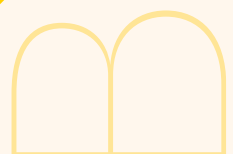
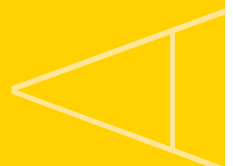




Langzeitsicherheitsbewertungen für Auswahlentscheidungen im deutschen Standortauswahlverfahren für hochradioaktive Abfälle

Abschlussbericht des Forschungsprojektes METIENS
FKZ 4722B10503

Martin Navarro
Gerd Frieling
Stephan Hotzel
Ingo Kock
Ute Maurer-Rurack
Torben Weyand



Langzeitsicherheitsbewertungen für Auswahlentscheidungen im deutschen Standortauswahlverfahren für hochradioaktive Abfälle

Dieser Bericht stellt ein Ergebnis wissenschaftlicher Forschung des BASE zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dar und entfaltet keine Bindungswirkung für das künftige Handeln des BASE, insbesondere nicht für Entscheidungen im Rahmen von Genehmigungs-, Aufsichts- oder Beteiligungsverfahren.

BASE-016/25

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2026031259256

Berlin, Dezember 2025

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

BASE – INHOUSE-FORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Manuskripterstellung und fachliche Verantwortung

Kapitel 3.1: Gerd Frieling, Ute Maurer-Rurack

Kapitel 3.2: Torben Weyand

Übriger Text: Martin Navarro

Peer Review und Lektorat

Stephan Hotzel, Ingo Kock, Martin Navarro, Torben Weyand

030 184321-0
www.base.bund.de

Stand: Dezember 2025

GZ: F 4 - BASE – BASE62140/01

Langzeitsicherheitsbewertungen für Auswahlentscheidungen im deutschen Standortauswahlverfahren für hochradioaktive Abfälle

Abschlussbericht des Forschungsprojektes METIENS

**Martin Navarro
Gerd Frieling
Stephan Hotzel
Ingo Kock
Ute Maurer-Rurack
Torben Weyand**

Dieser Bericht stellt ein Ergebnis wissenschaftlicher Forschung des BASE zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dar und entfaltet keine Bindungswirkung für das künftige Handeln des BASE, insbesondere nicht für Entscheidungen im Rahmen von Genehmigungs-, Aufsichts- oder Beteiligungsverfahren.

Zusammenfassung

Das deutsche Standortauswahlverfahren für hochradioaktive Abfälle sucht den Endlagerstandort mit der bestmöglichen Sicherheit. Dazu muss abgeschätzt werden, wie sicher die in Frage kommenden Standorte über eine Million Jahre sind. Diese Sicherheitsabschätzung erfolgt unter Ungewissheiten und ist deshalb ungenau. Kann sie so ungenau werden, dass nicht mehr zuverlässig bestimmt werden kann, welcher Standort sicherer ist? Das Forschungsprojekt METIENS des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) beschäftigte sich mit dieser Forschungsfrage theoretisch. Das Projekt identifizierte sicherheitsbezogene Argumente, die einen Ausschluss von Teilgebieten, Standortregionen oder Standorten rechtfertigen können. Anschließend analysierte es, wie die Langzeitsicherheit bewertet werden muss, um diese Argumente zu stützen. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass Sicherheitsvergleiche in bestimmten Situationen unzuverlässig werden und dann allenfalls Scheinerfolge erzielen können. Unterschiedliche Vergleichsmethoden besitzen spezifische Anwendungsgrenzen, die nicht immer offensichtlich sind. Es ist wichtig, diese Anwendungsgrenzen frühzeitig zu identifizieren, damit festgestellt werden kann, wann Sicherheitsvergleiche nicht mehr zielführend sind und alternative Entscheidungskriterien herangezogen werden sollten. Auf diese Weise kann unnötiger Verfahrensaufwand vermieden werden.

Abstract

The German site selection procedure for the final disposal of high-level radioactive waste aims at finding the repository site with the best possible safety. This requires estimating how safe the candidate sites will be over a period of one million years. Safety estimates of that kind are subject to uncertainty and therefore inaccurate. Can they become so inaccurate that it is no longer possible to tell which site is safer? This research question was addressed theoretically in the research project METIENS, which was conducted by the Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BASE). The project identified safety-related arguments that can justify the exclusion of sites. Subsequently, it analysed how long-term safety must be assessed in order to support these arguments. The findings suggest that safety comparisons may be unreliable under specific conditions, resulting in only nominal improvements to safety. Different methods of safety comparison each have distinct limits of applicability, which are not always obvious. Identifying these limits is crucial for determining when safety comparisons lose their effectiveness and alternative decision criteria should be applied. This may help to avoid unnecessary effort in the site selection procedure.

Zähl aus,
und wenn du mit der Entscheidung nicht zufrieden bist,
nimm das andere.

Hanna, 7 Jahre

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Einzelziele	10
3	Recherchen	12
3.1	Standortauswahlverfahren in anderen Ländern.....	12
3.1.1	<i>Methodik und Vorgehensweise</i>	12
3.1.2	<i>Ergebnisse</i>	13
3.1.3	<i>Fazit</i>	18
3.2	Ausgewählte regulatorische Entwicklungen.....	18
3.2.1	<i>Entwicklung des Standortauswahlgesetzes und der</i> <i>zugehörigen Rechtsverordnungen</i>	18
3.2.2	<i>Der Begriff der bestmöglichen Sicherheit</i>	21
3.2.3	<i>Gewichtung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien</i>	24
4	Eckpunkte des Entscheidungsproblems	28
4.1	Alternativen	28
4.2	Zielsystem	29
4.3	Ungewissheiten	30
5	Deutung des Ziels, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden	32
5.1	Zur Lesart der im StandAG aufgeführten Definition	32
5.2	Gewichtung der Langzeitsicherheit	35
5.3	Genehmigungsfähigkeit und zu erreichendes Schutzniveau	36
5.4	Weitere Bedeutungsebenen von „bestmögliche Sicherheit“	37
5.5	Grenzen des Maximierungsgebots	39
6	Sicherheitsbezogene Rechtfertigung von Standortausschlüssen	41
6.1	Einleitung.....	41
6.2	Grundzüge der Modellkonstruktion.....	43
6.3	Sicherheitsdimensionen	43
6.4	Ausschlussargumente.....	44
6.4.1	<i>Ausschluss wegen unzureichendem Schutzniveau</i>	45
6.4.2	<i>Ausschluss wegen fehlender Nachweisbarkeit eines</i> <i>ausreichenden Schutzniveaus</i>	46
6.4.3	<i>Ausschluss wegen geringerer Sicherheit</i>	47
6.4.4	<i>Ausschluss wegen Konzeptverstößen</i>	49
6.5	Operationale Definition des Schutzniveaus	50
6.6	Operationalisierende Postulate	51

6.7	Systemverständnis.....	52
6.8	Genauigkeit der operationalen Definition des Schutzniveaus	52
6.9	Genauigkeit sicherheitsbezogener Tests	53
6.10	Epistemische Wahrscheinlichkeit operationalisierender Prämissen.....	54
6.11	Praktische Schlussfolgerungen	55
7	Operationalisierungen	58
7.1	Formale und kompensatorische Aggregationen	58
7.2	Nichtquantifizierbare Evaluierungsfehler.....	63
7.3	Problemorientierte Indikatorklassifizierungen	65
7.3.1	<i>Globale und lokale Indikatoren</i>	66
7.3.2	<i>Dosis- und Funktionsindikatoren</i>	68
7.3.3	<i>Prognostische und nichtprognostische Indikatoren</i>	71
7.4	Indikatortypen	75
7.5	Analyse spezieller Indikatoren.....	76
7.5.1	<i>Robustheitsindikatoren</i>	76
7.5.2	<i>Sicherheitsreserven</i>	83
8	Schlussfolgerungen	87
8.1	Zielabwägung unter Ungewissheiten.....	88
8.2	Sicherheitsbezogene konzeptionelle Präferenzen	89
8.3	Antikonservativität von Ausschlusskriterien	90
8.4	Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen	91
8.4.1	<i>Grundannahmen</i>	92
8.4.2	<i>Hinreichende Bedingungen für eine Nichtvergleichbarkeit</i>	93
8.4.3	<i>Beschleunigungspotenziale</i>	95
8.4.4	<i>Kriterien und Indikatoren des Standortauswahlgesetzes</i>	96
8.5	Zum Standortauswahlgesetz.....	99
	Literaturverzeichnis	102
	Tabellenverzeichnis	111
A	Kurze Einführungen für Fachfremde	112
A. 1	Geologische Endlager für hochradioaktive Abfälle.....	112
A. 2	Langzeitsicherheitsanalytik.....	114

1 Einleitung

Im Jahr 2017 begann in Deutschland das durch das Standortauswahlgesetz (StandAG¹) geregelte Standortauswahlverfahren zur Suche eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle mit bestmöglicher Sicherheit. Das StandAG legt das Verfahren und wesentliche Kriterien der Standortsuche fest. Die Standortsuche wird durch die *Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH* (BGE) betrieben. Das *Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung* (BASE) sorgt im Auswahlverfahren für die Rechtsaufsicht und Öffentlichkeitsbeteiligung. Die vermittelnde und unabhängige Begleitung des Standortauswahlverfahrens fällt in die Zuständigkeit des *Nationalen Begleitgremiums* (NBG). Enden wird das Standortauswahlverfahren mit einer Standortentscheidung des deutschen Bundestages.

Eine besondere Herausforderung der Endlagerstandortsuche in Deutschland liegt in der großen Variabilität der Wirtsgesteine, in denen ein Endlager errichtet werden darf. Das StandAG lässt als mögliche Wirtsgesteine Tongestein, Steinsalz und Kristallingestein zu. Diese Gesteinsgruppen unterscheiden sich lithologisch, physikalisch und chemisch teilweise erheblich. Entsprechend unterschiedlich sind der Aufbau und die Funktion der jeweiligen Sicherheits- und Endlagerkonzepte. Das führt zu dem Problem, dass Sicherheitsvergleiche zwischen sehr unähnlichen Endlagersystemen nötig werden.

Unter welchen Voraussetzungen solche wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleiche möglich bzw. nicht möglich sind, war noch nicht in jeder Hinsicht geklärt. So wies zum Beispiel die *Entsorgungskommission* (ESK) in ihrem Diskussionspapier „Standortvergleich“ darauf hin, dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG für einen Vergleich verschiedener Endlagersysteme in unterschiedlichen Wirtsgesteinen nur bedingt geeignet seien (vgl. ESK 2021, S. 11). Auch die Vorhaben mit den Forschungskennzahlen 3607R02589 (*Fischer-Appelt & Baltés 2010*) und 05504/2 (*Fischer-Appelt et al. 2017*), die eine Methode des wirtsgesteinsübergreifenden Robustheitsvergleichs entwickelten bzw. weiterentwickelten, ließen Forschungsfragen offen. Das Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) startete daher im Januar 2022 das Forschungsprojekt METIENS, um die Problematik genauer zu untersuchen.

Das Projekt METIENS geht das Problem des wirtsgesteinsübergreifenden Standortvergleichs jedoch nicht direkt an. Vielmehr stellt es die übergeordnete Frage,

¹ Die Abkürzung StandAG verweist in diesem Bericht auf das Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 22. März 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 88) geändert worden ist (StandAG 2023).

wie Standortausschlüsse² mit Blick auf das Verfahrensziel, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden, langzeitsicherheitsanalytisch gerechtfertigt werden können. Mit der Untersuchung dieser Frage war auch eine Antwort auf die Frage des wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleich zu erwarten.

Die Standortauswahl ist ein multikriterielles Entscheidungsproblem. Das Forschungsprojekt METIENS untersucht mit seinem Fokus auf Langzeitsicherheitsbewertungen nur einen Teilaspekt dieses Entscheidungsproblems, nämlich die langzeitsicherheitsanalytische Rechtfertigung von Auswahlentscheidungen. Grund dieser Fokussierung war unter anderem, dass Entscheidungsträger Klarheit darüber benötigen, wo die Grenzen der komplexen langzeitsicherheitsanalytischen Methodik liegen. Damit soll vermieden werden, dass Standortauswahlentscheidungen, die auf den ersten Blick sicherheitsorientiert wirken, nur scheinbar auf das Ziel der bestmöglichen Sicherheit zusteuern.

Zum Verständnis des Projektes muss betont werden, dass METIENS keine Empfehlungen erarbeitet – also auch keine konkreten Anleitungen für Standortvergleiche, wie es etwa die Forschungsprojekte 3607R02589 (*Fischer-Appelt & Balthes 2010*) und 05504/2 (*Fischer-Appelt et al. 2017*) anstrebten. Das Projekt geht vielmehr einen Schritt zurück und versucht zunächst, Methodenklarheit zu gewinnen. Es will verstehen, unter welchen Bedingungen es aus sicherheitsanalytischer Sicht möglich ist, sich dem Standort mit der bestmöglichen Sicherheit anzunähern. Damit schafft es eine wissenschaftliche Bewertungsgrundlage für alle Akteure des Standortauswahlverfahrens, ohne selbst Bewertungen vorzunehmen.

Der vorliegende Bericht setzt eine Vertrautheit mit grundsätzlichen Aspekten der Endlagerung und des Standortauswahlverfahren voraus. Um Fachfremden den Einstieg zu erleichtern, enthält Anhang A kurze Einführungen in die Themen der Endlagerung und der Langzeitsicherheitsanalytik.

² Damit ist auch der Ausschluss von Teilgebieten und Standortregionen oder Teile solcher Gebiete mitgemeint.

2 Einzelziele

Das Akronym METIENS steht für „**M**ethoden, **B**ewertungskriterien und **t**ransparente **E**ntscheidungsprozesse zur **I**dentifikation eines **E**ndlagerstandortes mit **bestmöglicher Sicherheit**“. Im Fokus des Projekts stehen die Methoden und Kriterien zur Bewertung der Langzeitsicherheit und der Versuch, deren Potenzial und Grenzen bei der Rechtfertigung von Standortauswahlentscheidungen transparent zu machen.

Das Projekt verfolgt die nachfolgenden Einzelziele, an denen sich auch die Kapitelstruktur des vorliegenden Berichts orientiert:

1. **Aufarbeitung des Kontexts der Studie.** Einerseits sollte recherchiert werden, wie andere Länder Standortauswahlverfahren für die Endlagerung für hochradioaktive Abfälle betreiben und ob sich hieraus Schlussfolgerungen für das deutsche Standortauswahlverfahren ziehen lassen. Andererseits sollten ausgewählte Aspekte der Entstehungsgeschichte des StandAG und der zugehörigen Rechtsverordnungen aufgearbeitet werden, um ein besseres Verständnis der dort verankerten sicherheitsanalytischen Zielsetzungen zu entwickeln.
2. **Skizzierung des Entscheidungsproblems der Standortauswahl.** Das Projekt konzentriert sich auf die langzeitsicherheitsanalytischen Auswahlkriterien. Grundsätzlich sind Standortauswahlkriterien aber nicht auf den Aspekt der Langzeitsicherheit beschränkt, sondern können sich auch auf andere Sicherheitsaspekte (wie etwa die Betriebssicherheit) oder auf nicht sicherheitsbezogene Aspekte (wie etwa die bautechnische Machbarkeit) beziehen. Auch wenn die Abwägung solcher Kriterien nicht Gegenstand der Untersuchung ist, so bildet sie doch den übergeordneten Rahmen. Dieser Rahmen sollte im Projekt zumindest umrissen werden. Dies sollte auch dabei helfen, alternative Entscheidungswege für Fälle zu skizzieren, in denen verlässliche langzeitsicherheitsanalytische Aussagen nicht verfügbar sind.
3. **Sicherheitsanalytische Interpretation des Verfahrensziels, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden.** Dieses Einzelziel begründet sich dadurch, dass die Beschreibung des Verfahrensziels im StandAG und seinen zugehörigen Rechtsverordnungen keine vollständige Klarheit darüber schafft, welche sicherheitsanalytischen Aussagen und Vorgehensweisen erwartet werden. Das Projekt erkennt an, dass es bei der regulatorischen und sicherheitsanalytischen Ausdeutung des Verfahrensziels Interpretationsspielräume gibt. Die hier vorgestellte Interpretation sollte daher nur als eine von mehreren Interpretationsmöglichkeiten aufgefasst werden.

4. **Untersuchung, wie Ausschlüsse oder Teilausschlüsse von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten mit Blick auf das Verfahrensziel, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden, langzeitsicherheitsanalytisch gerechtfertigt werden können.** Dieses Einzelziel bildet den Untersuchungsschwerpunkt des Forschungsvorhabens.
5. **Ableitung praktischer Schlussfolgerungen für die Methodik der Standortauswahl und der diesbezüglichen Langzeitsicherheitsanalysen aus den unter Punkt 4 erzielten Ergebnissen.**
6. **Analyse spezifischer Merkmale von Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit anhand der unter Punkt 4 erzielten Ergebnisse.**

Zur Erreichung des 4. Einzelziels musste eine Brücke geschlagen werden zwischen dem Entscheidungsproblem der Standortauswahl und der komplexen Problematik der Gewinnung verlässlicher langzeitsicherheitsanalytischer Aussagen unter Ungewissheiten. Im Laufe des Projektes wurde deutlich, dass sich diese Brücke weder durch klassische entscheidungstheoretische noch durch klassische sicherheitsanalytische Ansätze schlagen ließ. Daher versuchte das Forschungsprojekt, die Rechtfertigungsbeziehung zwischen Standortausschlussentscheidungen und Langzeitsicherheitsanalytik zunächst theoretisch zu klären, um anschließend, aus diesem theoretischen Verständnis heraus, praktische Schlussfolgerungen für das Standortauswahlverfahren und seine Langzeitsicherheitsanalysen ziehen zu können. Die Ergebnisse dieses theoretischen Klärungsversuchs wurden gesondert publiziert (*Navarro 2025b*). Sie sind allgemeiner Natur und beziehen sich nur randlich auf das deutsche Standortauswahlverfahren. Der vorliegende Bericht wird daher diese Ergebnisse skizzieren und ihre Konsequenzen für das deutsche Standortauswahlverfahren herausarbeiten.

3 Recherchen

3.1 Standortauswahlverfahren in anderen Ländern

3.1.1 Methodik und Vorgehensweise

Im Projekt wurde eine Recherche zu länderspezifischen Standortauswahlverfahren für die Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle (englisch: High Level Waste, HLW) durchgeführt. Die Recherche sollte die Vorgehensweise zur Auswahl von Endlagerstandorten für hochradioaktiven Abfall im internationalen Vergleich beleuchten, um übertragbare Konzepte und Methoden für das deutsche Standortauswahlverfahren zu identifizieren. Auf Standortauswahlverfahren für die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle (Low and Intermediate Level Waste) wird nicht eingegangen, insbesondere, weil diese nicht zwingend eine tiefengeologische Lagerung erfordern.

Die Recherche ging dabei folgenden Fragen nach.

- Ist ein Standortauswahlverfahren für hochradioaktive Abfälle in den jeweiligen Ländern geplant oder befindet es sich in Umsetzung?
- Findet, wie in Deutschland, ein sicherheitsgerichteter Vergleich von Endlagerstandorten oder -regionen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen statt?
- Spielen wirtschaftlich-politische oder auch gesellschaftliche Aspekte im Standortauswahlverfahren eine Rolle?
- Welche Schlussfolgerungen lassen sich für das Vorhaben METIENS ziehen?

Für die Recherche wurden Informationen aus dem internationalen Review von *Faybishenko et al. (2016)*, dem MABeST Vorhaben (*Frieling et al. 2019*), dem EUGENIA-Vorhaben (*Bollingerfehr et al. 2011*) und weiteren aktuell verfügbaren Informationen, z. B. Webseiten der Aufsichtsbehörden (Regulator) oder des Vorhabenträgers herangezogen. Länder in denen sich das Standortauswahlverfahren noch in einer sehr frühen Phase befindet, wurden nicht betrachtet. Zum Beispiel befindet sich das Verfahren in Mexiko in einer sehr frühen Planungsphase und es liegen keine wesentlichen Informationen zum Konzept der Standortsuche vor (*Faybishenko et al. 2016*)

3.1.2 Ergebnisse

3.1.2.1 Länder ohne Standortsuche - Multinationale Endlagerkonzepte (MGDF)

In einigen Ländern sind sog. multinationale Endlagerkonzepte (MGDF, *multinational geological disposal facilities*) aufgrund von wirtschaftlichen Gesichtspunkten (geringe Menge an radioaktiven Abfällen) oder dem Mangel an geeigneten Wirtsgesteinsformationen von großem Interesse. Eine Standortsuche ist in diesen Ländern daher nicht geplant. Dies ist in Dänemark, Irland, Italien, Lettland, Norwegen und Slowenien der Fall.

Nach Aussage der *International Atomic Energy Agency (IAEA)* (IAEA 2004) wurde bereits seit 1975 ein erster Ansatz für ein multinationales Endlagerkonzept (MGDF) entwickelt. Seitdem ist dieses Konzept immer wieder durch die IAEA weiterentwickelt und in Gremien diskutiert worden, insbesondere in Bezug auf Vorteile und Risiken. Weiterentwicklungen fanden durch die IAEA statt (IAEA 2011c; IAEA 2016) oder im europäischen SAPIERR Projekt (EC 2009). Das weltweit einzige geplante multinationale Endlagerkonzept war in Süd-Australien geplant, aber eine konkrete Umsetzung eines solchen Konzepts gibt es bis heute nicht (siehe *Faybishenko et al. 2016* und *WNA 2020*).

3.1.2.2 Politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entscheidungsgründe

In vielen Ländern erfolgte die Standortauswahl nicht nur auf der Grundlage von sicherheitsgerichteten geowissenschaftlichen Kriterien, sondern auch aus politischen und wirtschaftlichen Überlegungen heraus oder mit Blick auf die gesellschaftliche Akzeptanz. In Brasilien, Finnland, Großbritannien, Kanada, Russland, Schweden, Spanien, Südafrika und USA legte man sich schon vor Beginn oder in einer sehr frühen Phase des Auswahlverfahrens auf eine bestimmte Region oder einen zentralen Standort fest (*Faybishenko et al. 2016*). Gründe hierfür sind z. B. in *Bollingerfehr et al. (2011)* erwähnt und umfassen die Vermeidung unnötiger Transporte der radioaktiven Abfälle über längere Strecken, die unmittelbare Nähe zu den Abfallverursachern (z. B. bestehenden kerntechnischen Anlagen) und eine gute Infrastrukturanbindung für den Transport von Behältern.

In den Ländern Finnland, Kanada und Schweden ist die Entscheidung für einen Endlagerstandort mittlerweile getroffen worden. Hier war die Akzeptanz der Bevölkerung ein wesentliches Auswahlkriterium, wodurch strukturschwache Regionen auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten heraus einem Standort für ein Endlager von hochradioaktivem Abfall zugestimmt haben.

Beispiele

- In **Großbritannien** wird die Auffassung vertreten, dass auf Grundlage der geologischen Situation überall im Land die Errichtung eines HLW-Endlagers möglich ist. Die Endlagersicherheit soll vor allem durch die geotechnischen Barrieren sowie die Behälter gewährleistet werden (Faybishenko et al. 2016; Nuclear Waste Services 2023). Das Standortauswahlverfahren und ein breites Beteiligungsverfahren der Bevölkerung laufen noch bis 2026. Danach erfolgt eine Eingrenzung auf mögliche Standorte für ein geologisches Tiefenlager für HLW und die Vorbereitung für die weiterführenden Untersuchungen. Im Zeitraum von 2029 bis 2030 sollen dann Standortuntersuchungen mit Tiefbohrungen stattfinden. Das Beteiligungsverfahren bis auf Ebene der Gemeinden soll in Großbritannien die freiwillige Bewerbung für einen Endlagerstandort erhöhen. Ein sicherheitstechnischer Vergleich von Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen ist jedoch nicht vorgesehen (Faybishenko et al. 2016; Nuclear Waste Services 2023).
- In den **USA** gibt es bereits ein Endlager für radioaktive Abfälle, in dem überwiegend Transurane aus der Kernwaffenherstellung eingelagert wurden (also keine abgebrannten Brennelemente oder hochradioaktiven Abfälle). Die sog. Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) befindet sich im Delaware Basin (New Mexico) im Salzgestein (MacKinnon et al. 2012). Der Endlagerstandort wurde jedoch nicht über ein Standortauswahlverfahren identifiziert. Stattdessen luden gemäß CURIE (2024a) lokale Politiker in Carlsbad (New Mexico) die Atomenergiekommission ein, die tiefen Salzlagerstätten in der Nähe ihrer Gemeinde als potenzielles Wirtsgestein zu erkunden. Die Erkundungsarbeiten an diesem Standort, der später zur WIPP werden sollte, begannen 1974. Im Jahr 1999 wurde der erste Abfall angeliefert. Die Lizenzierung und Eröffnung der WIPP beruhte somit auf einer unterstützenden Gastgebergemeinde und der entsprechenden amerikanischen Bundesstaatsregierung, die bereit war, die gesetzlichen Weichen zu stellen und sich an dem Prozess zu beteiligen.
- In den **USA** wurde neben der WIPP (siehe oben) noch ein Endlagerstandort für hochradioaktive Abfälle in Betracht gezogen, nämlich Yucca Mountain (Tuff Gestein). Nach CURIE (2024b) empfahl das Energieministerium im Mai 1986 drei Standorte auf ihre Eignung zu prüfen. Diese waren Hanford in Washington (Basaltgestein), Deaf Smith County in Texas (Salzgestein) und Yucca Mountain in Nevada (vgl. Frieling et al. 2019). Im Jahr 1987 änderte der Kongress den Nuclear Waste Policy Act, um Yucca Mountain als einzigen Standort für die weiteren Untersuchungen festzulegen. Nachdem im Juni 2008 der Lizenzantrag für die Baugenehmigung eines Endlagers für hochaktive Abfälle und abgebrannte Kernbrennstoffe am Yucca Mountain bei der Nuclear Regulatory Commission (NRC) eingereicht wurde, begann diese mit der Prüfung des Antrags. Doch das Energieministerium beantragte im Februar 2010, den Lizenzantrag zurückzuziehen und die NRC beendete daraufhin den Prüfprozess. Als we-

sentlicher Grund für die Zurücknahme des Lizenzantrages war gemäß *CURIE (2024b)* u. a. die Änderung des Nuclear Waste Policy Act, wodurch das Standortauswahlverfahren abrupt beendet und Yucca Mountain als einziger Standort festgelegt wurde. Dies lässt sich dahingehend deuten, dass die Auswahl des Endlagerstandortes eher auf politischen als auf wissenschaftlichen und technischen Überlegungen beruhte. Das Genehmigungsverfahren für Yucca Mountain ist derzeit ausgesetzt.

