevanz groß. Die Tragweite der Ungewissheit ist es ebenfalls. Wenn die Kupferkorrosion tatsächlich schneller ablaufen sollte als bisher angenommen, hätte dies Auswirkungen auf die Sicherheit des gesamten Endlagersystems.

Die Aussagenqualität ist unter den Vertretern unterschiedlicher Positionen zu diesem Thema umstritten. Daher wird hier von einer geringen Aussagenqualität ausgegangen. Um die Aussagequalität zu verbessern, werden weitere Forschungsarbeiten und wissenschaftliche Reviews durchgeführt.

Behebungspotenzial ist vorhanden. Die Ungewissheit kann durch weitere Untersuchungen und Forschung vermindert oder ggf. zum Beispiel auch ein anderes Behältermaterial gewählt werden.

Das Vier-Felder-Schema legt nahe, zunächst die Aussagenqualität zu verbessern. Entsprechende Bestrebungen sind in Schweden im Gang. Falls die Aussagenqualität nicht verbessert werden und entschieden werden kann, ob die Tragweite tatsächlich groß ist, müssen Massnahmen getroffen werden, um die Ungewissheit zu vermindern, zum Beispiel die Wahl eines anderen Behältermaterials.

- Ungewissheiten zum radioaktiven Zerfall des Inventars in Finnland im Safety Case zur Baubewilligung des Endlagers Olkiluoto (vgl. Abbildung 14-2)

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

Der radioaktive Zerfall des Inventars führt dazu, dass sich die Radionuklidzusammensetzung der Abfälle laufend verändert. Die Radionuklidzusammensetzung bestimmt die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Abfälle und die Radiotoxizität, beeinflusst die Wärmeentwicklung und weitere Eigenschaften der Abfälle, darunter auch eine eventuelle Kritikalität. Die Sicherheitsrelevanz des radioaktiven Zerfalls ist daher groß. Aufgrund langjähriger Forschung und Erfahrungen im Bereich der Kerntechnik wird die Aussagenqualität gegenwärtig als gut eingeschätzt. Die verbleibenden Ungewissheiten sind von geringer Tragweite. Das Behebungspotenzial ist gering, da die Ungewissheiten bereits gut erforscht sind und das Abfallinventar – vor allem aus Gründen des Strahlenschutzes – nicht mehr aktiv verändert werden soll.

Im Vier-Felder-Schema wird kein Handlungsbedarf identifiziert. Im Bericht der Aufsichtsbehörde zum Safety Case der Vorhabenträgerin Posiva wird ebenfalls kein Handlungsbedarf ausgewiesen, der Ungewissheiten zum radioaktiven Zerfall betrifft (STUK 2015).

- Ungewissheiten zum menschlichen Eindringen in ein künftiges Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland, nachdem das Lager stillgelegt und verschlossen worden ist

Sicherheitsrelevanz	Tragweite
Aussagenqualität	Behebungspotenzial

Die Sicherheitsrelevanz des menschlichen Eindringens in ein verschlossenes Endlager ist potenziell groß, zumindest für Personen, die direkt in das Lager eindringen (vgl. «Human Intrusion: Menschliches Eindringen in ein Endlager»). Die Tragweite der Ungewissheiten ist erheblich, da über die technologischen Möglichkeiten von Menschen in der ferneren Zukunft sowie über die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen, unter denen das Eindringen erfolgt, nichts bekannt ist. Allerdings ist auch die Aussagequalität aufgrund inhärenter Ungewissheiten über die Zukunft gering. Die bisher diskutierten Ansätze, Menschen am Eindringen zu hindern, zum Beispiel durch eine Markierung des Endlagers, überzeugen noch nicht. Auch andere Bestrebungen, die Ungewissheit zu vermeiden oder zu vermindern, scheitern an der inhärent ungewissen Zukunft menschlicher Gemeinschaften.

Bei der Anwendung des Vier-Felder-Schemas wird empfohlen, in solchen Fällen eine politische Lösung zu suchen. Ob eine Ungewissheit, die sich potenziell stark auf die Sicherheit des Endlagers auswirkt, als akzeptabel betrachtet werden kann, ist eine normative Frage, die nicht von Spezialisten geklärt werden kann, sondern von der Gesellschaft, die das Endlager plant und errichtet, beantwortet werden muss.

In Deutschland ist in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV 2020) festgehalten, dass als Referenzentwicklungen für das menschliche Eindringen Entwicklungen betrachtet werden sollen, die durch derzeitige menschliche Aktivitäten ausgelöst werden und dass das unbeabsichtigte menschliche Eindringen nur zu berücksichtigen ist, um das Endlagersystem weiter zu optimieren oder seine Robustheit zu überprüfen.

## Ausblick

Das Vier-Felder-Schema ist ein erster Ansatz, um die Anwendung der im Arbeitspapier «Festlegen des weiteren Umgangs mit Ungewissheiten» beschriebenen Vorgehensweisen transparenter zu gestalten. Zusätzlich muss auch die zeitliche Dimension beachtet werden: Manche Ungewissheiten sind zu Beginn des Entsorgungspfads noch akzeptabel, später aber nicht.