3.1.2.3 Vorfestlegungen auf ein Wirtsgestein

Einige Länder legten sich vor Beginn oder relativ früh im jeweiligen Auswahlverfahren – zum Teil auch aufgrund eines Mangels an alternativen Wirtsgesteinsformationen – auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp fest. Teilweise schloss dies eine Festlegung auf eine bestimmte Untersuchungsregion ein.

Zu nennen sind hier für **Kristallingestein** die Länder Schweden (*SKB 2011*), Finnland, Kanada (*NWMO 2010*), China (Region Beishan, Granit), Südafrika (*NRWDI 2023*), Indien (*Government of India 2023*), Südkorea (*NEA 2022*), Tschechien (*SÚJB 2023*) und Ukraine (*Faybishenko et al. 2016*) sowie Polen für **Steinsalz** (*Faybishenko et al. 2016*).

Damit wurde in diesen Ländern bereits zu Beginn des Auswahlprozesses der Suchraum für potentielle Standorte stark eingegrenzt. In den genannten Ländern war und ist, innerhalb des Standortauswahlverfahrens kein wirtsgesteinsübergreifender Vergleich zwischen Standorten durchgeführt worden bzw. vorgesehen. Dies schließt aber nicht aus, dass zum Zwecke der Vorfestlegung ein solcher Vergleich anhand allgemeiner Kriterien stattgefunden hat. Dies war jedoch nicht Gegenstand der Recherche.

3.1.2.4 Verzicht auf sicherheitsgerichtete Standortvergleiche

Das Standortauswahlverfahren basierte in Brasilien, Japan, Indien, Tschechien, Ungarn (*NUMO 2023*) und (*Chapman 2012*), Slowakei, UK, Litauen, Südafrika und Ukraine nicht auf einem sicherheitsgerichteten Vergleich von Regionen oder Standorten, sondern auf der Anwendung von geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und/oder Mindestanforderungen.

Beispiel

- In **Japan** ist für die Suche nach einem Standort für hochradioaktive Abfälle ein drei-stufiges Auswahlverfahren vorgesehen: die Auswahl der Voruntersuchungsgebiete, die Auswahl der detaillierten Untersuchungsgebiete und die Auswahl eines Endlagerstandortes. Ohne die Zustimmung der jeweiligen örtlichen Bevölkerung und der zuständigen Bürgermeister, Gouverneure der Präfekturen kann das Standortauswahlverfahren die nächste Stufe nicht errei-

chen. Die potentiellen Standortregionen erhalten in den einzelnen Stufen großzügige finanzielle Zuschüsse. Japan befindet sich derzeit in der ersten Stufe der „Literaturuntersuchung“ der Sichtung von geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, die z. B. frühere Erdbebenaktivität, Vulkanismus und weitere tektonische Phänomene betreffen (NEA 2022; NUMO 2023; Chapman 2012; Frieling et al. 2019). Für diese erste Stufe haben sich die zwei Gemeinden Suttsu-cho und Kamoenai-mura auf der Nordinsel Hokkaido von Japan beworben (Okamura 2023). Parallel dazu führen NUMO (Nuclear Waste Management Organization) und METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) landesweit öffentliche Dialoge, um die Akzeptanz für diese drei Stufen in der Bevölkerung zu fördern. Aus der gesichteten Literatur wurde nicht ersichtlich, ob das Standortauswahlverfahren auch einen sicherheitsgerichteten Vergleich von Standorten vorsieht.

3.1.2.5 Auswahlverfahren mit unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen

Länder, in denen unterschiedliche Wirtsgesteinstypen im Standortauswahlverfahren betrachtet werden oder wurden, sind Frankreich (CNE 1995; ANDRA 2005b; ANDRA 2005a), Schweiz (Zuidema et al. 2014; Faybishenko et al. 2016; ENSI 2024) , Spanien (Faybishenko et al. 2016) und USA (CURIE (2024b), Frieling et al. 2019),

Die frühere Standortsuche für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in **Frankreich** ist in (CNE 1995) verkürzt zusammengestellt. In der frühen Phase des Verfahrens (in den 1970er Jahren) wurden Ton-, Schiefer-, Salz- und Granitvorkommen in Betracht gezogen. Aufgrund von verschiedenen Gründen (Anwendung von geowissenschaftlichen Kriterien, gesetzlichen Vorgaben) wurde letztendlich entsprechend der Sicherheitsrichtlinie RFS N° III.2.f (ASN 2008) nur noch Tongestein und ein Granitstandort untersucht. Der Granitstandort wurde ausgeschlossen, da wegen der möglichen hydrogeologischen Wegsamkeiten durch Klüfte keine Einigung über die Führung des Langzeitsicherheitsnachweis erreicht werden konnte (Bollingerfehr et al. 2011).

In der **Schweiz** wurde für hochradioaktive Abfälle zunächst nur Kristallingestein als potenzielles Wirtsgestein in Betracht gezogen. Als Kriterien zur Eignung für ein Endlager wurden günstige felsmechanische Eigenschaften, sowie das Vorhandensein von hinreichend großen ungestörten, tektonisch ruhigen und langfristig stabilen Kristallingesteinsblöcken ausgewiesen (Alt et al. 2017). Im Jahre 1985 sollte das Projekt „Gewähr“ die Eignung des Kristallingesteins auf Basis der oben genannten Kriterien untersuchen. Während der Bundesrat 1988 die bautechnische Machbarkeit positiv bewertet, stellt er fest, dass es keine genügend ausgedehnten Gesteinskörper gibt, in denen die geforderten Eigenschaften gegeben sind, weshalb die Forschung auf nichtkristalline Wirtsgesteine ausgedehnt werden sollte (BFE 2008)

Untersuchungen im Rahmen der Etappe 1 des Sachplans geologische Tiefenlager (BFE 2008) ergaben, dass die tonreichen Sedimentgesteine bzw. der Opalinuston die strengen Sicherheitsanforderungen am besten erfüllen (siehe NAGRA 2014a, NAGRA 2014b und BFE 2020).

Die Ausführungen in Kap.3.1.2.2 lassen erkennen, dass die Auswahl der Endlagerstandorte in den **USA** nicht durch einen sicherheitsorientierten Standortvergleich, sondern durch politische Festlegungen stattfand. Derzeit forscht das Programm „Disposal Research and Development Roadmap (UFDC)“ in den USA vor allem an drei Wirtsgesteinen: Salz, Ton- und Kristallingestein (einschließlich einer zusätzlichen tiefen Bohrlochlagerung im Kristallingestein). In (NWTRB 2015) sind Empfehlungen zum weiteren Standortauswahlverfahren aufgeführt. Ein Konzept für einen Standortvergleich auf Grundlage der unterschiedlichen Wirtsgesteine gibt es derzeit nicht. In Sevougian et al. (2019) wird hervorgehoben, dass die Forschung und Entwicklung zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in den USA derzeit generisch (d. h. nicht standortspezifisch) ist. Ein entsprechender Ablaufplan wurde für die Eventualität eines Endlagerstandortprozesses in mehreren potenziellen Wirtsgesteinsumgebungen entwickelt.

In **Spanien** gibt es keine endlagerrelevanten Salzschiefer, sodass sich hier der Standortauswahlprozess bis 2050 auf Tongestein (Opalinuston) und Kristallingestein konzentriert. Derzeit wird für diese Wirtsgesteine ein generisches Endlagerkonzept entwickelt (Faybishenko et al. 2016). Ob ein wirtsgesteinsspezifischer Vergleich von Standorten geplant ist, konnte nicht ermittelt werden.

3.1.2.6 Auswahlverfahren mit Standortvergleichen

Ein sicherheitsgerichteter Vergleich von Standorten war oder ist, soweit dies aus der recherchierten Literatur ersichtlich war, nur für die Länder Deutschland, Schweiz und Bulgarien erfolgt oder geplant.

Im **schweizerischen** Verfahren wurde ein sicherheitsgerichteter Vergleich von Standortregionen durchgeführt, jedoch beschränkte er sich ausschließlich auf die Abwägung des jeweils gleichen Wirtsgesteins Tongestein (ENSI 2024). Das Schweizer Verfahren bildet aus diesem Grund nicht die deutsche Situation ab, in der drei verschiedene Wirtsgesteine (Steinsalz, Ton- und Kristallingestein) zu betrachten sind, ist jedoch dem stufenweisen Konzept im Standortauswahlverfahren in Deutschland sehr ähnlich (siehe auch Kap. 3.1.2.3 sowie Zuidema et al. 2014 oder Röhlig 2015).

Gemäß Faybishenko et al. (2016) wird auch in **Bulgarien** ein stufenweises Standortauswahlverfahren durchgeführt, in dessen finalem Schritt fünf potenzielle Standorte auf der Grundlage einer multikriteriellen Analyse zur weiteren Prüfung ausgewählt wurden. Alle Standorte liegen in tonigen Gesteinen. Das bulgarische Verfahren bildet somit ebenfalls nicht die deutsche Situation ab, in der drei verschie-

dene Wirtsgesteinsarten zu betrachten sind. Nähere Informationen zur Durchführung dieser multikriteriellen Vergleichsanalyse wurden nicht gesichtet.

3.1.3 Fazit

- In vielen Ländern haben wirtschaftliche oder auch politisch-gesellschaftliche Gesichtspunkte den Auswahlprozess beeinflusst.
- In einigen Ländern erfolgte die Vorfestlegungen auf ein Wirtsgestein durch einen Vergleich mit anderen Wirtsgesteinen. Da die Vorfestlegungen ohne konkrete Standorte operieren, zeigt dies, dass Entscheidungen für oder gegen bestimmte Wirtsgesteine in manchen Ländern anhand allgemeiner Auswahlkriterien fallen.
- In einigen Ländern werden in den Standortauswahlverfahren keine Sicherheitsvergleiche durchgeführt. In diesen Ländern gilt somit – anders als in Deutschland, wo bestmögliche Sicherheit angestrebt wird – kein Maximierungsgebot für die Sicherheit.
- Deutschland ist das einzige Land in diesem Review, in dem innerhalb eines strukturierten Auswahlverfahrens drei potentielle Wirtsgesteine untersucht und verglichen werden müssen. Für diese Aufgabe gibt es also international noch kein Vorbild.

3.2 Ausgewählte regulatorische Entwicklungen

Das StandAG (*StandAG 2013; StandAG 2017; StandAG 2023*), die EndlSiAnfV und die EndlSiUntV (*EndlSiAnfV & EndlSiUntV 2020*) sind Rechtsnormen des Standortauswahlverfahrens. Diskussionen zum Begriff der bestmöglichen Sicherheit und zur Gewichtung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien haben die Regulatorienentwicklung über einen längeren Zeitraum begleitet. Sie sollen hier anhand öffentlich zugänglicher Informationen rekonstruiert werden, um die Interpretation dieser Aspekte für die vorliegende Studie zu unterstützen.

3.2.1 Entwicklung des Standortauswahlgesetzes und der zugehörigen Rechtsverordnungen

Im Februar 1977 wurde von der niedersächsischen Landesregierung verkündet, dass es Planungen gibt, in der Gemeinde Gorleben ein sog. „nukleares Entsorgungszentrum“ zu errichten (*NLA 1977*). Die Planungen beinhalteten u. a. den Bau eines tiefengeologischen Endlagers für hochradioaktive Abfälle innerhalb einer Steinsalzstruktur in steiler Lagerung. Im Jahr 1986 begann die Erkundung des Salzstockes mit der Errichtung von Schächten. Ein Betrieb des Endlagers sollte

wegen der geplanten Klärung, ob radioaktive Abfälle am Standort sicher gelagert werden könnten, und eines notwendigen Planfeststellungsbeschlusses ein Betrieb nicht vor 2008 aufgenommen werden (*Kockel et al. 1995*). Ein vergleichendes Standortauswahlverfahren zur Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wurde zunächst in Deutschland nicht verfolgt.

Zur Vervollständigung des Kenntnisstandes über potentielle Endlagerwirtsgesteine wurde die BGR beauftragt (*Bräuer 1999*) Studien zur Standortauswahl und Bewertung für ein Endlager in salinaren (*Kockel et al. 1995*) und nichtsalinaren, d. h. hier kristallinen (*Bräuer et al. 1994*) Wirtsgesteinen zu erstellen. Auf Basis vorangegangener Arbeiten im Steinsalz (*Best et al. 1982; Jaritz 1983; Krull 1991*) und im Kristallin (*BGR 1977*) sowie der Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (*BMI 1983*) wurden von *Bräuer (1999)* Auswahlkriterien erarbeitet, mit denen „möglicherweise geeignete“ geologische Strukturen in Deutschland identifiziert werden könnten, und auf bestehende Geodaten angewendet. In diesen Studien fand zu einem frühen Zeitpunkt ein kriterienbasierter Vergleich von Standorten statt, auch wenn diese fachliche Studie nicht zum Ziel hatte, einen Standort festzulegen.

Im Oktober 1998 wurde beschlossen, dass die Erkundung des Salzstockes in der Gemeinde Gorleben unterbrochen und weitere Standorte in unterschiedlichen Wirtsgesteinen auf ihre Eignung untersucht werden sollen. Aufgrund dessen wurde im Februar 1999 vom BMU (*Nies 1999*) ein „Arbeitskreis zur Auswahl von Endlagerstandorten“ gegründet mit dem Ziel „wissenschaftlich fundierte Standortauswahl- und -eignungskriterien sowie ein nachvollziehbares Auswahlverfahren“ zu entwickeln und festzulegen.

Im Verlauf der Arbeiten des Arbeitskreises wurde dieser in „Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)“ umbenannt³. Unter diesem Namen wurde 2002 der Abschlussbericht vorgelegt, der ein vergleichendes Standortauswahlverfahren mit entsprechenden geo- und sozialwissenschaftlichen Auswahlkriterien unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wirtsgesteine vorschlägt (*AkEnd 2002*). Eine Vorfestlegung auf ein Wirtsgestein traf der AkEnd bewusst nicht, weil „ein geeigneter Endlagerstandort nicht allein durch das Wirts- oder das Barrierengestein, sondern durch eine günstige geologische Gesamtsituation bestimmt wird. Das Auswahlverfahren hat also das Ziel, solche günstigen geologischen Gesamtsituationen zu identifizieren“ (*AkEnd 2002*).

Im Resultat wurde aus den Ergebnissen des AkEnd ein Entwurf zum „Gesetz zur Errichtung eines Verbands und Festlegung eines Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Verbands- und Standortauswahlgesetz – VStG 2005)“ entwickelt und vom BMU inkl. Begründungsteil veröffentlicht (*BMU 2005*). In diesem Gesetz sollte ein kriterienbasiertes vergleichendes Stand-

³ s. Ergebnisvermerk zur 4. Sitzung am 31. August / 01. September 1999.

ortauswahlverfahren festgelegt werden, allerdings trat es zum damaligen Zeitpunkt nicht in Kraft. Anlässlich der Arbeiten des AkEnd und der internationalen Fortschritte der Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tonigen Wirtsgesteinen, wurden von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Studien zur Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen durchgeführt, die u.a. Ton als Schwerpunkt hatten (BGR 2007; Hoth et al. 2007).

Mit Änderung des Atomgesetzes im August 2011 (AtG 2011) wurde eine Beendigung der Nutzung der Kernenergie zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität bis Ende 2022 (bzw. bis April 2023 nach AtG 2022) in Deutschland beschlossen (BT 2011). Nach BASE (2022a) ebnete dieser Beschluss den Weg für den Neustart in der Suche nach einem Endlagerstandort in Deutschland. Es wurden Grundsätze und Eckpunkte für ein Endlagersuchverfahren nach einem sog. „Endlagerverfahrensgesetz“ festgehalten, die schließlich in einem Entwurf für ein „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG)“ mündeten (BT 2013a), das im Juli 2013 schließlich als (StandAG 2013) vom Bundestag verabschiedet wurde.

Nach § 1 Absatz 2 StandAG (2013) sollte vor Beginn des eigentlichen Verfahrens zur Standortauswahl die sogenannte „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (im Folgenden *Endlagerkommission* genannt) eingesetzt werden. Diese sollte nach § 4 Absatz 1 StandAG (2013) einen Bericht zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens anfertigen, in dem u. a. Vorschläge zu den folgenden Aspekten erarbeitet werden:

- Beurteilung und Entscheidung der Frage, ob anstelle einer unverzüglichen Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen andere Möglichkeiten für eine geordnete Entsorgung dieser Abfälle wissenschaftlich untersucht und bis zum Abschluss der Untersuchungen die Abfälle in oberirdischen Zwischenlagern aufbewahrt werden sollen.
- Entscheidungsgrundlagen: allgemeine Sicherheitsanforderungen an die Lagerung, geowissenschaftliche, wasserwirtschaftliche und raumplanerische Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung sowie wirtsgesteinsspezifische Ausschluss- und Auswahlkriterien für die möglichen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin sowie wirtsgesteinsunabhängige Abwägungskriterien und die Methodik für die durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen.
- Kriterien einer möglichen Fehlerkorrektur: Anforderungen an die Konzeption der Lagerung insbesondere zu den Fragen der Rückholung, Bergung, und Wiederauffindbarkeit der radioaktiven Abfälle sowie der Frage von Rücksprüngen im Standortauswahlverfahren.

Im Mai 2014 nahm die Endlagerkommission ihre Arbeit auf (BT 2014) und schloss diese im Juli 2016 mit einem Abschlussbericht ab (EndKom 2016f). Der Abschlussbericht geht vor allem auf Auswahl- und Abwägungskriterien sowie auf eine umfassende Bürgerbeteiligung ein, mit denen in einem vergleichenden Auswahlverfahren schrittweise der bestmögliche Standort für radioaktive Abfälle gefunden werden sollten. Es sollen drei unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und Kristallin berücksichtigt werden.

Die Empfehlungen der Endlagerkommission wurden anschließend in einem Gesetzesentwurf (BT 2017) umgesetzt, welcher das StandAG (2013) fortentwickelte und mit Gesetzesbeschluss (BR 2017) im Mai 2017 in Kraft trat (StandAG 2017). Details zum Ablauf des Standortauswahlverfahrens und dem aktuellen Stand können dem Gesetz bzw. den Internetauftritten unterschiedlicher Stakeholder entnommen werden (BASE 2022b; BGE 2024; BMUV 2024).

Mit dem StandAG wurde das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) mit der Umsetzung der Maßgabe ermächtigt, durch Rechtsverordnungen die Sicherheitsanforderungen für die Endlagerung nach § 26 Absatz 3 StandAG festzulegen und die geltenden Anforderungen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren § 27 Absatz 6 StandAG zu bestimmen. Zur fachlichen Unterstützung bei der Erstellung dieser beiden Verordnungen hat das BMU die Expertengruppe „Sicherheitsanforderungen und -untersuchungen“ einberufen (Weyand et al. 2020). Im Resultat hat das BMU Entwürfe für beide Verordnungen entwickelt, die im Bundestag vorgelegt wurden (BT 2020). Sie resultierten in den beiden Verordnungen *Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV 2020) und *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung - EndlSiUntV 2020).

Bei der EndlSiAnfV handelt es sich um eine Weiterentwicklung der *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* (BMU 2010), die das BMU 2010 veröffentlichte, aber nie den Rechtstatus einer Verordnung besaß. Beide Verordnungen spielen eine wesentliche Rolle bei der Durchführung des Standortauswahlverfahrens nach StandAG zur Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Die vorliegende Studie wird sich jedoch hauptsächlich mit der EndlSiAnfV befassen.

3.2.2 Der Begriff der bestmöglichen Sicherheit

Nach AkEnd (2002) sollte das Auswahlverfahren den „bestmöglichen Standort“ identifizieren, das auf geo- und sozialwissenschaftlichen Kriterien basiert. Hierunter wird der in einem Abwägungsprozess zwischen Alternativen ermittelte Standort und nicht der absolut beste Standort verstanden (AkEnd 2002, S. 72). Der da-

rauf aufbauende Gesetzesentwurf für das VStG (2005) führt in § 27 aus, dass das Ziel des Standortauswahlverfahrens ist, durch vergleichende Untersuchungen den bestmöglichen Standort für eine Anlage zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle zu finden. Der bestmögliche Standort müsse nach dem Ergebnis des Standortauswahlverfahrens geeignet sein, den nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderlichen Schutz vor schädlichen Wirkungen radioaktiver Abfälle auf die Menschen und die Umwelt für einen Zeitraum von einer Million Jahren zu gewährleisten. Auch *Thomauske (2014)* bezieht sich auf diese Definition des bestmöglichen Standortes: die Auswahl desjenigen Standortes unter denjenigen, die bei Anwendung dieses Verfahrens und dieser Kriterien gefunden werden. Die Erwartung von *Kreusch (1999)* ist zudem, dass durch die Suche nach dem relativ besten Standort zu einem möglichst geeigneten Standort auch zu einer breiten Akzeptanz führt. Dies sei ein Erfahrungswert bei der Standortauswahl für konventionelle Deponien.

Nach § 1 Abs. 2 StandAG (2017) soll mit dem Standortauswahlverfahren „in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden“. Hierzu wird ausgeführt, dass der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit der Standort ist, „der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.“

Die Formulierung „Standort mit bestmöglicher Sicherheit“ findet sich bereits im Gesetz von 2013 (*StandAG 2013*) sowie in den jeweiligen Begründungen der Gesetze wieder (*BT 2013a; BT 2017*). In den Begründungen wird teilweise hiervon abweichend über die Ermittlung des „im Hinblick auf die Sicherheit bestmöglichen Standortes“ (*BT 2013a*) oder des „unter Sicherheitsaspekten bestmöglichen Standorts“ (*BT 2017*) gesprochen. Ferner käme ein „bestmöglich sicherer Standort für ein Endlager“ in Betracht (*BT 2017*). In den Diskussionen zum Standortauswahlgesetz im Bundestag und Bundesrat wurde in ähnlicher Weise von der Suche nach dem „bestmöglichen, bestgeeigneten Endlagerstandort mit Blick auf die Sicherheit“ (*BT 2013b*) gesprochen und dass der bestmögliche Standort für radioaktive Abfälle in Deutschland ausgewählt werden solle (*BR 2013*). In den hier zitierten Diskussionen zum StandAG zeigt sich, dass das Wording zum Konzept *Standort mit bestmöglicher Sicherheit* nicht immer einheitlich war. Durchgängig wurde jedoch eine nicht näher bestimmte Optimierung der Sicherheit gefordert.

Auch in der Endlagerkommission wurde die Definition des Begriffes und deren mögliche Auslegung diskutiert (*Kudla 2015; BUND 2015; EndKom 2015a; Grun-*

wald 2016; EndKom 2016b; EndKom 2016c), insbesondere ob es einer Änderung im Gesetz bedürfe oder eine Konkretisierung in der eigenen Handlungsempfehlung ausreiche (EndKom 2016b). Hierzu wurden zwei Positionen formuliert (EndKom 2016b):

1. **Position 1** (Anpassung des StandAG ist erforderlich): eine Gesetzesänderung ist erforderlich, um den Sinn einer neuen Definition des Standortes mit bestmöglicher Sicherheit verlässlich in das gesetzliche Verfahren zu integrieren. Sonst wäre es (insbesondere bei § 19 zum abschließenden Standortvergleich und Standortvorschlag) unklar, ob ein Standort ausreicht, der erwarten lässt, dass er die Anforderungen des AtG einhält oder ob es darum geht, unter Standorten, die dies erwarten lassen, den Standort mit der im Vergleich bestmöglichen Sicherheit auszuwählen.
2. **Position 2** (Definition des Standortes mit bestmöglicher Sicherheit ist im Abschlussbericht der Endlagerkommission ausreichend): Diese Position hält eine Konkretisierung des StandAG für nicht erforderlich. Der klare Wunsch des Gesetzgebers nach einem an Sicherheitsgesichtspunkten orientierten vergleichenden Suchverfahren sei bereits durch das im Standortauswahlgesetz (StandAG 2013) angelegte Auswahlverfahren geregelt. Dies ergebe sich aus der Gesetzesbegründung (BT 2013a) und auch aus der Überschrift „Abschließender Standortvergleich und Standortvorschlag“ des § 19 StandAG. Zudem sei eine gesetzlich detaillierter geregelte Definition des Begriffs nicht erforderlich, weil der Begriff ausschließlich in § 1 StandAG verwendet werde, in dem die Zielbestimmung des Gesetzes im soeben erläuterten Sinne bereits eindeutig beschrieben sei.

Letztlich hat die Endlagerkommission sich für die zweite Position entschieden, dass es keiner Änderung des StandAG bedürfe (EndKom 2016f).

Innerhalb der Endlagerkommission wurde ebenfalls über die Verwendung der Begrifflichkeiten „beste“, „bestmöglich“ usw. diskutiert (Kudla 2015; Grunwald 2016). Grunwald (2016) argumentierte, dass nicht von dem „unter Sicherheitsaspekten besten“, sondern bestmöglichen Standort gesprochen werde, liege daran, dass es möglicherweise Standorte gebe, die eine sichere Endlagerung versprechen, aber aus anderen Gründen ausgeschlossen werden (wenn z.B. planungswissenschaftliche Kriterien dies erfordern). Ein weiterer Grund sei nach EndKom (2016c), dass es möglicherweise etliche Standorte gibt, die eine sichere Endlagerung versprechen, es aber keine absolute Klarheit über alle möglichen Standorte geben könne.

Insgesamt wird deutlich, dass die Intention des Begriffes *bestmögliche Sicherheit* an die Durchführung des Standortauswahlverfahrens und der darin definierten Kriterien verknüpft ist und kein absolut bester Standort versprochen werden kann. Damit lässt sich festhalten, dass der Begriff *bestmöglich* mit der Intention

einer Abschwächung oder Begrenzung des Gebots der Sicherheitsmaximierung eingeführt wurde.

3.2.3 Gewichtung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Nach § 24 StandAG wird anhand geowissenschaftlicher Abwägungskriterien (s. Anlagen 1 bis 11 zum StandAG) bewertet, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich aus einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien. Jedes geowissenschaftliche Abwägungskriterium besitzt eine oder mehrere bewertungsrelevante Eigenschaften mit zugehöriger Bewertungsgröße bzw. zugehörigem Indikator. Anhand dieser Indikatoren erfolgt eine Einordnung in die Wertungsgruppen „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in drei *Kriteriengruppen* zusammengefasst. In die erste Kriteriengruppe „Güte des Einschlussvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises“ (§ 24 Absatz 3 StandAG mit Anlagen 1 bis 4) sind diejenigen Abwägungskriterien eingeordnet, mit denen im Vergleich von Gebieten untereinander die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Stoffe am Ort ihrer Endlagerung sowie die Robustheit der Nachweisführung für den Nachweis der Langzeitsicherheit bewertet werden (BT 2017). Die zweite Kriteriengruppe „Absicherung des Einschlussvermögens“ (§ 24 Absatz 4 StandAG mit Anlagen 5 und 6) enthält Abwägungskriterien, mit denen bewertet wird, inwiefern das Gebirge sein Einschlussvermögen gegenüber Beanspruchungen aufrechterhält, die bei Errichtung und Betrieb von untertägigen Hohlräumen des Endlagers entstehen (BT 2017). Die dritte Kriteriengruppe „weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften“ (§ 24 Absatz 5 StandAG mit Anlagen 7 bis 11) enthält Abwägungskriterien, mit denen die Robustheit des Endlagersystems bewertet wird (BT 2017).

Regelungen zur Abwägung (bzw. Gewichtung und Aggregierung) der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien existieren im StandAG nicht. Auch gibt es keine Regelung zur Gewichtung der bewertungsrelevanten Eigenschaften und Bewertungsgrößen innerhalb eines geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums untereinander. Im Unterschied hierzu besitzen die planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien in Anlage 12 zu § 25 StandAG zusätzlich zu den drei Wertungsgruppen auch drei Gewichtungsgruppen. So werden jeweils drei bis vier planungswissenschaftliche Abwägungskriterien einer von drei Gewichtungsgruppen zugeordnet. Gewichtungsgruppe 1 wird am stärksten, die Gewichtungsgruppe 3 mit der geringsten Gewichtung gewertet.

Die im StandAG verfassten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien entsprechen inhaltlich (bzgl. der bewertungsrelevanten Eigenschaften und Bewertungsgrößen mit Zahlenwerten) weitestgehend den Empfehlungen des *AkEnd* (2002) bzw. dem damaligen Entwurf zum „Gesetz zur Errichtung eines Verbands und Festlegung eines Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung radioaktiver Abfälle

(Verbands- und Standortauswahlgesetz)“ (VStG 2005). Eine Ausnahme bildet das später dem StandAG hinzugefügte Abwägungskriterium „Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge“ (s. Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG), s. hierzu auch (Appel 2016; Fischer 2016). Der AkEnd ordnete die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dabei drei Gewichtungsgruppen zu (analog zu den planungswissenschaftlichen Kriterien im StandAG), wobei die Gewichtungsgruppe 1 mit der stärksten, die Gewichtungsgruppe 3 mit der geringsten Gewichtung gewertet wurde. In AkEnd (2002) wird ausgeführt, dass „die Anforderungen und Kriterien der Gewichtungsgruppe 1 das vorgesehene Gewicht bei der zusammenfassenden Beurteilung dadurch erhalten, dass die gesuchten besonders günstigen Teilgebiete diese Anforderungen bzw. Kriterien in besonders hohem Maße erfüllen müssen. Das ist dann der Fall, wenn sie bei den Kriterien dieser Gruppe die Wertung ‘günstig’, allenfalls vereinzelt die Wertung ‘bedingt günstig’, erhalten. Die Anwendung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 führt zur Differenzierung der Gesamtbewertung, wenn sich diejenigen Teilgebiete, die in Gewichtungsgruppe 1 annähernd gleich günstig abschneiden, hinsichtlich der Erfüllung der Kriterien aus Gewichtungsgruppe 2 unterscheiden. ‘Besonders günstige’ Teilgebiete müssen auch in Gewichtungsgruppe 2 gute Ergebnisse aufweisen. Entsprechendes gilt hinsichtlich der Bedeutung der Kriterien in Gewichtungsgruppe 3“. Gewichtung und Zuordnung der Anforderungen und Kriterien zu den Gewichtungsgruppen beruhten auf der erfahrungsbasierten Einschätzung der AkEnd-Mitglieder (AkEnd 2002).

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dieser Gewichtungsgruppen des AkEnd werden nun jeweils in einem eigenen Absatz (Absätze 3 bis 5) im § 24 StandAG zusammengefasst, ohne dass eine Gewichtung untereinander vorgenommen wird. Während der Beratungen der Endlagerkommission wurde die Einteilung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in Gewichtungsgruppen entsprechend der Empfehlungen des AkEnd in einem Entwurf noch zunächst übernommen (EndKom 2016a). Im Abschlussbericht der Endlagerkommission (EndKom 2016f) wurde der Begriff „Gewichtungsgruppe“ letztendlich durch „Kriteriengruppe“ ersetzt, wobei eine Gewichtung entfiel⁴. Die Entwurfsfassung für das entsprechende Kapitel im Abschlussbericht aus dem Februar/März 2016 (EndKom 2016a, S. 23) gibt den Hinweis, dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien als Anforderungen formuliert wurden und in drei Gruppen gegliedert werden sollen, deren Bezeichnung („Gewichtungsgruppe“ oder „Kriteriengruppe“) noch einer besonderen Prüfung bedarf. Die Bezeichnung für die Gruppen lautet auch im Gesamtberichtsentwurf vom 26. Juni 2016 (EndKom 2016d) noch „Gewichtungsgruppe“. In der 33. Sitzung der Endlagerkommission am 27. Juni wird erwähnt, dass die Umbenennung in „Kriteriengruppe“ aufgrund eines Kompromisses erfolgte, wodurch eine Rangfolge der drei Gruppen entfällt. Es wird erwähnt

⁴ Der Abschlussbericht wurde am 28. Juni 2016 in der Endlagerkommission verabschiedet, am 05. Juli 2016 dem Bundestag übergeben und am 30. August 2016 in seiner letzten Version veröffentlicht (ergänzt um ein Gruppenfoto der Endlagerkommission).

wird, dass die Diskussion um die Bezeichnung der Gruppen mit der Frage der Eingruppierung des Abwägungskriteriums zum Deckgebirge (Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG) in Zusammenhang steht (*EndKom 2016e*, S. 124 f.). In *Fischer (2016)* wird deutlich, dass innerhalb der Endlagerkommission Uneinigkeit darüber bestand, ob das Abwägungskriterium zum Deckgebirge der Gewichtungsguppe 2 oder 3 zugeordnet werden solle, da damit einhergehend das Kriterium entweder ein höheres oder geringeres Gewicht hätte. Im zuvor beschriebenen Kompromiss ist durch die Umbenennung von „Gewichtungsguppe“ in „Kriteriengruppe“ die Gewichtung entfallen, sodass eine Zustimmung der Endlagerkommission zur dritten Kriteriengruppe erfolgte (*EndKom 2016e*, S. 124 f.).

Im Zuge der Online-Konsultation des vorgelegten Entwurfs der Endlagerkommission zu den geowissenschaftlichen Kriterien (*EndKom 2015b*) wurde geäußert, dass eine Gewichtungsguppierung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wichtig sei und dass die Gewichtung, Reihenfolge und Aggregation noch konkretisiert werden sollten (*ZebraLog 2016*). Die Endlagerkommission hält abschließend in ihrem Abschlussbericht einen verbalargumentativen Abwägungsprozess für erforderlich, aber die Vorgabe formale Aggregationsregeln nicht als zielführend (*EndKom 2016f*). Aus Sicht von GGSC (2019) ist dieser Sachverhalt „so zu verstehen, dass der Gesetzgeber im Anschluss an die Empfehlungen der Endlagerkommission noch weiter gehend als der AkEnd bewusst auf abstrakte und generelle Vorgaben verzichtet hat, um die geowissenschaftliche Bewertung der Kriterien im Hinblick auf das gesetzlich vorgegebene Ziel, die Feststellung einer günstigen geologischen Gesamtsituation für die Festlegung der Gebiete für die nächsten Schritte des Standortauswahlverfahrens, nicht durch starre Vorgaben einzuschränken. Vielmehr geht der Gesetzgeber offenbar davon aus, dass sich aus der Zusammenstellung und Sichtung des Abwägungsmaterials nach Maßgabe der gesetzlichen Abwägungskriterien die nach Lage der Dinge erforderlichen Bewertungsschritte besser beurteilen lassen, als wenn er vorab Gewichtungs- oder Aggregationsregeln vorgeben würde, anhand derer die günstige geologische Gesamtsituation quasi mathematisch abzuleiten wäre.“ Diese Interpretation bestätigt sich auch durch die Begründung zum Gesetz (*BT 2017*): „Danach soll im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägung ermittelt werden, in welchen Gebieten eine für die Sicherheit des Endlagers günstige Gesamtsituation vorliegt. In jedem Prozessschritt sind für die darin betrachteten Gebiete alle Anforderungen entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu prüfen. Auch Kombinationswirkungen können abwägungsrelevant sein. Eine rechnerische Gesamtbewertung ist bewusst nicht vorgesehen“.

Auch eine andere Studie befasst sich mit der Bedeutung der Kriteriengruppen und deren Wichtung untereinander (*Mönig et al. 2020*). Demnach haben die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bei einer sicherheitsgerichteten Abwägung im Hinblick auf die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle eine größere Bedeutung als die Kriterien der Kriteriengruppen 2 und 3. Diese Interpretation

folgt i.W. dem Ansatz in *AkEnd* (2002), der sich auch in den Anhängen zum VStG (2005) wiederfindet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Beurteilungsspielraum bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, insbesondere wie die Kriterien untereinander gewichtet werden, besteht. Dieser Beurteilungsspielraum ist im StandAG größer als derjenige in den Empfehlungen des *AkEnd*, da die Gewichtungsgruppen im StandAG entfallen sind. Die Entscheidung hierüber wurde von der Endlagerkommission bei der Erstellung eines Entwurfs für das Standortauswahlgesetz, wie ausgeführt, bewusst getroffen.

4 Eckpunkte des Entscheidungsproblems

Das deutsche Standortauswahlverfahren findet den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit über einen sukzessiven Ausschluss von Teilgebieten, Standortregionen und Standorte. Insofern kann das Problem der *Standortauswahl* auch als ein Problem des *Standortausschlusses* beschrieben werden. Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit steht dann am Ende einer Kette von Ausschlussentscheidungen, hinter denen eine Kette von Entscheidungsproblemen steht. Die Gemeinsamkeiten dieser Entscheidungsprobleme sollen hier umrissen werden sollen.

4.1 Alternativen

Der Begriff der Standortauswahl suggeriert, dass zwischen *Standorten* gewählt wird. Eigentlich wird aber nicht nur zwischen Standorten gewählt, sondern auch zwischen Teilgebieten, Standortregionen oder Teilen solcher Gebiete. Diese sind die sogenannten *Alternativen* des Entscheidungsproblems. Aus Gründen der Einfachheit werden wir diese in diesem Bericht auch nur kurz „Standorte“ nennen.

Aus geographischer Sicht handelt es sich bei den Alternativen um Untersuchungs-räume variabler Größe. Letztendlich ist eine Alternative aber durch sämtliche Informationen gekennzeichnet, die für die Ausschlussentscheidungen benötigt werden. Dies umfasst nicht nur den geographischen Raum, sondern u. a. auch die geowissenschaftliche Gesamtsituation, das Endlagerkonzept mit seinem Sicherheits- und Einschlusskonzept, die zu erwartenden Umwelteinwirkungen auf das Endlagersystem und sein Entwicklungsmöglichkeiten.

Es mag naheliegen, Alternativen als die zur Wahl stehenden Endlagersysteme zu verstehen. Dies macht es aber nötig, zwischen der Alternative und seiner Umwelt (die beispielsweise durch die am geographischen Ort zu erwartenden klimatischen Einflüssen gekennzeichnet ist) zu unterscheiden. Eine solche Unterscheidung zwischen *Alternative* und *Umwelt*, wie sie von *Laux et al. (2012)* vorgenommen wird, ist im Standortauswahlverfahren aber nur eingeschränkt praktikabel. Denn das wichtigste Entscheidungsmerkmal einer Alternative ist ihre Langzeitsicherheit. Die Langzeitsicherheit wird aber unter Umständen nicht nur vom Endlagersystem, sondern auch von seiner Umwelt bestimmt. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, den Begriff der Alternative nicht nur auf das Endlagersystem zu beschränken, sondern auch dessen Umwelt einzubeziehen.

Bei den Entscheidungsproblemen des Standortauswahlverfahrens können Alternativen heterogen sein. Beispielsweise könnte eine Alternative ein Teilgebiet mit heterogenen geologischen Bedingungen sein. Das macht es problematisch, die Langzeitsicherheit einer Alternative zu bestimmen. Für eine solche Bestimmung

müsste das betreffende Teilgebiet in mögliche Endlagersysteme aufgeteilt werden, denen dann ein Niveau der Langzeitsicherheit zugewiesen werden könnte. Wenn also im Folgenden sprachlich unscharf von der *Langzeitsicherheit einer Alternative* die Rede sein wird, dann soll implizit von einer Aufspaltung heterogener Alternativen in potenzielle Endlagersysteme ausgegangen werden.

Es bleibt festzustellen, dass die Alternativen nicht vollständig bestimmt sind. Sie können auch veränderbar sein. Das liegt an der prinzipiellen Möglichkeit, Sicherheits- und Endlagerkonzepte weiterzuentwickeln oder auszuwechseln. Letzteres könnte beispielsweise geschehen, um Auswahlentscheidungen zu vereinfachen.

4.2 Zielsystem

Die Menge der Ziele eines Entscheidungsproblems wird *Zielsystem* genannt. Das StandAG legt als primäres Ziel des Standortauswahlverfahrens fest, *den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden* (wie dieses Ziel aus sicherheitsanalytischer Perspektive interpretiert werden kann, wird in Kapitel 5 näher untersucht). Wie jedes Ziel besitzt auch dieses Ziel eine Zielgröße, d. h. ein Merkmal, für das das Ziel formuliert wurde.⁵ Im Falle des primären Ziels des Standortauswahlverfahrens handelt es sich um den *dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt*. Dieser Schutz orientiert sich nach §26 Abs. 2 StandAG an zukünftigen Strahlenexpositionen und ist daher nicht direkt messbar. Infolgedessen muss er in messbare Größen überführt werden, für die wiederum Ziele formuliert werden. Dieser Vorgang der Messbarmachung wird Operationalisierung genannt. Auf diese Weise entsteht ein zumindest teilweise hierarchisch organisiertes Zielsystem.

Das primäre Ziel des Standortauswahlverfahrens muss nicht das einzige Ziel des Standortauswahlverfahrens sein. So sieht das StandAG in bestimmten Fällen auch den Einsatz planungswissenschaftlicher Kriterien vor, die eigenständige Verfahrensziele einführen. Daneben ist es nicht unwahrscheinlich, dass weitere Ziele zum Tragen kommen werden, wie etwa die bautechnische Machbarkeit oder die sinnvolle Begrenzung der Verfahrensdauer und eingesetzten Ressourcen, da diese schließlich nicht ins Unendliche steigen können. Wie in Kapitel 3.1 gezeigt wurde, schreiben auch andere Länder nicht ausschließlich sicherheits- oder langzeitsicherheitsbezogene Ziele für ihre Standortauswahlverfahren vor.

Verfahrensziele können sowohl untereinander als auch mit dem primären Ziel der bestmöglichen Sicherheit konkurrieren. Dies macht Zielabwägungen erforderlich. Beispielsweise ist mit der Suche nach dem Standort mit der bestmöglichen Si-

⁵ Merkmale, die sich auf die Langzeitsicherheit beziehen, werden in sicherheitsanalytischen Kontexten meist *Indikatoren* genannt. Auch der Begriff „Kriterium“ kommt zum Einsatz, ist aber nicht eindeutig, weil „Kriterium“ auch eine Eintrittsbedingung meinen kann.

cherheit immer ein Ressourcenaufwand verbunden, der in praktisch sinnvollen Grenzen gehalten werden muss.

Zielkonkurrenzen können sich auflösen, wenn eines der konkurrierenden Ziele unerreichbar wird. So könnte es sich beispielsweise herausstellen, dass wirtsge- steinsübergreifende Sicherheitsvergleiche in bestimmten Situationen unmöglich sind. Eine Maximierung der Langzeitsicherheit wäre dann kein erreichbares Ziel mehr. Wenn dies eintreten sollte, dann könnten andere Ziele zur Anwendung ge- langen und ggf. zu einer Vereinfachung des Verfahrens führen.

Auswahlentscheidungen müssen nicht zwingend alle Zielgrößen eines Zielsys- tems heranziehen. So zeigen die im StandAG festgelegten Ausschlusskriterien, dass Auswahlentscheidungen manchmal auch nur mithilfe eines einzigen Indika- tors getroffen werden können. Werden aber mehrere Indikatoren benötigt, dann müssen diese mit Hilfe einer Aggregierungsregel zu einem Bewertungsergebnis verrechnet (und damit aggregiert) werden. Es handelt sich dann um ein multikrite- rielles Entscheidungsproblem.

Das Zielsystem des Standortauswahlverfahrens wird zu einem großen Teil durch das StandAG und die EndlSiAnfV vorgegeben. So sind wichtige Indikatoren bereits durch die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien des StandAG sowie durch die Dosis- und Austragsindika- toren der EndlSiAnfV festgelegt. Trotzdem lässt dieses Indikatorensystem auch In- terpretationsspielräume offen (siehe z. B. *Mönig et al. 2020*). Ferner gibt es kein re- gulatorisches Verbot, weitere Indikatoren einzuführen, wenn dies sinnvoll sein sollte. Insofern befindet sich das Zielsystem des Standortauswahlverfahrens noch in einem Prozess der Fortentwicklung.

4.3 Ungewissheiten

Die Bestimmung von Langzeitsicherheitsniveaus kann mit erheblichen Ungewiss- heiten einhergehen. Diese können den Standortcharakter betreffen, die im Endla- gersystem ablaufenden Prozesse oder die Wahrscheinlichkeit bestimmter System- entwicklungen. Ungewissheiten werden im Bereich der Endlagerung meist ne- gativ bewertet, was ein risikoscheues Entscheidungsverhalten zur Folge hat. Un- gewissheiten werden also nicht als Chance gesehen, dass die erwartete Sicher- heit übertroffen werden könnte, sondern als ein Risiko, die erwartete Sicherheit nicht zu erreichen.

In der Entscheidungstheorie werden Entscheidungsprobleme nach dem Vorhan- densein und der Quantifizierbarkeit von Ungewissheiten klassifiziert. Man unter- scheidet zwischen Entscheidungsproblemen „bei Sicherheit“, „bei Unsicherheit (in engerem Sinne)“ und „bei Risiko“ (*Laux et al. 2012*). Die entscheidungstheoreti- sche Terminologie unterscheidet sich hier von der sicherheitsanalytischen Termi-

nologie, die überwiegend mit den Begriffen der Gewissheit und Ungewissheit operiert. Während die Begriffe der Sicherheit und Gewissheit weitgehend synonym sind, stehen „Unsicherheit i. e. S.“ und „Risiko“ für unterschiedliche Formen der Ungewissheit: Beim Risiko liegt ein Wahrscheinlichkeitsurteil vor, bei Unsicherheit i. e. S. jedoch nicht (Laux et al. 2012).

Weil Ungewissheiten bei Langzeitsicherheitsbewertungen unvermeidbar sind, sind sicherheitsorientierte Eliminationsentscheidungen von Haus aus keine Entscheidungen *bei Sicherheit*. Sie sind aber auch keine Entscheidungen *bei Risiko*, weil die Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Systementwicklungen oft unbekannt bleiben. Das bedeutet, dass Auswahlentscheidungen, die sich auf die Langzeitsicherheit beziehen, vor allem Entscheidungen *bei Unsicherheit i. e. S.* sind.

Formal können Entscheidungen bei Unsicherheit in Entscheidungen bei Sicherheit transformiert werden. Die verwendeten Indikatoren werden dann als sichere Zielgrößen beschrieben. Der Einfluss der Ungewissheiten auf die Entscheidung könnte dann beispielsweise über zusätzliche Ungewissheitsindikatoren oder auf andere Weise festgelegt werden.

5 Deutung des Ziels, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden

Das Standortauswahlverfahren ermittelt den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit. Das Standortauswahlgesetz definiert den Begriff „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ in § 1 Abs. 2 StandAG. Das vorliegende Kapitel versucht, insbesondere anhand dieser Definition ein möglichst klares und konsistentes Bild der regulatorisch geforderten sicherheitsanalytischen Ziele und Methoden zu gewinnen. Die dazu vorgenommene Analyse erfolgt aus sicherheitsanalytischer Perspektive und ersetzt keine rechtliche oder regulatorische Auslegung.

5.1 Zur Lesart der im StandAG aufgeführten Definition

Das StandAG definiert das primäre Verfahrensziel mithilfe des Begriffes „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“:

„Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren für die im Inland verursachten hochradioaktiven Abfälle ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung nach § 9a Absatz 3 Satz 1 des Atomgesetzes in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden.“ (§ 1 Abs. 2 Satz 1 StandAG)

Unmittelbar daran schließt sich eine Definition des Begriffes „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ an:

„Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird und die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.“ (§ 1 Abs. 2 Satz 2 StandAG)

Diese Definition ist zentral für die Erschließung der Anforderungen, die das Standortauswahlverfahren an die Langzeitsicherheitsanalysen stellt. Wie gezeigt werden soll, kann diese Definition jedoch nicht isoliert gelesen werden. Vielmehr verweist sie auf weitere Passagen des Gesetzes, die infolgedessen mitberücksichtigt werden müssen.

Betrachten wir zunächst die Struktur der Definition. Bemerkenswert ist, dass der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit auf zweifache Weise bestimmt wird:

1. **Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist der Standort, der „die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“.** Diese Bestimmung führt die zentrale Zielgröße bzw. den zentralen Indikator der Sicherheitsbemessung ein, nämlich den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt. Nach § 26 Abs. 2 Nr. 1 Satz 2 StandAG bezieht sich dieser Schutz auf zukünftige Strahlenexpositionen. Zusätzliche Strahlenexpositionen in der Zukunft sind allerdings grundsätzlich nicht direkt messbar. Es müssen also geeignete Methoden zu ihrer Bewertung eingeführt werden, ein Vorgang, der *Operationalisierung* genannt wird. Wie gleich gezeigt wird, enthält das StandAG auch Operationalisierungsvorgaben.
2. **Der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ist ferner der „Standort, der im Zuge eines vergleichenden Verfahrens aus den in der jeweiligen Phase nach den hierfür maßgeblichen Anforderungen dieses Gesetzes geeigneten Standorten bestimmt wird“.** Das Gesetz enthält demnach phasenspezifische Anforderungen, die bestimmen, welche Standorte geeignet sind. Diese Standorte sind gewissermaßen die Kandidaten in einem vergleichenden Verfahren, an dessen Ende der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit steht. Dieser Teil der Definition definiert „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ also über den Verfahrensweg und die dabei geltenden Anforderungen. Es handelt sich somit um eine *operationale Definition*, was bedeutet, dass die zu bemessende Größe („bestmögliche Sicherheit“) über das Bestimmungsverfahren definiert wird. Das StandAG belässt es also nicht dabei, das Verfahrensziel über den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt zu definieren. Es macht auch Vorgaben dazu, wie dieser Schutz zu operationalisieren ist, etwa über die Vorgabe von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien. Dies ist insofern verständlich, als es gerade die Operationalisierungsvorgabe ist, die sicherheitsanalytischen Sachverstand und konsensuale Bewertungsgrundsätze in das Gesetz einbringt.

Ein wichtiges Merkmal der Operationalisierungsvorgabe ist, dass sie Beurteilungsspielräume offenlässt. So wurde etwa in Kapitel 3.2.3 gezeigt, dass beispielsweise die relative Gewichtung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bewusst offengelassen wurde. Das Offenlassen von Beurteilungsspielräumen ist aus sicherheitsanalytischer Sicht sinnvoll, weil Langzeitsicherheitsanalysen auf standortspezifische Gegebenheiten und Ungewissheiten eingehen müssen und es auch methodische Klärungsbedarfe geben kann.