Grundsätzlich ist es – auch im Sinn eines flexiblen, lernenden Verfahrens – legitim, die Verminderung von Ungewissheiten auf einen späteren Zeitpunkt zu verschieben, wenn

- bereits ein Verfahren läuft, mit dem die Ungewissheit systematisch vermindert wird, zum Beispiel ein Standortauswahlverfahren, in dessen Verlauf zunehmend detaillierte Informationen zu den geologischen Verhältnissen am Standort eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle gewonnen werden
- mit guten Gründen davon ausgegangen werden kann, dass die Ungewissheit zu einem späteren Zeitpunkt vermindert wird, ohne dass die Sicherheit des Endlagersystems darunter leidet. Das gilt zum Beispiel für Ungewissheiten zu Details der künftigen Einlagerungstechnik für die Endlagerbehälter.
- bereits Untersuchungen laufen, um mehr Informationen zur Ungewissheit zu gewinnen, zum Beispiel Forschungsarbeiten zum Korrosionsverhalten der Endlagerbehälter oder zur Kompaktion der Verfüllmaterialien für die Einlagerungsstrecken

Letztlich wird sich der sicherheitsgerichtete Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case aber nicht allein auf Kriterien stützen können – auch wenn diese Kriterien gut durchdacht und differenziert sind. Aufgrund von Human Factor-Einflüssen bei der Erstellung und Prüfung von Safety Cases und der Notwendigkeit, normative Entscheidungen zum Umgang mit Ungewissheiten zu treffen, ist ein lebendiger Diskurs zum Safety Case unumgänglich. Einfache Lösungen sind nicht immer zu erwarten. An Ungewissheiten muss weiter geforscht und zu Ungewissheiten diskutiert werden: «Wer die Welt zu einfach malt, vertraut den Menschen nicht» (NZZ 2020).

## Transdisziplinäre Forschungsthemen

Transdisziplinäre Forschung ist darauf ausgerichtet, ein gesellschaftliches Problem zu lösen (Hocke 2020). Die zunehmende Ausdifferenzierung von Forschungsdisziplinen und -feldern wird der Komplexität der realen Welt oft nicht gerecht (Krohn et al. 2017, S. 342). Transdisziplinäre Forschung setzt der zunehmenden Spezialisierung daher einen integrativen Ansatz entgegen. Nicht-Spezialisten und Praxisakteure werden in den problemorientierten Forschungsprozess eingebunden (Hocke 2020).

Gegenstand der transdisziplinären Forschung ist in erster Linie die Gestaltung konkreter Zukunftsoptionen. In die Forschung werden daher Akteure einbezogen, die daran interessiert sind, ein bestimmtes Problem zu lösen. Diese Problemlösung setzt ein schrittweises Vorgehen und Erproben voraus (Krohn et al. 2017, S. 343). Am Ende des transdisziplinären Forschungsprozesses steht ein «Unikat», aus dem sich nicht unbedingt verallgemeinerungsfähiges Wissen ableiten lässt (Krohn et al. 2017, S. 344). Transdisziplinäre Experimente sind nicht auf Wiederholbarkeit angelegt, sondern darauf, sie abzuwandeln und anzupassen. Trotzdem erlauben sie es, Wissen hervorzubringen, das in anderen Kontexten eingesetzt werden kann (Krohn et al. 2017, S. 345).

«Ungewissheiten im Safety Case» sind in verschiedener Hinsicht gesellschaftlich relevant. Beim Safety Case stehen jedoch zunächst grundlegendere Fragen im Vordergrund, die von transdisziplinärer Forschung profitieren können. So sind beispielsweise Aufmerksamkeit und Akzeptanz für den Safety Case bei Beteiligten, Betroffenen und Interessierten unterschiedlich ausgeprägt (Röhlig & Eckhardt 2017). Wie Aufmerksamkeit und Akzeptanz für den Safety Case, der wesentlich zum Gelingen des Projekts «Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle in Deutschland» beiträgt, verbessert werden können, stellt ein gesellschaftliches Problem dar, zu dessen Lösung transdisziplinäre Forschung einen wesentlichen Beitrag leisten kann.

Welche Rolle Ungewissheiten im Safety Case bei der Lösung dieses Problems spielen, muss dabei im gemeinsamen schrittweisen Vorgehen von Praxisakteuren, Spezialisten und Nicht-Spezialisten ausgelotet werden. Der vorliegende TRANSENS-Bericht wurde verfasst, während die transdisziplinären Experimente bei TRANSENS konzipiert und vorbereitet wurden. Er enthält daher noch keine Ergebnisse transdisziplinärer Forschung. Ob Ungewissheiten zum Gegenstand der transdisziplinären Experimente bei TRANSENS werden, darüber werden die Partner aus der interessierten Bevölkerung und Institutionen, die sich mit dem Safety Case befassen, wesentlich mitentscheiden. Sie können dazu beitragen, Wissen hervorzubringen, das den zukünftigen Umgang mit Ungewissheiten im Safety Case mitbestimmt.

EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020: Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45.

Grunwald, A. 2010: Ethische Anforderungen an nukleare Endlager. Der ethische Diskurs und seine Voraussetzungen. Dokumentation zum Endlagersymposium 2008. Karlsruhe.

- Hocke, P. 2020: Zum Stand der Transdisziplinarität in TRANSENS. Präsentation am DIPRO-Meeting im Rahmen des 24. REFORM Group Meetings in Raitenhaslach.
- Krohn, W., Grunwald, A., Ukowitz, M. 2017: Transdisciplinary Research Revisited. Epistemic Concern, Research Objects, Form of Knowledge, and Methodology. GAIA 26/4 (2017). S. 341– 347.
- NZZ – Neue Zürcher Zeitung: Sonderbeilage Journalismus. Zürich, 20.9.2020.
- Röhlig, K.J.; Eckhardt, A. 2017: Primat der Sicherheit. Ja, aber welche Sicherheit ist gemeint? GAIA 26/2 (2017): 103 –105.
- STUK – Säteilyturvakeskus 2015: Review of safety assessment in Posiva’s construction license application for a repository at Olkiluoto. Ed. Sagar, B. STUK-TR 19. Helsinki.
- Vigfusson, J., Maudoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.J., Smith, R.E. 2007: European pilot study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management