Die Beurteilungsspielräume, die das StandAG offen lässt, sind allerdings auch so groß, dass damit Bewertungsverfahren zulässig erscheinen können, die aus sicherheitsanalytischer Sicht nicht sinnvoll sind, weil sie den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt (im Sinne der Vermeidung zukünftiger Strahlenexpositi-

onen) nicht oder nicht mit Sicherheit korrekt bewerten. So würde beispielsweise die folgende Fehlanwendung der geowissenschaftliche Abwägungskriterien voraussichtlich nicht gegen die Anforderungen des StandAG verstoßen.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kommen gemäß den §§ 13, 14, 16 und 18 des StandAG in verschiedenen Verfahrensschritten zur Anwendung, um das Vorliegen einer günstigen geologischen Gesamtsituation zu prüfen (im Falle eines Endlagersystems ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich, das wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht, berücksichtigt dies allerdings auch die technischen und geotechnischen Barrieren). Die Anwendung der geowissenschaftliche Abwägungskriterien hilft bei der Einengung auf *günstige Standortregionen* (§ 14 StandAG), *günstige Standorte* (§ 16 StandAG) und *geeignete Standorte* (§ 18 StandAG). Bei keinem dieser Einengungsschritte verbietet das StandAG, dass der Vorhabenträger Gebiete mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen mithilfe der geowissenschaftliche Abwägungskriterien gegeneinander antreten lässt. Die geowissenschaftliche Abwägungskriterien sind aber für solche Sicherheitsvergleiche im Allgemeinen nicht geeignet. Ein wichtiger Grund ist, dass sie bei Endlagersystemen mit einschlusswirksamen Gebirgsbereich die Sicherheitsbeiträge der technischen und geotechnischen Barrieren nicht berücksichtigen, was bei wirtsgesteinsübergreifenden Vergleichen von Endlagersystemen, bei denen sich diese Barrieren unterscheiden, aber notwendig wäre. Wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche wären somit eine Fehlanwendung der geowissenschaftliche Abwägungskriterien, die nicht gegen die Anforderungen des StandAG verstößt.

Das StandAG lässt also Spielraum für sicherheitsanalytisch unsinnige Bewertungsverfahren. Damit ergibt sich das definitorische Problem, dass die operationale Teildefinition von „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ auch Standorte umfassen kann, welche „die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt“ nicht gewährleisten. In diesem Falle stünde die operationale Teildefinition mit derjenigen Teildefinition in Konflikt, die sich am dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt orientiert. Es ist anzunehmen, dass in solchen Konfliktfällen die Gewährleistung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt die prioritäre Lesart der Definition wäre. Dies Sichtweise wird dadurch gestützt, dass das StandAG ein wissenschaftsbasiertes, selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren fordert (§ 1 Abs. 2 Satz 1 StandAG).

Das StandAG kann also so gelesen werden, dass die wissenschaftliche und insbesondere auch sicherheitsanalytische Sinnhaftigkeit des Verfahrens nicht aus dem Blick geraten sollte. Dies umfasst auch die Maßstäbe und Verfahren, mit denen der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt bewertet wird. (Zu diskutieren wäre, ob die Forderung nach einem selbsthinterfragenden und lernenden Standortauswahlverfahren bedeutet, dass dies grundsätzlich bei Bedarf auch für die Maßstäbe und Verfahren gelten könnte, die durch das StandAG festgelegt werden).

Gemäß dieser Lesart muss also überprüft werden, ob die konkrete Umsetzung des Standortauswahlverfahrens und seiner Bewertungsmaßstäbe den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt (im Sinne einer Vermeidung zukünftiger Strahlenexpositionen) tatsächlich gewährleisten bzw. optimieren können.

Eine solche Überprüfung muss in einem wissenschaftsbasierten Verfahren den aktuellen Stand der Wissenschaft berücksichtigen. Die Rolle des „Standes der Wissenschaft“ ist dabei allerdings nicht so zu verstehen, dass es eine einhellige wissenschaftliche Meinung zur korrekten Bewertung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt geben müsste. Wissenschaft ist ihrem Wesen nach diskursiv und lässt divergierende Meinungen zu – auch zur Bewertung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt. Den aktuellen Stand der Wissenschaft zu berücksichtigen kann also nur heißen, die aktuellen, sich gegebenenfalls auch widersprechenden wissenschaftlichen Befunde und Argumente bei der Überprüfung zu kennen und zu berücksichtigen.

5.2 Gewichtung der Langzeitsicherheit

Sicherheitsanalytisch von Interesse ist die Frage, welche Sicherheitsaspekte bei der Bewertung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt zu berücksichtigen wären.

Das Standortauswahlgesetz führt aus, dass es um den Schutz vor „ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle“ geht (§ 1 Abs. 2 Satz 2 StandAG). Diese schädlichen Wirkungen können nicht nur in der Nachverschlussphase auftreten (und die Langzeitsicherheit beeinträchtigen), sondern auch bei der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung eines Endlagers.

Der Schutz von Mensch und Umwelt zielt somit grundsätzlich nicht nur auf die Langzeitsicherheit ab, sondern auch auf die Sicherheit bei Errichtung, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers. Folgendes weist aber darauf hin, dass sowohl das StandAG als auch die EndlSiAnfV dem Sicherheitsaspekt der Langzeitsicherheit das höchste Gewicht geben.

- Ein Großteil der Kriterien aus Kapitel 3 StandAG („Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl“) dient der Bewertung der Langzeitsicherheit.
- Die Verfahren zur Ermittlung von Teilgebieten (§ 13 StandAG) und der Einengung auf günstige Standortregionen (§ 14 StandAG), günstige Standorte (§ 16 StandAG) und geeignete Standorte (§ 18 StandAG) orientieren sich primär an der Langzeitsicherheit. Der Hauptantrieb der Einengung ist der Fortschritt der über- und untertägigen Erkundungen, die vor allem der Bewertung der Langzeitsicherheit dienen.

- Über- und untertägige Erkundungen sind aufwändig. Somit wird zur Bewertung der Langzeitsicherheit der höchste Aufwand betrieben.
- Die Maßnahmen zur Sicherheit der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung dürfen „die Langzeitsicherheit nicht erheblich und nicht mehr als unvermeidlich beeinträchtigen“ (§ 17 Abs. 4 EndlSiAnfV). Dies spricht für eine Priorität der Langzeitsicherheit.

Der primäre Zweck der Endlagerung, Langzeitsicherheit herzustellen, dürfte somit unter allen Sicherheitsaspekten das höchste Gewicht besitzen. Daraus kann jedoch noch nicht geschlossen werden, dass gar keine Abwägung zwischen der Langzeitsicherheit und anderen Sicherheitsaspekten zulässig wäre (siehe hierzu Kapitel 5.5).

5.3 Genehmigungsfähigkeit und zu erreichendes Schutzniveau

Die Langzeitsicherheitsanalysen des Standortauswahlverfahrens benötigen Klarheit darüber, welche Ziele das Verfahren verfolgt, wenn es „bestmögliche Sicherheit“ verlangt. Dabei stellen sich folgende Fragen:

1. Soll die Standortselektion dafür sorgen, dass Standorte ausscheiden, die eine bestimmte Mindestsicherheit nicht erreichen?
2. Soll die Standortselektion dafür sorgen, dass Standorte ausscheiden, deren Sicherheit geringer ist als die Sicherheit anderer Standorte?

Aus sicherheitsanalytischer Perspektive ist es wichtig, diese Verfahrensziele zu unterscheiden, weil sie unterschiedliche Bewertungsverfahren benötigen.⁶ Frage 1 zielt auf eine Bewertung der *absoluten* Sicherheit eines Standortes nach einem absoluten Bewertungsmaßstab ab. Frage 2 hingegen zielt auf eine Bewertung der *relativen* Sicherheit ab, d. h. auf Sicherheitsunterschiede. Sie macht also Sicherheitsvergleiche notwendig.

An dieser Stelle kann zumindest festgestellt werden, dass Frage 1 bejaht werden kann: Das Standortauswahlgesetz schreibt das Erreichen einer Mindestsicherheit vor, indem es ein „bei der Endlagerung zu erreichendes Schutzniveau“ vorschreibt (§ 26 Abs. 1 Satz 1 StandAG). Dieses zu erreichende Schutzniveau wird durch Sicherheitsanforderungen festgelegt (die inzwischen mit der EndlSiAnfV konkretisiert wurden) und umfasst die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines Endlagers. Auf diese Weise soll die nach § 9b Abs. 1a AtG erforderliche Vorsorge

⁶ Wie Navarro (2025b) zeigt, sind damit auch unterschiedliche Anforderungen an die Genauigkeit der Sicherheitsanalysen verbunden.

gegen Schäden gewährleistet werden. Gemäß Standortauswahlgesetz ist dann „die Eignung des Vorhabens im Genehmigungsverfahren vollumfänglich zu prüfen“ (§ 20 Abs. 3 Satz 2 StandAG; siehe dazu auch § 7 Abs. 2 Nr. 3 AtG).

Somit ist zumindest eine Bedeutungsebene des Begriffes „bestmögliche Sicherheit“, dass vorgeschlagene Standorte das „zu erreichende Schutzniveau“ erreichen, welches durch die EndlSiAnfV festgelegt wird, und somit genehmigungsfähig sind. Standorte, die dies nicht erfüllen, sollen ausgeschlossen werden.

5.4 Weitere Bedeutungsebenen von „bestmögliche Sicherheit“

Im Begriff „bestmögliche Sicherheit“ weist der Wortbestandteil „best“ auf ein wie auch immer geartetes Maximierungsgebot für die Sicherheit hin, also auf ein Gebot, die Sicherheit zu erhöhen. Wir werden hier den Charakter dieses Maximierungsgebots und damit die verschiedenen Bedeutungsebenen des Begriffes „bestmögliche Sicherheit“ analysieren.

Zunächst lässt sich feststellen, dass das Standortauswahlgesetz zwei Maßnahmen vorschreibt, die für eine Verbesserung der Sicherheit sorgen:

1. Die **schrittweise Optimierung des Endlagerkonzepts** für die Betriebs- und die Nachverschlussphase (§ 26 Abs. 3 Nr. 3 StandAG und §12 EndlSiAnfV).
2. Das **Auswahl- und Selektionsverfahren**, bei dem Gebiete oder Standorte ausgesondert werden. Im Einzelnen handelt es sich um Ermittlung von Teilgebieten (§ 13 StandAG) sowie um die Einengung auf günstige Standortregionen (§ 14 StandAG), günstige Standorte (§ 16 StandAG) und geeignete Standorte (§ 18 StandAG). Um diese Einengung vornehmen zu können, werden Erkundungsprogramme und Sicherheitsuntersuchungen vorgeschrieben (§ 16 Abs. 1 StandAG und § 18 Abs. 1 StandAG).

Dies sind also mögliche Methoden der Sicherheitsverbesserung. Untersuchen wir nun die möglichen Ziele dieser Sicherheitsverbesserungen. Wir betrachten dazu die folgenden vier Möglichkeiten.

1. Das Ziel, die Genehmigungsfähigkeit der Standorte herzustellen.

Wie in Kapitel 5.3 erläutert, ist dies ein explizites Ziel des Standortauswahlgesetzes. Es kann sich jedoch nicht um das *alleinige* Ziel des Standortauswahlverfahrens handeln und damit nicht die alleinige Bedeutung von „bestmögliche Sicherheit“. Denn wäre dies tatsächlich das alleinige Ziel, dann würde es zur Auffindung eines Standortes mit bestmöglicher Sicherheit genügen, einen einzigen genehmigungsfähigen Standort herauszugreifen (dieser wäre dann

automatisch ein Standort mit „bestmöglicher Sicherheit“). Das schrittweise Verfahren der Standortauswahl, wie es das Standortauswahlgesetz vorschreibt, wäre in diesem Fall unangemessen kompliziert.

2. Das Ziel, die Sicherheit durch Optimierung der Sicherheitskonzepte und technischen Auslegung des Endlagers zu verbessern.

Die EndlSiAnfV schreibt dieses Ziel in §12 Abs. 1 explizit vor. Es kann ebenfalls nicht alleiniges Verfahrensziel sein, weil es gleichermaßen nicht erklären kann, warum das StandAG ein schrittweises Verfahren der Standortauswahl vorschreibt. (Es würde dann ebenfalls genügen, einen einzigen, genehmigungsfähigen Standort herauszugreifen.)

3. Das Ziel, Standorte auszuschließen, wenn es andere Standorte mit höherem Sicherheitsniveau gibt.

Das systematische Selektionsverfahren des StandAG erfordert die Erkundung und Bewertung mehrerer Standorte und wäre damit nicht zweckmäßig, wenn es nur darum ginge, einen genehmigungsfähigen Standort zu finden (Ziel 1) oder die Sicherheit der Endlagerkonzepte zu erhöhen (Ziel 2). Zweckmäßig wird es aber dadurch, dass es einen Ausschluss von Standorten mit geringerer Sicherheit bewirkt, da sich das Ausschlussverfahren wesentlich auf die sicherheitsbezogenen Kriterien aus den §§ 22 bis 24 StandAG stützt. Dass bei den Gebietseinengungen (§§ 14, 16 und 18 StandAG) *günstige* bzw. *geeignete* Kandidaten ausgewählt werden sollen, dürfte vor allem bedeuten, dass *weniger günstige* bzw. *weniger geeignete* Kandidaten ausscheiden, womit sich das Sicherheitsniveau erhöhen dürfte. Die vom Standortauswahlgesetz geforderten Vergleiche bzw. vergleichenden Bewertungen (§ 1 Abs. 2 Satz 2, § 12 Abs. 3, § 18 Abs. 3 und § 19 Abs. 1 StandAG) wären damit Sicherheitsvergleiche mit dem wesentlichen Ziel der Maximierung des Sicherheitsniveaus.

4. Das Ziel, Standorte auszuschließen, wenn sie konzeptionellen Präferenzen entgegenstehen.

Wie *Navarro (2025b)* darlegt, können Standortausschlüsse prinzipiell auch durch *konsensuale sicherheitsbezogene konzeptionelle Präferenzen*⁷ gerechtfertigt werden. Als Beispiel nennt *Navarro (2025b)* die weithin etablierte Präferenz für Endlagersysteme, die das Entsorgungsprinzip „contain and isolate“ implementieren. In Deutschland wird diese Präferenz durch die Forderung eines sicheren Einschlusses (§ 4 EndlSiAnfV) ausgedrückt. Ein wesentliches Merkmal solcher Präferenzen ist, dass sie sicherheitsbezogen sind, aber sich dennoch nicht auf Sicherheitsniveaus beziehen. Daher könnten sie in Fällen zum Ein-

⁷ Es handelt sich dabei um Präferenzen bezüglich der systemspezifischen Bedingungen der Sicherheitserzeugung, die sich nicht über Sicherheitsniveauvergleiche ausdrücken lassen.

satz kommen, in denen Sicherheitsniveauvergleiche nicht möglich sind, aber dennoch nach sicherheitsbezogenen Argumenten für den Ausschluss von Standorten gesucht wird (Navarro 2025b). Das StandAG scheint ein solches Vorgehen zumindest nicht auszuschließen.

Das Standortauswahlverfahren strebt somit die Ziele 1 bis 3 und möglicherweise auch das Ziel 4 an. Diese Ziele repräsentieren verschiedene Bedeutungsebenen des Begriffes „bestmögliche Sicherheit“.

Es sei angemerkt, dass die vom StandAG geforderten Erkundungsprogramme und Sicherheitsuntersuchungen zwar eine *Erhöhung der Zuverlässigkeit von Sicherheitsaussagen* anstreben, dies aber kein Ziel ist, das für sich alleine genommen eine Sicherheitsverbesserung bewirken könnte. Der Grund dafür ist, dass es keinen kausalen Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Sicherheitsniveau eines Endlagersystems und dem Wissen über dieses Sicherheitsniveau gibt.

5.5 Grenzen des Maximierungsgebots

Im Standortauswahlverfahren wird also die Langzeitsicherheit erhöht, indem (sicherheitsbezogen) weniger günstige bzw. weniger geeignete Standorte schrittweise ausgesondert werden. Es stellt sich die Frage, wann dieser Aussonderungsprozess als abgeschlossen betrachtet werden darf. Ist er erst dann abgeschlossen, wenn der *beste bzw. theoretisch bestmögliche Standort* gefunden wurde? Der Begriff „bestmögliche Sicherheit“ kann zu dieser Interpretation einladen. Die folgenden Argumente zeigen jedoch, dass dem StandAG ein anderes Verständnis von bestmöglicher Sicherheit zugrunde liegen dürfte.

1. Es dürfte praktisch unmöglich sein, den Standort mit dem höchsten Sicherheitsniveau zu finden. Einer der Gründe ist, dass die Verfahrensdauer und die eingesetzten Ressourcen sinnvoll begrenzt werden müssen. Ein anderer Grund ist, dass es aufgrund nicht reduzierbarer Ungewissheiten auch sicherheitsanalytische Grenzen bei der Bestimmung von Sicherheitsunterschieden gibt. Auch in der Entwicklungsgeschichte des StandAG wurde anerkannt, dass es kein praktikables Ziel sei, den *besten* Standort zu finden. So stellt die Endlagerkommission fest, dass es „keine absolute Klarheit über alle möglichen Standorte geben kann“ (EndKom 2016c, S. 251). Der AkEnd stellte ebenfalls klar, dass es nicht um den „absolut besten Standort“ (AkEnd 2002, S. 72) ginge.
2. Es kann zu Abwägungen zwischen Sicherheitszielen und anderen Zielen kommen. So führt etwa Grunwald (2016) an, dass nicht von dem „unter Sicherheitsaspekten besten“, sondern bestmöglichen Standort gesprochen werde, liege daran, dass es möglicherweise Standorte gebe, die eine sichere Endlagerung versprechen, aber aus anderen Gründen ausgeschlossen würden (siehe Kapitel 3.2.2). Auch die EndlSiAnfV erkennt an, dass das Ziel der Sicherheitsmaxi-

mierung manchmal zugunsten anderer Ziele abgeschwächt werden muss. Entsprechend legt sie fest, dass die Optimierung des Endlagersystems abgeschlossen sei, wenn „eine weitere Verbesserung der Sicherheit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden kann“ (§ 12 Abs. 2 EndlSiAnfV).

In Abgrenzung zum Ausdruck „beste Sicherheit“ lässt sich „bestmögliche Sicherheit“ also als eine abgeschwächte Maximierungsforderung deuten, die den praktischen Grenzen einer solchen Maximierung Rechnung trägt sowie der Notwendigkeit, Sicherheitsziele in gewissem Umfang auch gegenüber anderen Zielen abzuwägen (diese könnten z. B. planungswissenschaftliche Ziele oder eine sinnvolle Begrenzung der Verfahrensdauer oder der eingesetzten Ressourcen sein).

Das *Primat der Sicherheit*, das im Bericht der Endlagerkommission (*EndKom 2016f*) und in der Begründung zum Gesetzentwurf des StandAG (*BT 2017*) angeführt wird, kann demnach nicht bedeuten, dass derjenige Standort zu finden wäre, der tatsächlich unter allen Standorten die maximale Sicherheit besitzt. Es kann nur bedeuten, dass der Sicherheit bei Zielabwägungen ein hohes oder sogar das höchste Gewicht gegeben werden sollte.

6 Sicherheitsbezogene Rechtfertigung von Standortausschlüssen

6.1 Einleitung

Entscheidungen für oder gegen Standorte können von mehreren Kriterien geleitet werden. Die wichtigsten Kriterien sind sicherheitsbezogen, doch das muss nicht auf alle Kriterien zutreffen. So ist beispielsweise in der Schweiz die bautechnische Machbarkeit ein wichtiges Auswahlkriterium (BFE 2008, S. 41) und auch Kriterien wie Kommunizierbarkeit oder Praktikabilität (Heiermann & Olszok 2024) können eine Rolle spielen. Entscheidungen, die durch Gewichtung und Abwägung mehrerer Kriterien gefällt werden, heißen *multikriterielle Entscheidungsprobleme*.

Innerhalb der multikriteriellen Entscheidungsprobleme der Standortauswahl konzentrierte sich das Projekt METIENS auf die Bedeutung von Ungewissheit für die Vertrauenswürdigkeit sicherheitsbezogener Kriterien und Indikatoren. Genauer gesagt versuchte es die Bedingungen zu identifizieren, unter denen die Ungenauigkeiten der Langzeitsicherheitsanalyse so groß werden, dass sich über eine Anwendung der Auswahlkriterien keine verlässlichen Sicherheitsverbesserungen mehr erzielen lassen. Jeder Versuch, die Langzeitsicherheit per Standortselektion zu verbessern, wird dann allenfalls Scheinerfolge erzielen und vermeidbaren Aufwand mit sich bringen.

Um die Bedeutung von Ungewissheit für die Vertrauenswürdigkeit sicherheitsbezogener Kriterien und Indikatoren zu verstehen, untersuchte das Projekt auf theoretischer Ebene, wie sich Standortausschlussentscheidungen unter Ungewissheiten sicherheitsbezogen rechtfertigen lassen. Die identifizierten Rechtfertigungszusammenhänge wurden in einem Rechtfertigungsmodell beschrieben und dienten der Ableitung praktischer Schlussfolgerungen für die Standortauswahl. Diese Projektergebnisse wurden in Navarro (2025b) publiziert und sollen hier in deutscher Sprache noch einmal umrissen werden. Kapitel 8 (Schlussfolgerungen) wird sie in den Kontext des deutschen Standortauswahlverfahrens einordnen.

Zum besseren Verständnis des Rechtfertigungsmodell und seiner Motivation noch einige Anmerkungen.

- Ziel der Modellkonstruktion war es nicht, eine Methode oder Anleitung zur Rechtfertigung von Auswahlentscheidungen anzubieten. Vielmehr sollte die Struktur der Rechtfertigung entschlüsselt werden, um so die Bedingungen identifizieren zu können, unter denen sich Standortausschlüsse nicht mehr sicherheitsbezogen rechtfertigen lassen.

- Dass Langzeitsicherheitsanalyse oder Operationalisierungen aufgrund von Ungewissheiten ungenau sein können, ist intuitiv verständlich. Tatsächlich ist es aber schwierig, die Bedeutung von „Genauigkeit“ für diesen Kontext widerspruchsfrei zu präzisieren. Das Rechtfertigungsmodell bemüht sich um eine solche Präzisierung.
- Die Vertrauenswürdigkeit sicherheitsanalytischer Aussagen hängt von der Qualität der eingesetzten sicherheitsanalytischen Werkzeuge ab. Wenig erforscht war aber bislang, wie diese Vertrauenswürdigkeit von der Qualität der Operationalisierung (also Messbarmachung) des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt abhängt. Aus diesem Grund nimmt die Operationalisierung im Rechtfertigungsmodell einen größeren Raum ein.
- Über den Dosisindikator wurde in der Vergangenheit ausgesagt, dass er nicht den Zweck hätte, Vorhersagen zu treffen (*Ewing & Grambow 2025*) bzw. Sicherheit zu messen (*OECD-NEA 2002*). Hierbei handelt es sich um eine negative Charakterisierung des Dosisindikators, die lediglich aussagt, was dieser Indikator nicht vermag. Wie *Navarro (2025b)* aufzeigte, gab es bislang keinen befriedigenden Versuch, diese negative Charakterisierung durch eine positive Charakterisierung zu ersetzen, bei der deutlich wird, was Dosisindikatoren tatsächlich leisten können. Das Rechtfertigungsmodell bietet eine solche positive Charakterisierung an. Demnach können abgeschätzte Dosiswerte durchaus als Vorhersagen verstanden werden, deren Qualität allerdings unterschiedlich ausfallen kann.

Die folgende Modellbeschreibung wird den Begriff des Nachweises verwenden, der auch im StandAG benutzt wird („Nachweiszeitraum“, „Nachweises des sicheren Einschlusses“). Dazu sei angemerkt, dass der Begriff des Nachweises im Kontext der Langzeitsicherheitsbewertung heute oft vermieden wird. Bis zur Mitte der 2010er-Jahre war es noch üblich, von einem Langzeitsicherheits*nachweis* zu sprechen (*ESK 2013; Bracke et al. 2016; Jahn et al. 2016; Larue et al. 2015*). Später ging man dazu über, diesen Begriff durch den der Langzeitsicherheits*bewertung* zu ersetzen, möglicherweise, um den falschen Eindruck zu vermeiden, dass es sich bei dem Nachweis um einen strengen Beweis handeln könne. Für den Zweck der folgenden Modellbeschreibung ist die Ersetzung von „Nachweis“ durch „Bewertung“ jedoch problematisch, weil „Bewertung“ nichts darüber aussagt, ob eine Hypothese bzw. welche Hypothese getestet wird. Ein Sicherheits*nachweis* testet die Hypothese, dass ein System sicher ist, ein Unsicherheits*nachweis*, die Hypothese, dass es unsicher ist. Bei einer Sicherheits- oder Unsicherheits*bewertung* wäre hingegen unklar, welche oder ob überhaupt eine Hypothese getestet wird. Da es bei der Modellbeschreibung notwendig sein wird, Hypothesen zu benennen, kann der Begriff des Nachweises hier nicht völlig vermieden werden. Im Übrigen lässt sich der Begriff des Nachweises auch dann anwenden, wenn es sich nicht um einen strengen Beweis handelt, sondern um ein schwächeres Beweisverfahren, wie etwa um eines, das sich auf Wahrscheinlichkeiten oder Vertrauensgrade stützt.

6.2 Grundzüge der Modellkonstruktion

Das Rechtfertigungsmodell von *Navarro (2025b)* nimmt an, dass Standortausschlüsse gerechtfertigt sind, wenn es ein sicherheitsbezogenes logisches Argument für den Ausschluss gibt.⁸ Es betrachtet die folgenden vier Ausschlussgründe, über deren Akzeptabilität entschieden werden muss:

1. Ein Standort kann ausgeschlossen werden, wenn er ein unzureichendes Schutzniveau (bzw. Sicherheitsniveau) besitzt.
2. Ein Standort kann ausgeschlossen werden, wenn sich nicht nachweisen lässt, dass er ein ausreichendes Schutzniveau besitzt.
3. Ein Standort kann ausgeschlossen werden, wenn es andere Standorte gibt, die ein höheres Schutzniveau besitzen.
4. Ein Standort kann ausgeschlossen werden, wenn die systemspezifischen Bedingungen der Sicherheitserzeugung nicht akzeptabel sind.

Die Ausschlussgründe 1 bis 3 beziehen sich auf das absolute oder relative Sicherheitsniveau von Standorten. Ausschlussgrund 4 unterscheidet sich hiervon. Er bezieht sich nicht auf Sicherheitsniveaus, sondern auf die systemspezifische Art und Weise, unter der Sicherheit hergestellt wird.

Ausgehend von diesen Ausschlussgründen formuliert das Rechtfertigungsmodell vier logische Ausschlussargumente (*rejection arguments*)⁹ und versucht die Bedingungen zu klären, unter denen diese Argumente stichhaltig werden. Hierzu werden verschiedene Hilfskonzepte eingeführt, wie etwa das der Sicherheitsdimension, mit dem die Modellbeschreibung im Folgenden beginnt.

6.3 Sicherheitsdimensionen

Langzeitsicherheit bezieht sich Deutschland auf den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt (siehe Kapitel 5). In der Regel konzentrieren sich Langzeitsicherheitsbewertungen auf das Schutzniveau. Es kann aber noch andere Bewertungsaspekte geben, die sich nicht auf das Schutzniveau beziehen. *Navarro (2025b)* nennt diese *Sicherheitsdimensionen (safety dimensions)* und identifiziert insgesamt drei Sicherheitsdimensionen der Langzeitsicherheit.

⁸ Dies ist keine notwendige Bedingung, denn Standortausschlüsse können auch durch Argumente gerechtfertigt werden, die sich nicht auf die Sicherheit beziehen.

⁹ Eingeklammerte Begriffe aus *Navarro (2025b)*.

1. Das Schutz- bzw. Sicherheitsniveau.
2. Die systemspezifischen Umstände der Sicherheitserzeugung.

Dass eine solche Sicherheitsdimension auch in Deutschland regulatorisch verankert ist, zeigt die Forderung nach einem sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle (§ 4 EndlSiAnfV). Diese Forderung drückt die Ablehnung von Sicherheitskonzepten aus, welche eine Langzeitsicherheit schwerpunktmäßig über eine Verdünnung und Dispersion der Radionuklide erreichen wollen. Die Forderung gilt unbedingt, also selbst dann, wenn über Verdünnung und Dispersion ein ausreichender Schutz von Mensch und Umwelt erzielbar wäre. Somit sind die systemspezifischen Umstände der Sicherheitserzeugung nicht abhängig von Schutzniveau. Sie bilden vielmehr eine eigene Sicherheitsdimension.

3. Die Vertrauenswürdigkeit von Aussagen über das Schutzniveau.

Die Vertrauenswürdigkeit von Aussagen über das Schutzniveau kann auswahlentscheidend sein. Sie ist aber nicht vom tatsächlichen Schutzniveau eines Standortes abhängig. Daher bildet sie eine eigene Sicherheitsdimension.

Navarro (2025b) leitet aus diesen Sicherheitsdimensionen folgende Verfahrensziele ab.

1. Gewährleistung eines ausreichenden Schutzniveaus.
2. Gewährleistung, dass ein ausreichendes Schutzniveau nachgewiesen werden kann.
3. Maximierung des Schutzniveaus.
4. Gewährleistung, dass der Schutz von Mensch und Umwelt auf akzeptable Weise erreicht wird.

6.4 Ausschlussargumente

Anhand dieser Verfahrensziele wurden vier Argumente zur Rechtfertigung von Standortausschlüssen konstruiert. Diese Argumente sollen mithilfe des folgenden Darstellungsschemas notiert werden, bei dem zunächst die Voraussetzungen (Prämissen) und nach einem horizontalen Strich die Schlussfolgerung (Konklusion) aufgelistet werden:

Prämisse 1

Prämisse 2

...

Prämisse N

Schlussfolgerung

Lässt sich die Schlussfolgerung logisch aus einer UND-Verknüpfung (Konjunktion) der Prämissen ableiten, dann heißt das Argument *valide*. Sind zudem alle Prämissen wahr, dann ist auch die Schlussfolgerung wahr und das Argument heißt *stichhaltig*.

Navarro (2025b) betrachtete Standortausschlussentscheidungen als gerechtfertigt, wenn Ausschlussargumente *ausreichend stichhaltig* sind. Ausreichende Stichhaltigkeit sei dann gegeben, wenn die Schlussfolgerung logisch aus den Prämissen folge und wenn die Prämissen entweder wahr oder ausreichend wahrscheinlich seien. Dabei beschreibt er Wahrscheinlichkeiten als epistemische Wahrscheinlichkeiten, das heißt, als Grad des Vertrauens in die Wahrheit der Aussage.

6.4.1 Ausschluss wegen unzureichendem Schutzniveau

Standorte können ausgeschlossen werden, wenn ihr Sicherheitsniveau im regulatorischen Sinne unzureichend ist. Hierfür konstruierte Navarro (2025b) das folgende Ausschlussargument.

- (i) Der Ausschluss eines Standortes ist gerechtfertigt, wenn sein Schutzniveau unzureichend ist.
- (ii) Der sicherheitsbezogene Test T_{nc} , der *Unsicherheitstest (non-compliance test)* heißt, erzielt für den Standort S ein positives Ergebnis.
- (iii) Wenn der sicherheitsbezogene Test T_{nc} für den Standort S ein positives Ergebnis erzielt, ist dessen Schutzniveau unzureichend. (Operationalisierende Prämisse)

Schlussfolgerung: Der Ausschluss des Standortes S ist gerechtfertigt.

Die erste Prämisse wird wahr, wenn die Entscheidungsträgerinnen und -träger den Ausschlussgrund akzeptieren. Das Ausschlussargument ist also nur dann anwendbar.

Die folgenden zwei Prämissen stehen in engem Zusammenhang. Prämisse 2 stellt fest, dass ein sogenannter *sicherheitsbezogener Test (safety test)* ein positives Ergebnis erbringt. Nach Prämisse 3 steht ein positives Ergebnis für eine Bestätigung der Unsicherheit des Standortes, weshalb der Test *Unsicherheitstests (non-compliance test)* genannt wird. *Sicherheitsbezogene Tests* sind sicherheitsanalytische Bewertungen, die ein binäres Ergebnis erzeugen, das zur Entscheidungsfindung herangezogen wird.

Die dritte Prämisse sorgt dafür, dass nur positive Testergebnisse Konsequenzen haben: Bei positiven Ergebnissen wird der Standort ausgeschlossen, bei negativen verbleibt er im Verfahren.

Die dritte Prämisse nennt *Navarro (2025b)* eine *operationalisierende Prämisse (operationalizing premise)*, weil ihre Überprüfung einer Operationalisierung des Schutzniveaus bedarf. Die dritte Prämisse ist der problematischste Teil des Ausschlussargumentes. Sie besagt, dass von einem positiven sicherheitsanalytischen Testergebnis auf ein unzureichendes Schutzniveau geschlossen werden kann. Sie ist die Prämisse mit der größten Unsicherheit. Denn nach *Navarro (2025b)* gibt es immer eine Restunsicherheit, ob die eingesetzten sicherheitsanalytischen Methoden korrekt und angemessen waren. Nach *Navarro (2025b)* genügt es aber, wenn die dritte Prämisse ausreichend wahrscheinlich ist, wobei es sich um eine epistemische Wahrscheinlichkeit, also um einen Vertrauensgrad handelt.

Eine wichtige Anforderung an den Unsicherheitstest ist, dass er das Schutzniveau überschätzt und in diesem Sinne *antikonservativ* ist. Je größer diese Sicherheitsüberschätzung ist, desto wahrscheinlicher wird, dass das tatsächliche Schutzniveau unzureichend ist, wenn der Unsicherheitstests dies anzeigt. Die Anforderung der Antikonservativität ist insofern bemerkenswert, als sie im Widerspruch zur verbreiteten sicherheitsanalytischen Strategie der Konservativität steht.

6.4.2 Ausschluss wegen fehlender Nachweisbarkeit eines ausreichenden Schutzniveaus

Im Genehmigungsverfahren muss nachgewiesen werden, dass der finale Standort ein ausreichendes Schutzniveau besitzt. Standorte, die kein ausreichendes Schutzniveau aufweisen, können daher schon im Standortauswahlverfahren ausgeschlossen werden. Ein solcher Ausschluss dürfte unter anderem Endlagersysteme betreffen, die nur sehr konservativ bewertet werden können.

Navarro (2025b) führt zur Konstruktion eines Ausschlussarguments zunächst ein Genehmigungsargument ein:

- (i) Die Genehmigung eines Standortes ist gerechtfertigt, wenn sein Schutzniveau ausreichend hoch ist.
- (ii) Der sicherheitsbezogene Test T_c , der *Sicherheitstest (compliance test)* heißt, erzielt für den Standort S ein positives Ergebnis.
- (iii) Wenn der sicherheitsbezogene Test T_c für den Standort S ein positives Ergebnis erzielt, ist dessen Schutzniveau ausreichend hoch. (Operationalisierende Prämisse)

Schlussfolgerung: Die Genehmigung des Standortes S ist gerechtfertigt.

Die Nichtanwendbarkeit des Genehmigungsargumentes wird nun zum Ausschlussgrund. Dabei muss eine Abwägung zwischen zwei konkurrierenden Interessen getroffen werden: Auf der einen Seite soll vermieden werden, dass sichere Endlagersysteme als unsicher bewertet werden. Dazu müssten Ungewissheiten durch zusätzliche Anstrengungen bei der Standorterkundung, Forschung und Entwicklung reduziert werden. Auf der anderen Seite müssen diese zusätzlichen Anstrengungen in praktisch sinnvollen Grenzen gehalten werden. Das Ausschlussargument beschreibt diesen Interessenskonflikt wie folgt.

- (i) Der Ausschluss eines Standortes ist gerechtfertigt, wenn seine Genehmigung nicht innerhalb einer angemessenen Zeit und im Rahmen angemessener Ressourcen gerechtfertigt werden kann.
- (ii) In einem Genehmigungsverfahren lässt sich innerhalb einer angemessenen Zeit und unter Verwendung angemessener Ressourcen kein positiver Sicherheitstests für den Standort S erbringen.
- (iii) Wenn Prämisse 2 der Fall ist, dann kann die Genehmigung des Standortes S nicht gerechtfertigt werden.

Schlussfolgerung: Der Ausschluss des Standortes S ist gerechtfertigt.

Die operationalisierende Prämisse, die einen Zusammenhang zwischen Schutzniveau und sicherheitsanalytischem Ergebnis herstellt, ist die Prämisse 3 des Genehmigungsargumentes. Unsicher ist allerdings auch die zweite Prämisse des Ausschlussargumentes, denn es muss abgeschätzt werden, ob Sicherheitsnachweise in einem zukünftigen Genehmigungsverfahren möglich sind.

6.4.3 Ausschluss wegen geringerer Sicherheit

Das deutsche Standortauswahlverfahren strebt u. a. eine Maximierung der Sicherheit an (Kapitel 5.4). Es können deshalb Standorte ausgeschlossen werden, die weniger sicher sind als andere Standorte. Sicherheitsbezogene Tests, die dies

abprüfen, können unterschiedliche Formen annehmen. *Navarro (2025b)* unterscheidet hier zwischen *Suboptimalitäts-* und *Rangfolgentests*, die sich hinsichtlich in ihrer Wahrscheinlichkeit unterscheiden, falsche Negativbefunde zu liefern.

1. *Suboptimalitätstests* betrachten nur einen einzigen konkreten Standort und fragen: „Ist dieser Standort nicht optimal?“. Bei einer positiven Antwort soll der Standort ausgeschlossen werden. In der Regel nehmen Suboptimalitätstests die Form von Ausschlusskriterien für einen einzigen dominanten Indikator an. Sie können daher nur grobe Sicherheitseinschätzungen vornehmen. Deshalb müssen sie die Sicherheit des betrachteten Standortes relativ überschätzen (das heißt, antikonservativ sein), um zuverlässig feststellen zu können, dass ein Standort nicht optimal ist. Dadurch werden falsch negativer Ergebnisse wahrscheinlich.

Suboptimalitätstests könnten auch zur Einengung von Gebieten verwendet werden. In diesem Fall wird danach gefragt, ob die auszuschließenden Gebietsteile innerhalb des betreffenden Gebietes geringere Sicherheit haben.

1. *Rangfolgentest* vergleichen zwei konkrete Standorte A und B und fragen: „Ist A unsicherer als B?“. Ihr Ziel ist es, die Sicherheitsrangfolge der beiden Standorte zu bestimmen. Rangfolgentests müssen daher im Gegensatz zu Suboptimalitätstests auch eine geringe Wahrscheinlichkeit falsch negativer Ergebnisse aufweisen. Das ist nur über genauere, standortspezifische Langzeitsicherheitsbewertungen erreichbar. Es gelten also höhere Genauigkeitsanforderungen als bei Suboptimalitätstests.

Eine wichtige Annahme des Rechtfertigungsmodells ist, dass Sicherheitsrangfolgen nur von den sich unterscheidenden Eigenschaften der Standorte oder ihrer Sicherheitsbewertungen abhängen.

Das folgende Ausschlussargument kann für beide Testtypen verwendet werden (*Navarro 2025b*).

- (i) Der Ausschluss eines Standortes ist gerechtfertigt, wenn es einen anderen Standort gibt, dessen Schutzniveau höher ist.
- (ii) Der sicherheitsbezogene Test T_{no} , der entweder *Suboptimalitätstest* oder *Rangfolgentest* heißt, erzielt für den Standort S ein positives Ergebnis.
- (iii) Wenn der sicherheitsbezogene Test T_{no} für den Standort S ein positives Ergebnis erzielt, dann gibt es einen anderen Standort, dessen Schutzniveau höher ist. (Operationalisierende Prämisse)

Schlussfolgerung: Der Ausschluss des Standortes S ist gerechtfertigt.

6.4.4 Ausschluss wegen Konzeptverstößen

Die systemspezifischen Umstände der Sicherheitserzeugung stellt eine eigene Sicherheitsdimension dar (Kapitel 6.3). Es ist grundsätzlich möglich, die Umstände der Sicherheitserzeugung mit Anforderungen zu belegen. Diese nennt Navarro (2025b) konzeptuelle Anforderungen (*conceptual requirements*). Sie können sowohl das Sicherheits- und Endlagerkonzept betreffen als auch systemspezifische Ungewissheiten oder die an einem Standort erwarteten Umwelteinflüsse. Beispielsweise könnte die Anforderung gestellt werden, dass es nicht zu große Ungewissheiten bezüglich der Transportprozesse im Endlager geben darf.

Es ist nicht ausgeschlossen, dass Entscheidungsträgerinnen und -trägern einen Zusammenhang zwischen konzeptionelle Anforderungen und dem Schutzniveau eines Endlagersystems sehen. Zum Beispiel könnten sie einen Verstoß gegen konzeptionelle Anforderungen als Zeichen für ein unzureichendes Schutzniveau betrachten. Dieser Fall kann bereits durch das in Kapitel 6.4.1 aufgeführte Ausschlussargument behandelt werden, da sich mit den konzeptionellen Anforderungen ein Unsicherheitstests konstruieren lässt.

Anders verhält es sich, wenn die konzeptionellen Anforderungen *unbedingt* gelten, also selbst dann, wenn der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet wäre. In diesem Fall wird ein eigenes Ausschlussargument benötigt. Diese verwendet einen *Test auf Konzeptverstöße* (Navarro 2025b):

- (i) Der Ausschluss eines Standortes ist gerechtfertigt, wenn die Bedingungen, unter denen ein ausreichendes Schutzniveau erzielt wird, nicht akzeptabel sind.
- (ii) Der sicherheitsbezogene Test T_{cv} , der *Test auf Konzeptverstöße* (*concept violation test*) heißt, erzielt für den Standort S ein positives Ergebnis.
- (iii) Wenn der sicherheitsbezogene Test T_{cv} für den Standort S ein positives Ergebnis erzielt, dann sind die Bedingungen, unter denen ein ausreichendes Schutzniveau erzielt wird, nicht akzeptabel.

Schlussfolgerung: Der Ausschluss des Standortes S ist gerechtfertigt.

Prämisse 1 ist nur dann akzeptabel, wenn die sicherheitsbezogenen konzeptionellen Anforderungen konsensual sind. Bei Prämisse 3 handelt es sich nur dann um eine operationalisierende Prämisse, wenn der sicherheitsbezogene Test Indikatoren verwendet, die nicht direkt gemessen werden können.

6.5 Operationale Definition des Schutzniveaus

Standortausschlüsse stützen sich im Rechtfertigungsmodell auf Aussagen zum Schutzniveau, welches in Deutschland mit zukünftigen Strahlenexpositionen in Verbindung gebracht wird (Kapitel 5.1). Die Rechtfertigung von Standortausschlüssen hängt also von der Vertrauenswürdigkeit dieser Aussagen ab. Letztere wäre zum Beispiel gering, wenn die verwendeten Indikatoren ungeeignet wären, zukünftige Strahlenexpositionen abzuschätzen. Es muss also dafür gesorgt werden, dass die Operationalisierung des Schutzniveaus (mittels Indikatoren) eine ausreichende Genauigkeit besitzt.

Im Rechtfertigungsmodell (*Navarro 2025b*) sind die Indikatoren Teile der operationalen Definition des Schutzniveaus. Diese Definition hat deskriptiven Charakter, weil sie sowohl das herrschende Sicherheitsverständnis als auch die kausalen Ursachen der Schutzniveaus beschreibt.

Zentraler Bestandteil der operationalen Definition des Schutzniveaus sind die Indikatoren. Dabei kann es sich nur um einen einzelnen Indikator handeln (z. B. ein Dosisindikator) oder um einen Satz von Indikatoren (z. B. Indikatoren für den Erfüllungsgrad von Sicherheitsfunktionen). Finden mehrere Indikatoren Verwendung, dann wird eine Aggregierungsregel benötigt, die dem Indikatorsatz ein eindeutiges Sicherheitsniveau zuweist.

Darüber können komplementäre Indikatoren bzw. Indikatorsätze verwendet werden. Beispiele für komplementäre Indikatoren sind die Austragsindikatoren aus § 4 EndlSiAnfV und die Dosisindikatoren aus § 7 EndlSiAnfV. Sie sind komplementär, weil die spezifischen Nachteile der einen Indikatorgruppe durch die spezifischen Vorteile der anderen Gruppe ausgeglichen werden können. So haben Dosisindikatoren gegenüber Austragsindikatoren den Vorteil, dass sie den Schutz von Mensch und Umwelt direkter bemessen; Austragsindikatoren können dagegen die Funktionsfähigkeit des Endlagers direkter bewerten, weil sie – anders Dosisindikatoren – nicht von den Ungewissheiten des Radionuklidtransports im Deckgebirge und in der Biosphäre abhängen. Beide Indikatoren komplementieren sich also, um eine umfassendere Bewertung zu ermöglichen. Komplementäre Indikatoren oder Indikatorsätze können allerdings auch zu unterschiedlichen Bewertungen des Sicherheitsniveaus führen. Sie benötigen infolgedessen eine zusätzliche Aggregierungsregel, um aus den einzelnen Sicherheitsniveaus ein eindeutiges Sicherheits- bzw. Schutzniveau abzuleiten.

Die operationale Definition des Schutzniveaus muss auch festlegen, wie unzureichende und ausreichende Sicherheit bestimmt werden soll. Sie kann auch Angaben zur Wichtigkeit bestimmter Sicherheitsfaktoren enthalten sowie bestimmte sicherheitsanalytische Bewertungsmethoden vorgeben. Beispielsweise könnte gefordert werden, dass Sicherheitsreserven für hypothetischen Entwick-

lungen positiv in die Sicherheitsbewertung einfließen sollen. Für eine genauere Auflistung dieser Elemente sei auf *Navarro (2025b)* verwiesen.

Im Rechtfertigungsmodell besitzt die operationale Definition des Schutzniveaus eine Genauigkeit. Diese ist der Grad des Vertrauens, dass die Indikatoren und Aggregationsregeln der Operationalisierung im Rahmen des anzuwendenden Ausschlussargumentes zuverlässige Aussagen über das Schutzniveau erlauben. Die nachfolgenden Kapitel werden einige Hilfskonzepte einführen, mit denen die Genauigkeit der operationalen Definition des Schutzniveaus präzisiert werden soll.

6.6 Operationalisierende Postulate

Die Indikatoren der operationalen Definition des Schutzniveaus rechtfertigen sich nicht zuletzt über eine kausale Beziehung zu diesem Schutzniveau. Beispielsweise kommt ein Austragsindikator deshalb als Indikator in Frage, weil der Einschluss von Radionukliden in den wesentlichen Barrieren zukünftige Strahlenexpositionen physikalisch begrenzt. *Navarro (2025b)* weist allerdings darauf hin, dass Kausalbeziehungen die Beziehung zwischen den Indikatoren und dem Schutzniveau nicht vollständig erklären können und illustriert dies am Beispiel des Dosisindikators. Eine Schwierigkeit des Dosisindikators liegt darin, dass Dosisgrenzwerte, die in heutiger Zeit adäquat sind, nicht zwingend auch in Zukunft adäquat sein müssen. Das erschwert die Herstellung eines kausalen Zusammenhangs zwischen Dosisindikator und Schutzniveau.

Navarro (2025b) nimmt deshalb an, dass bestimmte Annahmen akzeptiert werden müssen, die eine Verbindung zwischen Indikator und Schutzniveau herstellen. Er nennt diese Annahmen *operationalisierende Postulate (operationalizing postulates)*. Dosisindikatoren beispielsweise erfordern das operationalisierende Postulat einer zeitlichen Konstanz der Bewertungsmaßstäbe, die durch konstante Dosisgrenzwerte vorgegeben werden. Dieses Postulat rechtfertigt, warum heutige Schutzmaßstäbe auch für die Zukunft angesetzt werden dürfen.

Nach *Navarro (2025b)* müssen operationalisierende Postulate nicht wahr sein. Es genügt, wenn sie akzeptiert werden. Für diese Akzeptanz kann es verschiedene Gründe geben. Beispielsweise könnte das Postulat als ausreichend genaue Näherung des tatsächlichen Sachverhaltes angesehen werden. Alternativ könnte es als „kleineres Übel“ Akzeptanz finden, wenn ein Verzicht auf das Postulat die Unmöglichkeit von Sicherheitsbewertungen zur Folge hätte.

6.7 Systemverständnis

Der Zusammenhang zwischen Indikatoren und Schutzniveau sollte soweit wie möglich kausaler Natur sein. Kausale Zusammenhänge können aber nur eingeschätzt werden, wenn ein ausreichendes Systemverständnis vorliegt. Das Rechtfertigungsmodell beschreibt das Systemverständnis als Menge von Aussagen über empirisches Wissen und akzeptierte Theorien und Modellen für das betrachtete Endlagersystem.

Das Systemverständnis kann inkonsistent sein. Als Grund nennt *Navarro (2025b)*, dass die im Systemverständnis enthaltenen Modelle und Theorien Idealisierungen und Vereinfachungen beinhalten können, die dem empirischen Wissen widersprechen. Zum anderen sei das Systemverständnis nicht das Wissen eines einzelnen Menschen, sondern das Wissen eines Kollektivs, dessen einzelne Wissensbeiträge sich in Teilen widersprechen können. Somit könne vom Systemverständnis keine Widerspruchsfreiheit verlangt werden.

Das Rechtfertigungsmodell beschreibt die Adäquatheit des Systemverständnisses als die epistemische Wahrscheinlichkeit (also als den Vertrauensgrad), dass derjenige Teil des Systemverständnisses, der zur Stützung eines Ausschlussarguments benötigt wird, ausreichend gerechtfertigt ist. Diese Rechtfertigung muss empirische Befunde einbeziehen sowie die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass wichtige empirische Befunde immer noch fehlen.

6.8 Genauigkeit der operationalen Definition des Schutzniveaus

Mit dem Konstrukt des operationalisierenden Postulates und des Systemverständnisses kann nun die Genauigkeit der operationalen Definition des Schutzniveaus beschrieben werden. *Navarro (2025b)* definiert diese als die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass alle der folgenden Bedingungen erfüllt sind.

1. Die operationalisierenden Postulate sind akzeptabel und das Systemverständnis ist ausreichend adäquat.
2. Die Indikatoren, Aggregierungsregeln, Methoden und verpflichtenden Sicherheitsfaktoren der operationalen Definition des Schutzniveaus sind über das Systemverständnis und die operationalisierenden Postulate ausreichend gerechtfertigt.
3. Die in der operationalen Definition des Schutzniveau möglicherweise enthaltenen vorgeschriebenen Sicherheitsfaktoren werden durch die Indikatoren,

Aggregierungsregeln und Evaluierungsmethoden erfasst und ihrer physikalischen Relevanz gemäß bewertet.

4. Nach dem bestehenden Systemverständnis berücksichtigen die vorgeschriebenen Sicherheitsfaktoren und evaluierten Indikatoren alle Sicherheitsursachen, die für das anzuwendende Ausschlussargument berücksichtigt werden müssen.

Ein adäquates Systemverständnis ist also eine Voraussetzung für eine adäquate Operationalisierung des Schutzniveaus. Auch müssen sich die Entscheidungsträgerinnen und -träger über die Akzeptabilität der operationalisierenden Postulate einig sein.

Bedingung 4 zielt auf die argumentabhängige Vollständigkeit der operationalen Definition des Schutzniveaus ab. Manche Ausschlussargumente erlauben, dass bestimmte Sicherheitsursachen ignoriert werden. Beispielsweise dürfen Unsicherheitstests negative Sicherheitsfaktoren ignorieren, weil sie dadurch antikonservativer werden. Die Genauigkeit der Operationalisierung ist also von dem anzuwendenden Ausschlussargument abhängig.

6.9 Genauigkeit sicherheitsbezogener Tests

Die Wahrscheinlichkeit, dass die operationalisierenden Prämissen der Ausschlussargumente wahr sind, hängt von der Genauigkeit der sicherheitsbezogenen Tests ab. Das Rechtfertigungsmodell beschreibt die Testgenauigkeit als epistemische Wahrscheinlichkeit, dass der Tests valide, objektiv und zuverlässig ist. Testvalidität, -objektivität und -zuverlässigkeit werden dabei in folgender Weise definiert (Navarro 2025b):

- Die *Validität eines sicherheitsbezogenen Tests* ist die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass Folgendes wahr ist:
 - Die operationalisierende Prämisse ist nicht nur deshalb falsch,¹⁰ weil der Test nicht das bewertet, was er entsprechend der operationalen Definition des Schutzniveaus bzw. entsprechend gegebener konzeptioneller Anforderungen bewerten sollte.
 - Derjenige Teil des Systemverständnisses, der benötigt wird, um zu verstehen, wie Abweichungen von dem, was eigentlich gemessen werden sollte,

¹⁰ Aus der Validität eines Tests folgt noch nicht, dass die operationalisierende Prämisse wahr ist, denn diese kann auch wegen einer unzureichenden Objektivität oder Zuverlässigkeit des Tests falsch sein. Die hier vorgeschlagene Definition der Validität verlangt deshalb nur, dass Abweichungen der Bewertung von dem, was eigentlich bewertet werden sollte, die operationalisierende Prämisse nicht aus eigener Kraft falsch machen („ist nicht nur deshalb falsch“).

sich auf die Bewertung des Schutzniveaus auswirken, ist ausreichend adäquat.

- Die *Objektivität eines sicherheitsbezogenen Tests* ist die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass Folgendes wahr ist:
 - Die operationalisierende Prämisse ist nicht nur wegen subjektiver Annahmen falsch.
 - Derjenige Teil des Systemverständnisses, welcher benötigt wird, um zu verstehen, wie sich subjektive Annahmen auf die Bewertung des Schutzniveaus auswirken, ist ausreichend adäquat.
- Die *Zuverlässigkeit eines sicherheitsbezogenen Tests* ist die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass Folgendes wahr ist:
 - Die operationalisierende Prämisse ist nicht nur wegen der gegebenen Ungewissheiten falsch.
 - Derjenige Teil des Systemverständnisses, welcher benötigt wird, um zu verstehen, wie sich die gegebenen Ungewissheiten auf die Bewertung des Schutzniveaus auswirken, ist ausreichend adäquat.

Validität, Objektivität und Zuverlässigkeit werden hier also auf die operationalisierende Prämisse eines Ausschlussarguments ausgerichtet. Das bedeutet zum einen, dass der Anwendungskontext über die Anforderungen entscheidet, die an einen sicherheitsbezogenen Test zu stellen sind. Zum anderen bedeutet es, dass nicht alle subjektiven Annahmen und Ungewissheiten problematisch sind, sondern nur solche, welche die Wahrscheinlichkeit der operationalisierenden Prämissen erniedrigen. So sind beispielsweise Sicherheitsnachweise gegenüber dem systematischen Fehler einer Sicherheitsunterschätzung tolerant.

6.10 Epistemische Wahrscheinlichkeit operationalisierender Prämissen

Mit den eingeführten Konstrukten kann nun die Wahrscheinlichkeit der operationalisierenden Prämissen bestimmt werden. *Navarro (2025b)* definiert diese als die epistemische Wahrscheinlichkeit, dass

1. die operationale Definition des objektiven Sicherheitsniveaus ausreichend genau ist, und dass
2. der betreffende sicherheitsbezogene Test ausreichend genau, das heißt, ausreichend valide, objektiv und zuverlässig ist.

6.11 Praktische Schlussfolgerungen

Im Folgenden werden wichtigste allgemeinen Schlussfolgerungen aus *Navarro (2025b)* zusammengefasst. Eine Einordnung für das deutsche Standortauswahlverfahren erfolgt in Kapitel 8 im Rahmen der abschließenden Schlussfolgerungen.

1. Unsicherheitstests dürften in der Praxis überwiegend die Form von Ausschlusskriterien annehmen. Ausschlusskriterien sind umso antikonservativer je weniger Standorte sie ausschließen können. Werden Ausschlusskriterien so modifiziert, dass sie mehr Standorte ausschließen können, dann sinkt ihre Antikonservativität und somit ihre Zuverlässigkeit beim Nachweis eines unzureichenden oder geringeren Sicherheitsniveaus. Damit sinkt auch die Stichtichtigkeit des jeweiligen Ausschlussarguments.
2. Ausschlüsse wegen fehlender Nachweisbarkeit eines ausreichenden Schutzniveaus (Kapitel 6.4.2) dürften in der frühen Phase eines Standortauswahlverfahrens nur selten möglich sein. Das liegt daran, dass für das Ausschlussargument die fehlende Nachweisbarkeit *im Genehmigungsverfahren* entscheidend ist und nicht die fehlende Nachweisbarkeit im Standortauswahlverfahren. Erstere ergibt sich nicht zwangsläufig aus Letzterer, da im Genehmigungsverfahren alle Ressourcen auf den finalen Standort konzentriert werden können, um Ungewissheiten und Konservativitäten abzubauen und Sicherheitsnachweise möglich zu machen.
3. Sicherheitsrangfolgen hängen nicht von Eigenschaften der Standorte bzw. deren Sicherheitsbewertung ab, die bei den verglichenen Standorten dieselbe Sicherheitswirkung entfalten. Das hat zwei wichtige Konsequenzen:
 - 3.1 Sicherheitsvergleiche werden umso einfacher, je mehr sich die Endlagersysteme hinsichtlich ihrer Sicherheitsfaktoren und deren Sicherheitswirkung ähneln.
 - 3.2 Sicherheitsanalytische Bewertungsfehler, Konservativitäten oder Antikonservativitäten nehmen keinen Einfluss auf die Sicherheitsdifferenz, wenn sie bei allen verglichenen Endlagersystemen auftreten und dort dieselbe Sicherheitswirkung entfalten.
4. Es ist wahrscheinlich, dass teilweise falsch eingeschätzt wird, welche Eigenschaften, Zustände und Entwicklungen ein Endlagersystem tatsächlich realisieren kann. Deshalb ist es nicht unwahrscheinlich, dass bei der Szenarientwicklung teilweise auch Annahmen getroffen werden, die das System nicht realisieren kann und somit unmöglich sind. Die unbeabsichtigte Bewertung unmöglicher Systementwicklungen erzeugt bei der Systembewertung einen nichtquantifizierbaren Fehler. Dieser Fehler ist bei Sicherheitsvergleichen nur dann irrelevant, wenn der Fehler bei allen verglichenen Systemen auftritt und

dort dieselbe Sicherheitswirkung besitzt. Hiervon kann nicht ausgegangen werden, wenn die verglichenen Endlagersysteme sich so wenig ähneln, dass zu ihrer Bewertung unterschiedliche Szenariensätze verwendet werden müssen oder wenn zwar gleiche Szenarien verwendet werden können, diese aber unterschiedlich wahrscheinlich sind. Unter diesen Umständen können Indikatoren, die mithilfe von Szenarientwicklungen evaluiert werden müssen (*prognostic indicators*), Sicherheitsrangfolgen nicht zuverlässig bestimmen. Dies betrifft u. a. auch Dosisindikatoren.

5. Indikatoren, deren Evaluation keine Szenarientwicklung benötigt (*non-prognostic indicators*), sind von der erwähnten, nichtquantifizierbaren Fehlbeurteilung von Systemmöglichkeiten weitaus weniger betroffen. Somit entfällt bei ihnen ein wichtiges Argument gegen ihren Einsatz beim Vergleich unähnlicher Systeme. Allerdings besitzt diese Indikatorgruppe im Vergleich zur Gruppe der *prognostic indicators* eine größere Operationalisierungsungenauigkeit. Wenn Entscheidungsträgerinnen und -träger diese Ungenauigkeit nicht akzeptieren, dann ist ebenfalls keine Rangfolgenbestimmung möglich.
6. Rangfolgenbestimmung für Standorte mit unterschiedlichen Sicherheitskonzepten (dies beinhaltet insbesondere auch wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche) sind grundsätzlich nicht möglich, wenn Entscheidungsträger und -trägerinnen die Auffassung vertreten, dass unterschiedliche Sicherheitskonzepte prinzipiell nicht vergleichbar seien. Es gibt dann keinen Bewertungsmaßstab für einen solchen Vergleich.
7. Ausschlusskriterien, die ursprünglich als Unsicherheitstests oder Suboptimalitätstests gedacht waren, bei denen sich aber herausstellt, dass sie als solche unzuverlässig wären, können immer zu Tests auf Konzeptverstöße umgedeutet werden.¹¹
8. Konzeptuelle Anforderungen können auch zum Ausschluss ganzer Sicherheitskonzepte verwendet werden, wenn konsensuale Präferenzen für oder gegen bestimmte Sicherheitskonzepte identifiziert werden können.
9. Konzeptuelle Anforderungen an ein Endlagersystem, die unabhängig vom Sicherheitsniveau des Systems gestellt werden, bergen ein gewisses Risiko, Standorte mit hohem Sicherheitsniveau auszuschließen. Dieser Umstand und

¹¹ Dass dies möglich ist, liegt daran, dass Ausschlusskriterien verschiedene Begründungen haben können. Deshalb könnte beispielsweise das Ausschlusskriterium „Vorhandensein von Störungszonen“ wahlweise ein Unsicherheitstest („der Standort ist dann wahrscheinlich unsicher“), ein Suboptimalitätstest („es gibt dann wahrscheinlich Standorte mit größerer Sicherheit“) oder ein Test auf Konzeptverstöße sein („eine Endlagerung in Gebieten mit Störungszonen ist kein akzeptables Entsorgungskonzept“).

die Notwendigkeit einer Konsensbildung setzen der Anwendung konzeptueller Anforderungen praktische Grenzen.

Die unter Punkt 4 aufgeführte Argumentation aus *Navarro (2025b)* lässt sich im Übrigen auch auf konservative Bewertungen übertragen. Wenn Endlagersysteme so unähnlich sind, dass sie mit unterschiedlichen konservativen Annahmen bewertet werden müssen, dann werden diese konservativen Annahmen vergleichsrelevant. Konservativ evaluierte Indikatoren, bei denen sich das Ausmaß der Konservativität nicht quantifizierbar lässt (was oft der Fall sein dürfte), können unter diesen Umständen keine Sicherheitsrangfolgen bestimmen.

7 Operationalisierungen

Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt kann auf unterschiedliche Weisen operationalisiert, das heißt, messbar gemacht werden. Die Indikatoren der Langzeitsicherheitsbewertung stehen im Zentrum der Operationalisierung (Kapitel 6.5). Ob es bestimmte Indikatorgruppen mit charakteristischen Merkmalen und Anwendungsbeschränkungen gibt, ist Thema des vorliegenden Kapitels.

Wenn zur Langzeitsicherheitsbewertung mehrere Indikatoren verwendet werden, dann benötigen sie eine Aggregierungsregel. Sowohl die Endlagerkommission (*EndKom 2016f*) als auch die Gesetzesbegründung zu Abs. 1 StandAG (*BT 2017*) äußerten Kritik an bestimmten Formen der Aggregation. Weil diese Kritik die Möglichkeiten der Operationalisierung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt stark einschränken würde, wird sie in Kapitel 7.1 näher untersucht. Kapitel 7.2 beschäftigt sich mit wichtigen Ursachen für nichtquantifizierbare Fehler bei der Bestimmung von Indikatorwerten.

Kapitel 7.3 führt drei problemorientierte Klassifizierungen für Indikatoren ein, um allgemeine Anwendungsbeschränkungen aufzuzeigen. Kapitel 7.4 erläutert, wie sich das Anwendungsfeld von Indikatoren mithilfe dieser Klassifizierungen eingrenzen lässt. Abschließend wird Kapitel 7.5 die Konzepte der Robustheit und der Sicherheitsreserve analysieren und deren Eignung für Sicherheitsvergleiche untersuchen.

7.1 Formale und kompensatorische Aggregierungen

Die Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind Beispiele für Indikatoren, die für sich alleine noch keine Aussage über das Endlagersystem zulassen und daher gewichtet und verknüpft werden müssen. Auf welche Weise gewichtet und verknüpft wird, wird durch eine Aggregierungsregel beschrieben.

Aggregierungsregeln heißen kompensatorisch, wenn sie zulassen, dass ungünstige Indikatorwerte durch günstige Indikatorwerte kompensiert werden. Die Endlagerkommission übte Kritik an einer kompensatorischen Aggregation (*EndKom 2016f*), eine Kritik, die hier genauer untersucht werden soll, weil der Verzicht auf kompensatorische Aggregierungen eine starke Einschränkung für die Operationalisierung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt bedeuten würde.

Die Endlagerkommission kritisierte genaugenommen nicht nur eine kompensatorische Aggregation, sondern auch eine formale Aggregation:

„Formale Aggregierungsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregierung der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend.“ (*EndKom 2016f*, S. 51)

Wir werden diese beiden Aspekte der formalen und der kompensatorischen Aggregierung separat betrachten. Beginnen wir mit der formalen Aggregierung.

Formale Aggregierung

Die Kritik an einer formalen Aggregierung findet sich in etwas anderer Form auch in der Gesetzesbegründung zu § 24 Abs. 1 StandAG. Sie äußert sie hier in dem Vorbehalt gegenüber einer rechnerischen Gesamtbewertung der Erfüllung der Abwägungskriterien (*BT 2017*), also gegenüber einer mathematisch-logisch formalisierten Aggregierung.

Die Endlagerkommission begründete ihre Kritik an einer formalen Aggregierung nicht explizit. Aus dem textlichen Zusammenhang des obigen Zitates erschließt sich jedoch, dass sie formale und insbesondere kompensatorische Aggregierungsregeln als intransparent ansah:

„In jedem Prozessschritt sind für die darin betrachteten Standortregionen und Standorte alle Anforderungen mit ihren zugehörigen Abwägungskriterien entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzuprüfen. Formale Aggregierungsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregierung der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend. Die Argumentationsschritte müssen sämtlich transparent sein und unterliegen den Nachprüfungen im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung.“ (*EndKom 2016f*, S. 50)

Auch in der Begründung zu § 24 Abs. 1 StandAG (*BT 2017*) wird nicht explizit erklärt, warum eine rechnerische (d. h. mathematisch-logisch formalisierte) Gesamtbewertung abgelehnt wird. Eine textliche Nähe zu einer Forderung nach einer (transparenten) Würdigung der Bedeutungen der einzelnen Abwägungskriterien ist hier aber ebenso zu finden:

“Eine rechnerische Gesamtbewertung der Erfüllung der Abwägungskriterien ist bewusst nicht vorgesehen. Bei der Abwägung zur Bewertung der geologischen Gesamtsituation ist die Bedeutung der jeweiligen Abwägungskriterien für einen spezifischen Standort und das dort vorgesehene Endlagersystem zu würdigen.” (*BT 2017*)

Der Hauptvorwurf gegen formale Aggregierungen scheint also derjenige zu sein, dass die Begründung der Abwägung nicht transparent vermittelt wird. Betrachten wir also den Zusammenhang zwischen Formalisierung und Intransparenz etwas genauer.

Zunächst lässt sich feststellen, dass Aggregierungsregeln durch Formalisierung eindeutig und nachvollziehbar werden. Es steht zu vermuten, dass die Endlagerkommission diesen offensichtlichen Vorteil einer Formalisierung nicht kritisieren wollte. Wahrscheinlicher ist, dass sich ihre Kritik gegen eine der Formalisierung möglicherweise nachfolgende intransparente *Automatisierung* der Aggregation richtete. Eine Gleichsetzung von „Formalisierung“ mit „Automatisierung“ findet sich im Übrigen auch bei *Fischer-Appelt & Baltés (2010, S. 15)*, wobei die Autoren eine Formalisierung als „Bewertung nach einem vorher festgelegten Handlungsablauf“ beschreiben. Der Formalisierungsbegriff zielt hier also auf einen automatisierten Prozess der Aggregation ab und weniger auf den formalen Charakter der Aggregierungsregel.

Automatisierungen von Aggregierungsvorgängen bergen in der Tat ein Risiko: Die mechanische Abarbeitung von Aggregierungsregeln kann dazu führen, dass ihre Begründung vergessen oder zumindest nicht mehr hinterfragt wird. Somit besteht ein erhöhtes Risiko, dass automatisierte Aggregierungsregeln intransparent bezüglich ihrer Begründung werden. Das macht es den Entscheidungsträgerinnen und -trägern schwer, die Angemessenheit einer Aggregierungsregel zu überprüfen. Dennoch müssen automatisierte Aggregierungsregeln nicht zwingend intransparent sein, wenn man ihre Begründungen gut dokumentiert und vermittelt.

Es gibt also Anhaltspunkte, dass die von der Endlagerkommission geäußerte und in der Begründung des StandAG zu findende Ablehnungen einer formalen Aggregation einer Präzisierung bedürfen. Präziser wäre wahrscheinlich, sie als Vorbehalt gegenüber automatisierten Aggregationen zu deuten.

Kompensatorische Aggregation

Sowohl *Fischer-Appelt & Baltés (2010)* als auch die Endlagerkommission lehnen eine kompensatorische Aggregation ab und fordern stattdessen eine verbal-argumentative Abwägung (*Fischer-Appelt & Baltés 2010, S. 15; EndKom 2016f, S. 297*). Da die Endlagerkommission die kompensatorische Aggregation in einem Zuge mit der formalen Aggregation ablehnt (*EndKom 2016f, S. 51*), dürfte der Grund für die Ablehnung ebenfalls darin liegen, dass diese Aggregierungsform als intransparent wahrgenommen wurde. Auch *Fischer-Appelt & Baltés (2010, S. 15)* machen deutlich, dass sie ein Verzicht auf eine kompensatorische Bewertung als notwendig ansahen, um den Anforderungen an die Transparenz des Vorgehens und die Nachvollziehbarkeit der Bewertungen gerecht zu werden. Betrachten wir daher einige Argumente, die dem entgegengehalten werden könnten.

- Eine kompensatorische Verrechnung kann nicht deshalb intransparent sein, weil sie eine Formalisierung erfordert. Wie oben dargelegt wurde, sind Formalisierungen kein unbedingtes Transparenzhindernis. Auch bei einer kompensatorischen Verrechnung könnte für Transparenz gesorgt werden, indem die Begründung der Verrechnungsregel gut dokumentiert und vermittelt wird.

- Auch nichtkompensatorische Aggregierungsregeln können intransparent sein. *Svenson (1979)* beschreibt beispielsweise die nichtkompensatorische *minimum difference lexicographic rule*. Hier wird beim Vergleich zweier Alternativen die Wertedifferenz der wichtigsten Zielgröße wahlentscheidend. Voraussetzung ist, dass die Differenz eine bestimmte Größe erreicht, ansonsten erfolgt die Auswahl anhand der nächstwichtigsten Zielgröße (und so weiter). Auch diese nichtkompensatorische Regel wird intransparent, wenn nicht dokumentiert wird, warum bestimmte Zielgrößen als wichtig und andere als vernachlässigbar eingestuft wurden. Nichtkompensatorische Aggregierungsregeln sind somit kein verlässlicher Schutz gegen Intransparenz.
- Bei einer anderen von *Svenson (1979)* beschriebenen, nichtkompensatorischen Regel – der Dominanzregel (*rule of dominance*) – wird eine Alternative genau dann ausgewählt, wenn sie bei keinem Indikator schlechter und bei mindestens einem besser abschneidet. Die Dominanzregel ist eine Ausnahme unter den nichtkompensatorischen Aggregierungsregeln, weil sie sämtliche Indikatoren eines Entscheidungsproblems betrachtet. Sie führt allerdings nur dann zu einer Entscheidung, wenn es einen dominanten Indikator gibt. Daher dürfte sie in der Praxis nur selten anwendbar sein. Andere nichtkompensatorischen Aggregierungsregeln fragen – im Gegensatz zur Dominanzregel – nicht sämtliche Indikatoren ab. Sie wählen vielmehr bestimmte Indikatoren aus und ignorieren andere, etwa indem sie nur Indikatoren auswählen, die bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. Nichtkompensatorische Aggregierungsregeln sind somit in den meisten Fällen mit einem Informationsverlust verbunden (siehe auch *Berkeley et al. 1991, S. 62*).

Dieser Informationsverlust ist nur dann tolerabel, wenn die ignorierten Indikatoren irrelevant sind. Das lässt sich bei Langzeitsicherheitsbewertungen jedoch nicht garantieren: Hier können Indikatoren durchaus ähnliche Relevanz oder ein unklares Relevanzverhältnis besitzen. In diesem Falle wäre der selektive Charakter nichtkompensatorischer Aggregierungsregeln nicht angemessen. Nichtkompensatorische Aggregierungsregeln sollten daher im Standortauswahlverfahren keine unbedingte Forderung sein.

- Auch eine verbal-argumentative Argumentation kann intransparent sein, wenn Entscheidungspräferenzen nicht genau herausgearbeitet und dokumentiert werden.
- Der regulatorische Begriff des Abwägungskriteriums (§ 24 StandAG) legt nahe, dass ein Abwägen von Vor- und Nachteilen – also eine kompensatorische Aggregation – eigentlich regulatorisch erwünscht ist, auch wenn die Begründung des StandAG Gegenteiliges äußert. Auch die Endlagerkommission stellte bezüglich der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien fest: „Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich also nicht aus der besonders guten Erfüllung eines einzelnen Kriteriums, sondern aus der Summe der

Erfüllung (bzw. Erfüllungsgrade) aller Anforderungen und deren Kriterien.“ (EndKom 2016f, S. 297). Eine Summierung von Erfüllungsgraden ist aber eine kompensatorische Aggregierungsregel.

- Eine kompensatorische Bewertung von Sicherheitsfaktoren lässt sich nicht verhindern, wenn ihre Sicherheitswirkungen durch numerische Modelle bewertet werden. Die in den Modellen implementierten physikalischen negativen Wechselwirkungen (Gegenkopplungen) sind stets kompensatorisch. Beispielsweise kann bei der Modellierung des Radionuklidtransport eine hohe Permeabilität des durchströmten Mediums durch eine hohe Sorptionsfähigkeit kompensiert werden. Würde man die Sicherheitswirkungen von Permeabilität und Sorptionsfähigkeit nicht über ein numerisches Modell erfassen, sondern über Indikatoren, dann wäre eine kompensatorische Aggregierungsregel angemessener, um die sich kompensierenden physikalischen Mechanismen abzubilden.
- Verbal-argumentative Verfahren für Standortvergleiche, wie das von Fischer-Appelt & Baltés (2010) vorgeschlagene Verfahren, das den bewertenden Personen nur Indikatoren und Evaluierungsverfahren präsentiert, aber keine Aggregierungsregel festlegen, können nicht verhindern, dass diese kompensatorisch aggregieren. Insofern können verbal-argumentative Aggregierungen nicht als Gegenentwurf zu kompensatorischen Aggregierungen angesehen werden.

Es lässt sich also festhalten, dass kompensatorische Aggregierungsregeln nicht notwendigerweise intransparent sind und dass der Verzicht auf kompensatorische Aggregierungsregeln wahrscheinlich auch nicht im Einklang mit der regulatorischen Forderung nach einer Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien stünde.

Fazit

Der Abschlussbericht der Endlagerkommission (EndKom 2016f) und die Begründung des StandAG (BT 2017) fordern Transparenz bei der Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Sie drücken ferner die Auffassung aus, dass formale und kompensatorische Aggregierungsregeln intransparent und deswegen abzulehnen seien. Wie gezeigt wurde, sind formale und kompensatorische Aggregierungsregeln aber nicht notwendigerweise intransparent und ein Verzicht auf Formalisierung und Kompensation garantiert noch keine transparente Abwägung. Insofern dürfte es erwägenswert sein, auch formale und kompensatorische Aggregierungsregeln bei der Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in Betracht zu ziehen. Sie widersprechen dem eigentlichen regulatorischen Kernanliegen, transparent abzuwägen, nicht grundsätzlich. Aus sicherheitsanalytischer Perspektive wäre der Verzicht auf eine kompensatorische Aggregation sogar problematisch. Er geht mit einem Informationsverlust einher, der einer dif-

ferenzierte Sicherheitsbetrachtung entgegensteht, und ist auch nicht in der Lage, physikalische Kompensationswirkungen zu beschreiben.

Möglicherweise handelt es sich bei der erwähnten Ablehnung formaler und kompensatorischer Aggregierungsregeln eigentlich um eine Ablehnung automatisierter Aggregierungen. Bei automatisierten Aggregierungen herrscht sicherlich eine erhöhte Gefahr der Intransparenz. Dem ließe sich allerdings entgegenwirken, indem die Begründungen der automatisierten Aggregierungsregeln gut dokumentiert und vermittelt werden.

7.2 Nichtquantifizierbare Evaluierungsfehler

Für jeden Indikator müssen Indikatorwerte ermittelt werden, ein Vorgang, der hier die *Evaluierung* des Indikators genannt wird. Je nach Indikator kann die Wertermittlung unterschiedlich stark von Ungewissheiten betroffen sein. Stärker ungewiss ist sie dort, wo Indikatoren Ergebnisse von Systementwicklungen erfassen, wie das beispielsweise bei Dosisindikatoren der Fall ist, und deshalb über szenarienbasierte Modellierungen des Systemverhaltens evaluiert werden müssen. Es ist deshalb nicht zu erwarten, dass solche Indikatoren exakte Prognosen abliefern. Vielmehr weisen sie einen Evaluierungsfehler auf, der sich nicht objektiv quantifizieren lässt. Ein Grund dieser Nichtquantifizierbarkeit ist, dass die Prognosefehler nicht über einen Vergleich mit einer exakten Prognose bestimmt werden können, weil letztere nicht vorliegt. Weiterhin lässt sich der Prognosefehler wegen der großen Ungewissheiten bezüglich der wahren zukünftigen Systementwicklung auch nicht über statistische Inferenzen erschließen.

Wenn Evaluierungsfehler nicht quantifizierbar sind, das bedeutet das nicht, dass sich aus den betreffenden Indikatoren keine Sicherheitsaussagen ableiten lassen. Das liegt daran, dass es möglich ist, die Evaluierung auf Annahmen zu stützen, die insgesamt zu einer Unterschätzung der Sicherheit führen und in diesem Sinne *konservativ* sind. Mit dieser konservativen Bewertungsmethode lässt sich der Prognosefehler zwar immer noch nicht quantifizieren, aber es ist immerhin möglich, sein Vorzeichen festzulegen. Dies erlaubt die verlässliche Abschätzung einer Mindestsicherheit, was beispielsweise für die Prüfung der Genehmigungsfähigkeit eines Standortes ausreichend ist.

Wie im oben vorgestellten Rechtfertigungsmodell gezeigt wurde, sind Nachweise der Genehmigungsfähigkeit aber nur eingeschränkt in der Lage, Standortauschlüsse zu begründen (Kapitel 6.11). Stärker betroffen von nichtquantifizierbaren Evaluierungsfehlern sind Nachweise eines unzureichenden Schutzniveaus (Kapitel 6.4.1) oder die Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen (Kapitel 6.4.3). Erstere, weil sie keine konservativen Bewertungen tolerieren, zweitere, weil sie erhöhte Genauigkeitsansprüche stellen.

So besteht folgende Anwendungsbeschränkung für Indikatoren, deren Evaluierungsfehler *nichtquantifizierbar und konservativ* ist.

1. Ein verlässlicher Nachweis eines unzureichenden Sicherheitsniveaus, der einen Standortausschluss gemäß Kapitel 6.4.1 rechtfertigen könnte, lässt sich nicht erbringen, wenn alle der folgenden Voraussetzungen gegeben sind.

1.1 Das Sicherheitsniveau orientiert sich an zukünftigen Strahlenexpositionen (und erfordert deshalb eine Prognose)

1.2 Das Evaluierungsverfahren lässt sich nicht so gestalten, dass es das Sicherheitsniveau *überschätzt*, das heißt, antikonservativ ist (wie es das Ausschlussargument benötigt).

1.3 Der Prognosefehler lässt sich nicht quantifizieren (weshalb es nicht möglich ist, aus der konservativen Prognose die benötigte antikonservative Prognose abzuleiten).

Die folgende Anwendungsbeschränkung für Indikatoren, deren Evaluierungsfehler *nichtquantifizierbar* ist. Dies schließt die oben genannte Gruppe der Indikatoren ein, deren Evaluierungsfehler *nichtquantifizierbar und konservativ* ist.

2. Eine verlässliche Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen, die Ausschlüsse von Standorten mit geringerer Sicherheit gemäß Kapitel 6.4.3 rechtfertigen könnte, ist nicht möglich, wenn alle der folgenden Voraussetzungen gegeben sind.

2.1 Das Sicherheitsniveau orientiert sich an zukünftigen Strahlenexpositionen (und erfordert deshalb eine Prognose)

2.2 Der Prognosefehler lässt sich nicht quantifizieren (was auch auf konservative Prognosen zutrifft).

2.3 Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Prognosefehler bei den verglichenen Standorten unterschiedlich und damit vergleichsrelevant sind (dies betrifft vor allem Endlagersysteme bzw. Langzeitsicherheitsanalysen mit geringer Ähnlichkeit).

2.4 Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die absoluten Differenzen der Prognosefehler größer als die wahren absoluten Sicherheitsdifferenzen zwischen den verglichenen Endlagersystemen sind (dies ist vor allem dann zu erwarten, wenn die Standortselektion für ein Ausscheiden von Standorten mit größeren Sicherheitsdefiziten gesorgt hat).

Anwendungsbeschränkung 2 gilt generell für *nichtquantifizierbare* Evaluierungsfehler. Die Anwendungsbeschränkungen 1 und 2 gelten allgemein für *nichtquantifizierbare konservative* Evaluierungsfehler. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Beschränkungen nur wirksam werden, wenn alle ihre Voraussetzungen erfüllt sind.

7.3 Problemorientierte Indikatorklassifizierungen

Indikatoren werden üblicherweise in *safety*, *performance* und *safety function indicators* eingeteilt (OECD-NEA 2012a). Sie treffen Aussagen über die Sicherheit des Systems (*safety indicators*), die Funktionsweise des Systems oder seiner Teile (*performance indicators*) oder die Erfüllung der im Sicherheitskonzept definierten Sicherheitsfunktionen (*safety function indicators*). Die Einteilung in *safety*, *performance* und *safety function indicators* orientiert sich am Zweck der Langzeitsicherheitsbewertung, also daran, ob Sicherheitsniveaus bestimmt, Funktions- bzw. Wirkungsweisen verstanden oder Funktionserfüllung überprüft werden soll. Allerdings macht die Klassifikation nur eingeschränkt sichtbar, welche sicherheitsanalytischen Anwendungseinschränkungen mit bestimmten Indikatoren einhergehen. Um diese Anwendungseinschränkungen besser erschließen zu können, werden hier die folgenden drei alternative Klassifikationsschemata vorgeschlagen.

- **Globale und lokale Indikatoren** (Klassifikation nach der Notwendigkeit von Aggregierungen)
- **Prognostische und nichtprognostische Indikatoren** (Klassifikation nach der Abhängigkeit von Fehleinschätzungen von Entwicklungsmöglichkeiten)
- **Dosis- und Funktionsindikatoren** (Klassifikation nach dem Gegenstand, über den die Indikatoren etwas aussagen)

Die nachfolgenden Kapitel werden diese Klassifizierungen genauer beschreiben und die spezifischen Merkmale und Anwendungsbeschränkungen der Indikatorklassen untersuchen. Die Aufzählung der Anwendungsbeschränkungen erhebt nicht den Anspruch, vollständig zu sein. So werden zur Eignungsprüfung von Indikatoren in der Regel noch weitere Prüfungen notwendig sein. Beispielsweise beruhen alle Indikatoren auf der Annahme einer zeitlichen Konstanz der Bewertungsmaßstäbe. Indikatoren sind nur dann anwendbar, wenn diese Grundannahme, die ein operationalisierendes Postulat (Kapitel 6.6) darstellt, akzeptiert wird.

7.3.1 Globale und lokale Indikatoren

Indikatoren, die etwas über das Gesamtsystem aussagen, sollen *global*, und Indikatoren, die etwas über Systemteile aussagen, *lokal* genannt werden. Die in § 7 EndlSiAnfV angegebene *zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung* wäre damit ein globaler Indikator und der im ersten geowissenschaftlichen Abwägungskriterium aufgeführte Indikator *Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers* ein lokaler Indikator.

Genauigkeit der Operationalisierung

Jeder globale Indikator trifft eine Aussage über das Gesamtsystem. Lokale Indikatoren treffen dagegen nur Aussagen über Systemteile oder -aspekte. Zur Ableitung einer Gesamtaussage über das System müssen sie aggregiert werden, was in der Regel auch eine Gewichtung der Indikatoren nach ihrer Bedeutung beinhaltet. Der zentrale Unterschied zwischen globalen und lokalen Indikatoren liegt also darin, dass nur lokale Indikatoren eine Aggregierungsregel benötigen, um eine Aussage über das Gesamtsystem zu erhalten.

Im Kontext der Sicherheits- oder Funktionsfähigkeitsbewertung besitzen Aggregierungsregeln eine physikalische Bedeutung. Sie müssen korrekt erfassen, welchen physikalischen Einfluss die von den lokalen Indikatoren erfassten Systemaspekte (z. B. Mächtigkeit des Wirtsgesteins, Dicke der Abfallbehälter) auf die zu bewertende Eigenschaft (Sicherheit oder Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems) haben.

Die Aggregierungsregel lokaler Indikatoren bildet zwar keine physikalischen Mechanismen ab; sie repräsentiert aber sehr wohl, wie stark bestimmte Systemaspekte physikalisch auf die zu bestimmende Eigenschaft des Gesamtsystems einwirken. Insofern handelt es sich bei Aggregierungsregeln für lokale Indikatoren im Grunde um Modelle physikalischer Wirkungsstärken.

Da Aggregierungsregeln von einer gewissen Einfachheit sind, kann nicht erwartet werden, dass sie physikalischen Wirkungsstärken besonderes genau erfassen. Insbesondere dann, wenn die physikalischen Wirkungszusammenhänge komplex sind und die bewerteten Systemaspekte nicht gänzlich voneinander unabhängig. Daraus lässt sich schließen, dass lokale Indikatoren die zu bestimmende Eigenschaft des Gesamtsystems nur ungenau bewerten bzw. operationalisieren können.¹²

¹² Der Begriff der Genauigkeit dürfte in diesem Kontext intuitiv verständlich sein. Eine Präzisierung des Genauigkeitsbegriffs wird durch das in Kapitel 0 vorgestellte Rechtfertigungsmodell für sicherheitsbezogene Standortausschlussentscheidungen. Genauigkeit wird dort als epistemische Wahrscheinlichkeit beschrieben, dass Aussagen über das Schutzziel vertrauenswürdig sind.

Bei lokalen Indikatoren sollten sich Entscheidungsträgerinnen und -träger also bewusst sein, dass die zugehörige Aggregierungsregel eine Ungenauigkeit der Operationalisierung bedingt. Die Genauigkeitsanforderungen an das Bewertungsverfahren sind insbesondere bei Sicherheitsvergleichen hoch, und zwar umso höher, je weniger sich die Sicherheitsniveaus der verglichenen Standorte unterscheiden. Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen abschätzen, ob die für Sicherheitsvergleiche erforderliche Genauigkeit gegeben ist.

Vermittlung von Sicherheitsursachen

Lokale Indikatoren besitzen gegenüber globalen Indikatoren den Vorteil, dass das Indikatorsystem bereits darüber informiert, welche Systemaspekte als sicherheitsrelevant angesehen werden. Sie erleichtern damit Außenstehenden, ein Verständnis für die Funktions- bzw. Wirkungsweise eines Endlagersystems zu entwickeln.

Eine Zusammenfassung dieser Befunde findet sich in Tab. 7-1.

Tab. 7-1: Merkmale und Anwendungsbeschränkungen globaler und lokaler Indikatoren.

Globale Indikatoren
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Sind im Vergleich zu lokalen Indikatoren weniger geeignet, über sicherheits- oder funktionsrelevante Systemaspekte zu informieren.
Lokale Indikatoren
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Lokale Indikatoren benötigen eine Aggregierungsregel, die eine Operationalisierungsungenauigkeit mit sich bringt. <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen einschätzen, ob sie die aggregierungsbedingte Operationalisierungsungenauigkeit für zu groß halten, um Sicherheitsrangfolgen bestimmen zu können.

7.3.2 Dosis- und Funktionsindikatoren

Indikatoren können nach ihrem Untersuchungsgegenstand in Dosis- und Funktionsindikatoren eingeteilt werden:

- Als **Dosisindikatoren** sollen hier Indikatoren bezeichnet werden, die zukünftige Strahlenbelastungen möglichst direkt messbar machen. Damit machen sie auch den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt messbar, wenn dieser auf zukünftige Strahlenbelastungen bezogen wird (siehe Kapitel 5.1).
- Als **Funktionsindikatoren** sollten hier Indikatoren bezeichnet werden, die Funktions- bzw. Wirkungsweisen eines Endlagersystems oder seiner Komponenten messbar machen. Dies schließt z. B. die in § 4 EndlSiAnfV genannten Indikatoren zur Überprüfung des sicheren Einschlusses ein. Weil die Funktionsfähigkeit und Wirkungsweise eines Systems auch von äußeren Störeinflüssen abhängen, sollen auch Indikatoren für solche Störeinflüsse zu den Funktionsindikatoren gehören. Damit wäre also ein Indikator für die vulkanische Aktivität an einem Standort ebenfalls ein Funktionsindikator.

Merkmale von Dosisindikatoren

Dosisindikatoren dienen dazu, Schutzniveaus zu berechnen. Im Gegensatz zu Funktionsindikatoren sind sie stärker von hydrogeologischen, klimatischen und biologischen Entwicklungen über den Bewertungszeitraum abhängig und besitzen daher eine größere Evaluierungsungenauigkeit. Sie werden deshalb mithilfe konservativer Szenarien evaluiert. Auch die zur Bewertung eingesetzten Daten und Modelle können konservativ sein. Dosisindikatoren sind daher inhärent konservativ. Das Ausmaß der Konservativität lässt sich aufgrund der vielfältigen Ungewissheiten bezüglich der Prognose zukünftiger Strahlenexpositionen nicht quantifizieren. Somit gelten für Dosisindikatoren die Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern (Kapitel 7.2).

Diskutabel ist, ob Dosisindikatoren bei niedrigen Strahlendosen immer noch Schutzniveaus anzeigen. Die Annahme, dass niedrige Strahlendosen schädlich sind, ist vor allem an das sogenannte *linear no-threshold model* geknüpft, ein Modell der Dosis-Wirkungs-Beziehung, bei dem sich das Risiko zusätzlicher Krebsfälle oder erblicher Erkrankungen im gesamten Dosisbereich proportional zur Dosis verhält (ICRP 2007). Das *linear no-threshold model* steht in der Kritik, wissenschaftlich ungenügend fundiert zu sein (Calabrese 2019). Sollte davon ausgegangen werden, dass niedrige Strahlendosen keine schädliche Wirkung entfalten, so kann der Dosisindikator in diesem Dosisbereich kein Indikator für schädliche Strahlenbelastungen sein. Da die Dosis von der Funktionsfähigkeit des Endlagersystems abhängt, kann der Dosisindikator im niedrigen Dosisbereich aber immer noch die Rolle eines Funktionsindikators übernehmen. Welche Anwendungsbeschränkungen dann gelten, wird im Folgenden gezeigt.

Merkmale von Funktionsindikatoren

Die Anwendungsbeschränkungen von Funktionsindikatoren hängen davon ab, ob eine Äquivalenz von Funktionsfähigkeit und Schutz vor schädlichen Strahlenexpositionen postuliert wird. Eine solche Annahme hätte im Rechtfertigungsmodell den Status eines operationalisierenden Postulats, das nicht wahr, aber akzeptabel sein muss (Kapitel 6.6). Wir betrachten im Folgenden beide Fälle.

- *Fall A: Die Funktionsfähigkeit des Systems und der Schutz vor schädlichen Strahlenexpositionen werden nicht als äquivalent angesehen.*

In der Regel kann angenommen werden, dass die Sicherheitsfunktionen eines Endlagers so ausgelegt werden, dass aus der Funktionsfähigkeit des Endlagers das Erreichen des radiologischen Schutzziels folgt. Umgekehrt kann allerdings aus dem Erreichen des radiologischen Schutzziels im Allgemeinen nicht geschlossen werden, dass das Endlager funktionsfähig ist. Das liegt daran, dass im Deckgebirge und in der Biosphäre starke Verdünnungs- bzw. Dispersionseffekte auftreten könnten, die zu einer wirkungsvollen Senkung der Radionuklidkonzentrationen führen. Insofern bewirken Funktionsbewertungen eine Unterschätzung zukünftiger Strahlenexpositionen in nichtquantifizierbarem Ausmaß. Somit gelten für die Funktionsindikatoren die Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern (Kapitel 7.2).

- *Fall B: Die Funktionsfähigkeit des Systems und der Schutz vor schädlichen Strahlenexpositionen werden als äquivalent angesehen (operationalisierendes Postulat)*

Aufgrund der getroffenen Äquivalenzannahme sind die Funktionsindikatoren nicht mehr inhärent konservativ. Die Anwendungsbeschränkungen für konservative Indikatoren gelten hier also nicht allgemein für Funktionsindikatoren, sondern nur in dem Fall, in dem ein spezieller Funktionsindikator konservativ evaluiert wird.

Die Äquivalenzannahme senkt die Genauigkeit, mit welcher der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt operationalisiert wird. Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen für gegeben Standorte einschätzen, ob sie die Operationalisierung für genau genug halten, um Sicherheitsrangfolgen bestimmen zu können.

Eine Zusammenfassung dieser Befunde findet sich in Tab. 7-2.

Tab. 7-2: Merkmale und Anwendungsbeschränkungen von Dosis- und Funktionsindikatoren.

Dosisindikatoren
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Im Gegensatz zu Funktionsindikatoren größere Evaluierungsungenauigkeit wegen stärkerer Abhängigkeit von hydrogeologischen, klimatischen und biologischen Entwicklungen über den Bewertungszeitraum. Die Szenarientwicklung ist daher konservativ. Auch Daten und Modelle können konservativ sein. Das Ausmaß der konservativen Sicherheitsunterschätzung ist nicht quantifizierbar. ■ Werden im Bereich niedriger Dosiswerte zu Funktionsindikatoren (für Anwendungsbeschränkungen siehe unter „Funktionsindikatoren“). ■ Kann nur eine unzureichende Funktionsfähigkeit des Endlagers detektieren, aber keine ausreichende Funktionsfähigkeit. (Vorausgesetzt, dass die Endlagerfunktionen so ausgelegt wurden, dass aus einer Funktionsfähigkeit zulässige Dosiswerte resultieren.) <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <p>Es gelten die in Kapitel 7.2 aufgeführten Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern. Dosisindikatoren erlauben daher Folgendes nicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Standorte wegen eines unzureichenden Sicherheitsniveaus auszuschließen. ■ Sicherheitsrangfolgen zu bestimmen, wenn die standortspezifischen Sicherheitsunterschätzungen verschieden und damit vergleichsrelevant sind. Dass Letzteres eintritt, wird mit zunehmender Unähnlichkeit der verglichenen Endlagersysteme wahrscheinlicher und dürfte bei wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleichen mit großer Sicherheit gegeben sein.
Funktionsindikatoren
<p><i>Fall A: Funktionsfähigkeit und der Schutz vor schädlichen Strahlenexpositionen werden nicht als äquivalent angesehen.</i></p> <p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Unter der Voraussetzung, dass die Endlagerfunktionen so ausgelegt werden, dass aus einer Funktionsfähigkeit der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt resultiert, bewerten die Funktionsindikatoren das Schutzniveau konservativ. Ausmaß der konservativen Sicherheitsunterschätzung nicht quantifizierbar. <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <p>Es gelten die in Kapitel 7.2 aufgeführten Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern. Die Funktionsindikatoren erlauben Folgendes nicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Standorte wegen eines unzureichenden Sicherheitsniveaus auszuschließen. ■ Sicherheitsrangfolgen zu bestimmen, wenn die standortspezifischen Sicherheitsunterschätzungen verschieden und damit vergleichsrelevant sind. Dass Letzteres eintritt, wird mit zunehmender Unähnlichkeit der verglichenen Endlagersysteme wahrscheinlicher und dürfte bei wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleichen mit großer Sicherheit gegeben sein. <p><i>Fall B: Funktionsfähigkeit und der Schutz vor schädlichen Strahlenexpositionen werden als äquivalent angesehen.</i></p> <p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Die Äquivalenzannahme senkt die Genauigkeit der Operationalisierung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt. <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen für gegebene Standorte einschätzen, ob sie die Operationalisierung für genau genug halten, um Sicherheitsrangfolgen bestimmen zu können.

7.3.3 Prognostische und nichtprognostische Indikatoren

In der Sicherheitsanalytik wird zwischen aleatorischen und epistemischen Ungewissheiten unterschieden (*OECD-NEA 2012a*). Aleatorische Ungewissheiten werden durch ein nicht vorhersehbares Zufallsverhalten eines Endlagersystems erzeugt, das auf kleine Zustandsänderungen sensitiv reagiert. Beispielsweise kann nicht vorhergesehen werden, wo bei Rissbildungsprozessen die einzelnen Risse entstehen werden, weil die Rissentstehung empfindlich auf kleine (auch kleinskalige) Variationen des Spannungsfelds und der Materialeigenschaften reagiert. Aleatorische Ungewissheiten sagen also vor allem etwas über das zu bewertende System aus (und sein Zufallsverhalten) und weniger über die Erkenntnisfähigkeit der bewertenden Personen. Sie sind deshalb Teil einer objektiven Systembeschreibung.

Anders verhält es sich bei epistemischen Ungewissheiten. Epistemische Ungewissheiten entstehen durch die begrenzte Fähigkeit der Beobachtenden, prinzipiell erkennbare Sachverhalte wahrzunehmen. Beispielsweise wäre die Ungewissheit, welche Augenzahl ein Würfel zeigen wird, eine aleatorische Ungewissheit. Dagegen ist die Ungewissheit, welche Augenzahl der Würfel zeigt, nachdem er unter den Schrank gerollt ist, eine epistemische Ungewissheit: Es gibt dann zwar ein Wurfresultat, aber wir können es nicht sehen. Epistemische Ungewissheiten charakterisieren also nicht nur das zu bewertende System, sondern auch die subjektive Erkenntnisfähigkeit der bewertenden Personen.

Nach Auffassung von *Navarro (2025b)* dürften die Ungewissheiten, die bei der Langzeitsicherheitsbewertung auftreten, oft epistemischer Natur sein. Das hat zur Folge, dass bei der Bewertung möglicherweise Systemeigenschaften, -zustände oder -entwicklungen untersucht werden, die das System gar nicht realisieren kann. Beispielsweise könnte es sein, dass im Rahmen von Unsicherheitsanalysen Gesteinspermeabilitäten angenommen werden müssen, die das System gar nicht aufweist und von denen wir lediglich nicht wissen, dass es sie nicht aufweist. Epistemische Ungewissheiten bergen also das Risiko, dass die tatsächlichen Systemmöglichkeiten falsch eingeschätzt werden, dass also das, was wir für möglich halten, in Wahrheit gar nicht möglich ist. Langzeitsicherheitsbewertungen bewerten in diesem Fall nicht nur das System, sondern auch unsere Erkenntnisfähigkeit. Langzeitsicherheitsbewertungen erhalten also durch epistemische Ungewissheiten eine ungewollte subjektive Komponente. Diese Komponente ist nicht quantifizierbar, weil sich nicht alle Fehleinschätzungen von Systemmöglichkeiten detektieren lassen.

Die Ermittlung von Indikatorwerten kann unterschiedlich stark von epistemischen Ungewissheiten und somit von Fehleinschätzungen von Systemmöglichkeiten betroffen sein. Ein Indikator, der nur angibt, wie mächtig eine Barriere zum heutigen Tag ist, wird nur wenig von epistemischen Ungewissheiten betroffen sein. Anders verhält es sich bei Indikatoren, die über alle relevanten Entwicklungen einer be-

stimmten Szenarienklasse evaluiert werden müssen, wie etwa der Dosisindikator. Es ist wichtig festzuhalten, dass Szenarien zwar *mögliche* Entwicklungen genannt werden, aber im Grunde nur *für möglich gehaltene* Entwicklungen sind. Denn es gibt immer eine epistemische Ungewissheit bezüglich der Frage, welche Entwicklungen ein System tatsächlich realisieren kann. Wenn aus epistemischen ungewissen Parameterbandbreiten Szenarien abgeleitet werden, dann kann es bei der Modellierung dieser Szenarien zu einer erheblichen Fehlerfortpflanzung kommen. Insofern sind Indikatoren, die über alle relevanten Entwicklungsmöglichkeiten einer Szenarienklasse evaluiert werden müssen, besonders sensitiv gegenüber epistemischen Ungewissheiten bzw. Fehleinschätzungen von Systemmöglichkeiten. Solche Indikatoren können nach *Navarro (2025b)* *prognostisch* genannt werden und alle anderen Indikatoren *nichtprognostisch*.

Prognostische Indikatoren

Prognostische Indikatoren benötigen zur Evaluation eine Szenarientwicklung. Diese ist stets konservativ, weil sicherheitskritische Entwicklungen in Zweifelsfall berücksichtigt und nicht vernachlässigt werden. Konservative Ansätze können auch bei der Konstruktion von Modellen und der Ableitung von Modelleingangsparametern zum Einsatz kommen. Das Ausmaß der Konservativität lässt sich aufgrund der vielfältigen Ungewissheiten bezüglich der Prognose zukünftiger Strahlenexpositionen nicht quantifizieren. Somit gelten für prognostische Indikatoren die Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern (Kapitel 7.2). Sie erlauben also weder, Standorte wegen eines unzureichenden Sicherheitsniveaus auszuschließen, noch, Sicherheitsrangfolgen unähnlicher Endlagersysteme zu bestimmen.

Die Anwendungsbeschränkung bei nichtquantifizierbaren Evaluierungsfehlern (Kapitel 7.2) greift auch deshalb, weil unbemerkte Fehleinschätzung der Systemmöglichkeiten nach *Navarro (2025b)* zugleich wahrscheinlich und nichtquantifizierbar sind. Diese Fehleinschätzungen werden dann vergleichsrelevant, wenn sie bei den verglichenen Endlagersystemen unterschiedlich ausfallen. Dies tritt ein, wenn die verglichenen Standorte einander so unähnlich sind, dass sie mit unterschiedlichen Szenarien bewertet werden müssen oder mit gleichen Szenarien, die unterschiedlich wahrscheinlich sind. Deswegen eignen sich prognostische Indikatoren nicht dazu, wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsrangfolgen zu ermitteln.

Prognostische Indikatoren, die eine (wie auch immer genaue) Prognose des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt anstreben, müssen für mögliche Entwicklungen evaluiert werden. Das bedeutet zwangsläufig, dass sie Sicherheitsreserven nicht bewerten können, die in den für möglich gehaltenen Entwicklungen nur eine geringe Sicherheitswirkung entfalten. Entscheidungsträgerinnen und -träger könnten solche Sicherheitsreserven jedoch für bewertungsrelevant halten, weil sie gegen den denkbaren Fall absichern, dass bei der Szenarientwicklung

wicklung oder -bewertung wichtige Entwicklungen übersehen wurden. Ein Beispiel für eine solche Sicherheitsreserve wäre eine geringpermeable Deckgebirgsschicht, die in den betrachteten Entwicklungen kaum zur Rückhaltung von Radionukliden beiträgt, weil diese Aufgabe bereits von den wesentlichen Barrieren erfüllt wird.

Prognostische Indikatoren, die Sicherheitsreserven für möglicherweise übersehene Entwicklungen bewerten sollen, können allenfalls über hypothetische Entwicklungen evaluiert werden, in denen beispielsweise die wesentlichen Barrieren versagen. Selbstverständlich steht hinter einer solchen Anwendung keine Prognoseabsicht mehr. Kapitel 7.5.2 wird die Problematik der Bestimmung von Sicherheitsreserven genauer untersuchen.

Nichtprognostische Indikatoren

Nichtprognostische Indikatoren sind nicht notwendigerweise konservativ. Sie sind auch weitaus weniger von Fehleinschätzungen der Entwicklungsmöglichkeiten betroffen, ihre Evaluation keine Einschätzung der Entwicklungsmöglichkeiten benötigt. Damit sind sie nicht grundsätzlich ungeeignet, Standorte wegen eines unzureichenden Sicherheitsniveaus auszuschließen oder Sicherheitsrangfolgen unähnlicher Endlagersysteme zu bestimmen. Ob die in Kapitel 7.2 ausgeführten Anwendungsbeschränkungen gelten, wäre somit indicatorspezifisch zu prüfen.

Weil nichtprognostische Indikatoren keine Einschätzung der Entwicklungsmöglichkeiten benötigen, besitzen sie im Gegensatz zu prognostischen Indikatoren eine größere Genauigkeit bei der Evaluierung. Im Gegenzug besitzen sie das Problem, dass der physikalische Zusammenhang zwischen den Indikatoren und zukünftigen Strahlenexpositionen lose bleiben muss (*Navarro 2025b*). So ist es beispielsweise schwierig, für den nichtprognostischen Indikator der aktuellen Permeabilität des Wirtsgesteins zu sagen, wie stark sein absoluter oder relativer Einfluss auf zukünftige Strahlenexpositionen ist. Nichtprognostische Indikatoren operationalisieren zukünftige Strahlenexpositionen somit weniger genau als dies prognostische Indikatoren prinzipiell tun könnten.

Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen einschätzen, wie sehr diese Operationalisierungsungenauigkeit die Rechtfertigung von Standortausschlüssen schwächt. Sicherheitsvergleiche (Kapitel 6.4.3) stellen die höchsten Ansprüche an die Genauigkeit der Langzeitsicherheitsanalyse. Entscheidungsträgerinnen und -träger können nichtprognostische Indikatoren nur dann für Sicherheitsvergleiche anwenden, wenn ihre Operationalisierungsgenauigkeit für so groß halten, dass sie ihnen eine verlässliche Bestimmung der Vorzeichen der Sicherheitsdifferenzen zutrauen (siehe Kapitel 6.11).

Nichtprognostische Indikatoren erfassen Sicherheitsreserven anders als prognostische Indikatoren. Bei ihnen besteht die Möglichkeit einer inventarisierenden

Erfassung, bei der einzelne Indikatoren die Existenz unterschiedlicher Sicherheitsreserven aufzeigen. Beispielsweise können ein Indikator für die Gesamtmächtigkeit geringpermeabler Deckgebirgsschichten und weitere Indikatoren für Sicherheitsmargen bei der Endlagerauslegung eingeführt werden. Eine solche inventarisierende Erfassung von Sicherheitsreserven fördert die transparente Kommunikation von Sicherheitsursachen. Allerdings weist sie nur die Existenz von Sicherheitsreserven aus und nicht ihre Sicherheitswirkungen. Die Problematik bei der Bestimmung von Sicherheitswirkungen wird in Kapitel 7.5.2 diskutiert.

Eine Zusammenfassung dieser Befunde findet sich in Tab. 7-3.

Tab. 7-3: Merkmale und ableitbare Anwendungsbeschränkungen prognostischen und nicht-prognostischen Indikatoren.

Prognostische Indikatoren
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Immer konservativ. Ausmaß der konservativen Sicherheitsunterschätzung nicht quantifizierbar. ■ Nichtquantifizierbare Fehleinschätzungen der Systemmöglichkeiten. Evaluierungsungenauigkeit daher größer als bei nichtprognostischen Indikatoren. ■ Sicherheitsreserven für übersehene Entwicklungen nur über What-if-Szenarien erfassbar. <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <p>Es gelten die in Kapitel 7.2 aufgeführten Anwendungsbeschränkungen bei nichtquantifizierbaren konservativen Evaluierungsfehlern. Prognostische Indikatoren erlauben Folgendes nicht:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Standorte wegen eines unzureichenden Sicherheitsniveaus auszuschließen. ■ Sicherheitsrangfolgen zu bestimmen, wenn die standortspezifischen Sicherheitsunterschätzungen verschieden und damit vergleichsrelevant sind. Dass Letzteres eintritt, wird mit zunehmender Unähnlichkeit der verglichenen Endlagersysteme wahrscheinlicher und dürfte bei wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleichen mit großer Sicherheit gegeben sein.
Nichtprognostische Indikatoren
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Nicht notwendigerweise konservativ. ■ Im Gegensatz zu prognostischen Indikatoren größere Operationalisierungsungenauigkeit. ■ Können zur Inventarisierung von Sicherheitsreserven genutzt werden. Sicherheitswirkung der Sicherheitsreserven muss abgeschätzt werden. <p>Abgeleitete Anwendungsbeschränkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen einschätzen, ob sie die Operationalisierung für zu ungenau halten, um Sicherheitsrangfolgen bestimmen zu können.

7.4 Indikatortypen

Eine Typisierung von Indikatoren lässt sich erzielen, indem ein Indikator gemäß den vorgeschlagenen Klassifizierungen (global/lokal, Dosis-/Funktionsbezug und prognostisch/nichtprognostisch) kategorisiert wird. Damit werden beispielsweise die in § 4 EndSiAnfV aufgeführten Austragsindikatoren zu globalen prognostischen Funktionsindikatoren. Eine Typisierung von Indikatoren nach diesem Muster sollte für den größten Teil der praktisch in Frage kommenden Indikatoren möglich sein. Einige Klassenkombinationen scheiden allerdings aus folgenden Gründen aus.

- Dosisindikatoren sind immer global, weil sie eine Aussage über die Sicherheit des Gesamtsystems treffen.
- Dosisindikatoren und globale Funktionsindikatoren sind immer prognostisch, weil sie sich aus den Entwicklungsmöglichkeiten des Gesamtsystems ergeben.

Es kann also keine lokalen oder nichtprognostische Dosisindikatoren und keine nichtprognostischen globalen Funktionsindikatoren geben. Damit verbleiben die in Tab. 7-4 aufgezeigten Indikatortypen. Diesen weist die Tabelle prototypische Indikatoren zu.

Tab. 7-4: Realisierbare Indikatortypen mit prototypischen Indikatoren

Indikatortyp	Prototypen
Dosisindikatoren (immer global und prognostisch)	Zusätzliche jährliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung (siehe § 7 EndSiAnfV)
Globale Funktionsindikatoren (immer prognostisch)	Austrag von Radionukliden aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren (siehe § 4 EndSiAnfV)
Lokale prognostische Funktionsindikatoren	A) Erfüllungsgrad von Sicherheitsfunktionen (Robustheit) B) Sicherheitsreserven
Lokale nichtprognostische Funktionsindikatoren	Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (siehe § 24 StandAG)

Mithilfe der Befunde aus Kapitel 7.3 lassen sich die allgemeinen Anwendungsbeschränkungen dieser Indikatortypen ableiten. Dabei zeigt sich Folgendes:

1. Die Dosisindikatoren und die Austragsindikatoren aus § 7 bzw. § 4 EndSiAnfV sind nicht geeignet, ein *unzureichendes* Sicherheitsniveau zuverlässig zu detektieren, das im Standortauswahlverfahren einen Standortaus-

schluss begründen könnte. (Jedoch können sie ein *ausreichendes* Schutzniveau detektieren, weshalb sie sich weiterhin zur Überprüfung der Genehmigungsfähigkeit eignen.)

2. Die Dosisindikatoren und die Austragsindikatoren aus § 7 bzw. § 4 EndlSiAnfV sind für wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche nicht geeignet.
3. Indikatoren vom Typ der geowissenschaftliche Abwägungskriterien sind für wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche nicht grundsätzlich ungeeignet, weil es sich um nichtprognostische Indikatoren handelt (siehe dazu auch Kapitel 6.11). Die geowissenschaftliche Abwägungskriterien müssten für diesen Zweck allerdings zumindest um weitere Indikatoren ergänzt werden müsste, um alle Unterschiede der zu vergleichenden Endlagersysteme zu erfassen, insbesondere auch die vergleichsrelevanten Aspekte der technischen und geotechnischen Barrieren.

Es sei angemerkt, dass sich Langzeitsicherheitsanalysen nicht auf einen einzigen Indikatortyp beschränken müssen. Es können auch unterschiedliche Indikatortypen zu einer Gesamtbewertung aggregiert werden.

7.5 Analyse spezieller Indikatoren

7.5.1 Robustheitsindikatoren

Die Langzeitsicherheit eines Endlagers wird oft mit der Eigenschaft der Robustheit in Verbindung gebracht (*IAEA 2011a*) und auch die EndlSiAnfV fordert in § 5 und § 6 die Robustheit der wesentlichen Barrieren. In der Regel wird angenommen, dass das Niveau der Langzeitsicherheit mit der Robustheit eines Endlagersystems zunimmt und dass Endlagersysteme, die nicht robust sind, auch nicht sicher sein können.

Ein Verfahren zur robustheitsbasierten Langzeitsicherheitsbewertung wurde in Deutschland erstmals durch *Fischer-Appelt & Baltes (2010)* ausgearbeitet, die ein auf Robustheitsindikatoren basierendes, systematisches Verfahren des Standortvergleichs vorschlugen. Dabei betrachteten sie die Robustheitsindikatoren allerdings nicht als Sicherheitsindikatoren, da sie Sicherheit und Robustheit als unabhängige Merkmale ansahen. Die Autoren definierten Robustheit unter anderem über die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems.

Auch die EndlSiAnfV definiert Robustheit als Unempfindlichkeit von Sicherheitsfunktionen. Eine Robustheitsbewertung wird dabei für die erwarteten Entwicklung gefordert. Zunächst lässt sich also feststellen, dass Robustheitsindikatoren prognostische Indikatoren sind, deren Merkmale und Anwendungsbeschränkungen

sie erben. Die nachfolgenden Kapitel werden sich um eine weitergehende Charakterisierung des Robustheitskonzepts bemühen.

7.5.1.1 Definitionen der Robustheit und der Sicherheitsfunktion

Die für das deutsche Standortauswahlverfahren relevante Definition von Robustheit findet sich in der EndlSiAnfV. Robustheit wird dort definiert als

„die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen.“
(§ 2 EndlSiAnfV)

Die Eigenschaft der Robustheit könnte also sowohl auf die übergeordnete Sicherheitsfunktion des sicheren Einschlusses als auch auf die einzelnen Sicherheitsfunktionen der Endlagerkomponenten bezogen werden. Erstere soll im Folgenden **Systemrobustheit** und letztere **Komponentenrobustheit**¹³ genannt werden.

Wie die obige Definition zeigt, stützt sich das Konzept der Robustheit auf das Konzept der Sicherheitsfunktion. Letzteres wurde in den 00er-Jahren entwickelt, um die Rolle der von Endlagerkomponenten und ihr Zusammenspiel transparenter zu erfassen (OECD-NEA 2009, S. 20ff; OECD-NEA 2012a, S. 118). Sicherheitsfunktionen können aber auch zum Zwecke der Szenarienentwicklung definiert werden (Son et al. 2023). Insofern ist festzustellen, dass sich das Konzept der Robustheit auf ein System aus Sicherheitsfunktionen stützt, dass nicht in erster Linie zur Robustheitsbewertung konstruiert worden sein muss und dessen Eignung für eine sicherheitsanalytische Systembewertung demzufolge untersucht werden sollte.

Die EndlSiAnfV definiert eine Sicherheitsfunktion als

„eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen an ein sicherheitsbezogenes System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente erfüllt“ (§ 2 Nr. 8 EndlSiAnfV)

Sicherheitsfunktionen können sich damit sowohl auf das gesamte Endlagersystem als auch auf einzelne Komponenten beziehen. Wie bei der Robustheit soll hier deshalb zwischen **Komponentenfunktionen** und **Systemfunktionen**¹⁴ unterschieden werden. Ein Beispiel für Systemfunktionen geben Johnson et al. (2002, S. IV) mit den Sicherheitsfunktionen „*isolation from the human environment*“, „*long-*

¹³ Fischer-Appelt & Baltés (2010) sprechen auch von einer Robustheit von Sicherheitsfunktionen. Dies lässt sich ohne Bedeutungsverlust als Robustheit derjenigen Komponenten deuten, welche die Sicherheitsfunktionen erfüllen sollen.

¹⁴ Systemfunktionen werden in in OECD-NEA (2012a, S. 96) „broad safety functions“, in OECD-NEA (2004, S. 17) „main protective functions“ und in OECD-NEA (2009, S. 26) „high-level principles (containment, isolation, retention)“ genannt.

term confinement and radioactive decay within the disposal system” und “attenuation of releases to the environment“. (Diese lassen sich in etwa in die Systemfunktionen Räumliche Trennung von der Biosphäre, Zerfall von Radionukliden durch langfristigen Einschluss und Abschwächung und Verzögerung der Radionuklidfreisetzung in die Umgebung übersetzen.)

Robustheit ist per Definition an die Unempfindlichkeit von Sicherheitsfunktionen gekoppelt und diese wiederum an die Erfüllung von Anforderungen, die an das System oder seine Teile gestellt werden. Das bedeutet, dass per Definition nur solche Endlagerkomponenten robust sein können, an die auch Anforderungen gestellt werden. Es bedeutet insbesondere auch, dass eine Robustheitsbewertung nur dann eine Sicherheitsbewertung erlaubt, wenn alle Elemente eines Endlagersystems, von denen die Sicherheitsaussage wesentlich abhängt, direkt oder indirekt über Sicherheitsfunktionen erfasst sind.

Ist dies nicht der Fall, dann müssen für diesen speziellen Bewertungszweck zusätzliche Sicherheitsfunktionen eingeführt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass manche Sicherheitsfunktionen vernachlässigt werden können, je nachdem, welches Ausschlussargument (Kapitel 6.4) angewendet werden soll. Bei Sicherheitsvergleichen beispielsweise dürfen Sicherheitsfaktoren vernachlässigt werden, die bei den verglichenen Systemen dieselbe Sicherheitswirkung entfalten.

In Bezug auf das Konzept der Sicherheitsfunktion sei noch auf den Präzisionsbedarf hingewiesen, der mit der diesbezüglichen Definition aus § 2 Nr. 8 EndlSiAnfV verbunden ist.

1. In der genannten Definition decken sich die Träger von Sicherheitsfunktionen (Endlagerkomponente oder Prozess) nicht vollständig mit den Trägern der Anforderungen (System, Teilsystem, Einzelkomponente). Das ermöglicht den Widerspruch, dass ein System eine an es selbst gestellte Anforderung nicht selbst erfüllen kann, weil Anforderungen definitionsgemäß nur von Komponenten oder Prozessen erfüllt werden können. Es liegt deshalb nahe, die Definition so auszulegen, dass auch das Gesamtsystem Sicherheitsfunktionen übernehmen darf. Diese Auslegung wird auch von der Robustheitsdefinition der EndlSiAnfV gestützt, wo von den „Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems“ (§ 2 EndlSiANfV) die Rede ist.
2. Definitionsgemäß verlieren Systeme oder Systemteile ihre Sicherheitsfunktionen, wenn die betreffende Eigenschaft verloren geht bzw. der betreffende Prozess nicht oder nicht mehr abläuft. Somit verlöre ein versagendes Endlagersystem alle seine Sicherheitsfunktionen. Gleichzeitig verlöre es auch die Eigenschaft der Robustheit, weil sich diese an der Erfüllung von Sicherheitsfunktionen bemisst. Von einem dysfunktionalen Endlagersystem könnte damit nicht gesagt werden, dass es nicht robust sei. Genauer gesagt hätte es dann gar keine Robustheitseigenschaft mehr – also weder eine gute noch eine

schlechte Robustheit. Dieses Problem könnte vermieden werden, wenn Sicherheitsfunktionen als Aufgaben begriffen werden, die Systeme, Systemteile oder Prozesse mehr oder weniger gut erfüllen können, aber nie verlieren. Dies entspräche auch dem in *OECD-NEA (2009)* auf S. 21 wiedergegebenen Verständnis der schwedischen SKB, eine Sicherheitsfunktion sei „a role through which a repository component contributes to safety“.

Genauer ausgedrückt, könnte eine Sicherheitsfunktion also als eine Aufgabe aufgefasst werden, die einem Endlagersystem oder einem seiner Teile einschließlich einem im Endlagersystem ablaufender Prozess zugewiesen wird. Diese Aufgabe kann mehr oder weniger gut erfüllt werden. Der Grad ihrer Erfüllung bemisst sich an dem Grad der Erfüllung der Anforderungen, die an das betreffende System, den Systemteil bzw. den Prozess gestellt werden.

7.5.1.2 Operationalisierungsungenauigkeiten von Sicherheitsfunktionen

Robustheitsbewertungen hängen nicht nur davon ab, welche Sicherheitsfunktionen definiert wurden, sondern auch, auf welche Weise sie definiert wurden. Hier lassen sich zwei Definitionsweisen unterscheiden:

1. Definition über das, was die Funktion erreichen soll – also über den Zweck der Funktion.
2. Definition über das, was zur Erreichung dieses Ziels benötigt wird – also über die zur Erfüllung des Zwecks verwendeten Mittel.

Es kann also zwischen einer *Zweck-* und einer *Mittelformulierung von Sicherheitsfunktionen* unterschieden werden. Damit soll nicht ausgeschlossen sein, dass Definitionen von Sicherheitsfunktionen sowohl Zwecke als auch Mittel benennen.

Wie das folgende Beispiel zeigt, beeinflusst die Art der Formulierung die Anzahl der Sicherheitsfunktionen eines Systems. Betrachten wir dazu die Systemfunktionen.

- Räumliche Trennung von der Biosphäre.
- Zerfall von Radionukliden durch langfristigen Einschluss.
- Abschwächung und Verzögerung der Radionuklidfreisetzung in die Umgebung.

Diese drei Funktionen beschreiben die Mittel zur Erreichung der folgenden Systemfunktion:

- Ausreichendes Fernhalten von Radionukliden von der Biosphäre für 1 Million

Jahre.

Offensichtlich reduziert die zuletzt genannte Zweckformulierung die Anzahl der Sicherheitsfunktionen auf eine einzige.

Das bedeutet nicht notwendigerweise, dass Mittel- und Zweckformulierung äquivalent ist. Mittelformulierungen operationalisieren den Zweck der Sicherheitsfunktionen. Diese Operationalisierung kann ungenau sein. Robustheitsbewertungen, die sich an Sicherheitsfunktionen in Mittelformulierung orientieren, sind daher von einer möglichen Operationalisierungsungenauigkeit der Sicherheitsfunktionen betroffen.

7.5.1.3 Zu betrachtende Entwicklungen

Laut § 5 Abs. 1 und § 6 Abs. 1 EndlSiAnfV muss die Robustheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sowie die Robustheit des Systems der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren begründet werden, und zwar für die erwarteten Entwicklungen. Hierfür sollte es genügen, ausschließlich die erwarteten Entwicklungen abzuprüfen.

Eine Beschränkung auf die erwarteten Entwicklungen ist jedoch nicht ausreichend, wenn absolute oder relative Robustheitsgrade bestimmt werden sollen. Der Grund ist, dass sich Robustheitsgrade aus Belastungsgrenzen ergeben. Belastungsgrenzen zeigen sich aber nur unter Bedingungen, unter denen Sicherheitsfunktionen versagen. Ein Versagen von Sicherheitsfunktionen ist in den erwarteten Entwicklungen unwahrscheinlich, weil Endlager in der Regel so konzipiert werden, dass sie in den erwarteten Entwicklungen ihre Funktionen erfüllen. Deswegen müssen zur Bestimmung absoluter oder relativer Robustheitsgrade auch die abweichenden und eventuell auch hypothetische Entwicklungen betrachtet werden.

Wenn ein Standortvergleich über relative Robustheitsgrade angestrebt wird, dann müssen die Entwicklungen, mit denen Versagensgrenzen detektiert werden, die gleichen und gleich wahrscheinlich sein. Dies dürfte bei Standorten unmöglich sein, die einander so unähnlich sind, dass sie eine unterschiedliche Szenarienentwicklung benötigen. Robustheitsvergleiche lassen sich daher allenfalls für ähnliche Endlagersysteme durchführen.

7.5.1.4 Gleiche Anforderungsstrenge für Sicherheitsvergleiche

Die Systemrobustheit hängt von der Strenge der Anforderungen ab, die an die Sicherheitsfunktionen gestellt werden. Je strenger diese Anforderungen sind, desto wahrscheinlicher ist es, dass eine Komponente versagt und ihre Sicherheitsfunktion nicht mehr erfüllen kann. Wie das folgende Beispiel zeigt, kann das zu dem

unerwünschten Effekt führen, dass Systeme weniger robust werden, wenn man ihre Sicherheit verbessert.

Angenommen, ein Endlagerkonzept würde um ein weiteres Abdichtungsbauteil ergänzt. Wie jedes Bauteil hat auch das hinzugekommene Abdichtungsbauteil eine gewisse Versagenswahrscheinlichkeit. Somit besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass eine der Sicherheitsfunktionen des Systems versagt. Wird die Systemrobustheit an dieser Wahrscheinlichkeit bemessen, dann wird das System die zusätzliche Barriere zwar sicherer, aber weniger robust.

In diesem Beispiel fügte die zusätzliche Abdichtung dem System eine Sicherheitsreserve hinzu, wodurch es sicherer wurde. Problematisch war jedoch, dass die Sicherheitsreserve mit einer Anforderung belegt und damit zu einer verpflichtenden Sicherheitsreserve wurde. Damit stieg die Strenge der Anforderungen an das Gesamtsystem und die Systemrobustheit sank.

Wie das Beispiel zeigt, dürfen an die Endlagerkomponenten keine beliebigen Anforderungen gestellt werden. Dieses Problem erkannten auch *Fischer-Appelt & Baltes (2010, S. 17)*, die anmerkten, dass es von elementarer Wichtigkeit sei, „dass die Auslegungsanforderungen an die Barrieren der zu vergleichenden Endlagersysteme ungefähr die gleiche ‚Strenge‘ aufweisen. Ein Endlagersystem, an welches extrem strikte (ggf. übertriebene) Anforderungen gestellt werden, würde im Vergleich trotz ggf. höherer Robustheit einem anderen Endlagersystem mit weniger strengen (angemessenen) Auslegungsanforderungen unterliegen.“

Um eine „gleiche Strenge“ der Anforderungen herzustellen, muss mindestens folgende Beziehungen zwischen Robustheit und Sicherheit hergestellt werden:

1. Zwei Endlager, die für gleich sicher gehalten werden, müssen gleich robust sein.
2. Wenn ein Endlager sicherer gemacht wird, darf es nicht an Robustheit verlieren.

Verletzungen der zweiten Bedingung entstehen, wenn verzichtbare Anforderungen an das Gesamtsystem gestellt werden, oder wenn den Anforderungen an die Komponenten Sicherheitsmargen, das heißt, Sicherheitsreserven zugeschlagen werden. Beispielsweise könnte von der geologischen Barriere eine größere Mächtigkeit verlangt werden als dies eigentlich für die Erreichung der Genehmigungsfähigkeit nötig wäre. Insofern benötigen Robustheitsbewertungen einen eigenständigen Satz an Anforderungen, der frei von Sicherheitsreserven ist.

Sicherheitsreserven können durch redundante Sicherheitsfunktionen entstehen. So wären beispielsweise die beiden Sicherheitsfunktionen *Sorption von Radionuk-*

liden und *geringe Diffusivität* für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Tonstein redundant, wenn sie Radionuklide stärker zurückhalten, als es für die übergeordnete Sicherheitsfunktion des sicheren Einschlusses nötig wäre. Um Sicherheitsreserven zu vermeiden, müssten die Anforderungen an diese beiden Sicherheitsfunktionen so aufeinander abgestimmt werden, dass keine Sicherheitsreserven entstehen. Dabei scheint es keinen eindeutigen Satz an Anforderungen zu geben, weil die bewertenden Personen frei wählen können, welche der Anforderungen sie senken.

Es sind aber auch Situationen vorstellbar, bei denen es eine Rolle spielt, welche Anforderung gesenkt wird. Betrachten wir dazu noch einmal das letzte Beispiel: Wenn hier beispielsweise die Funktion der Sorption von Radionukliden schwerer zu erfüllen wäre als die Funktion der geringen Diffusivität, dann würde eine Senkung der Diffusivitätsanforderung zu einer geringeren Robustheitseinschätzung führen als eine Senkung der Sorptionsanforderung. Bei der Konstruktion reservefreier Anforderungen muss also offenbar auch die Vulnerabilität der einzelnen Sicherheitsfunktionen berücksichtigt werden.

Diese Problematik könnte umgangen werden, wenn versucht würde, redundante Sicherheitsfunktionen zu eliminieren. Dies könnte beispielsweise geschehen, indem Sicherheitsfunktionen nicht über eine Mittel-, sondern über eine Zweckformulierung definiert würden. Beispielsweise ließen sich die Sicherheitsfunktionen *Sorption von Radionukliden*, *geringe Diffusivität* und *geringe Durchlässigkeit* durch die übergeordnete Sicherheitsfunktion *hohe Radionuklidrückhaltung* ersetzen, die keine Redundanz zu anderen Sicherheitsfunktionen aufweist. Ob eine solche Elimination redundanter Sicherheitsfunktionen durchgängig möglich ist und sie letztlich zu globalen Robustheitsindikatoren führt, wäre fallspezifisch zu prüfen.

7.5.1.5 Fazit

Bei der vorangegangenen Analyse ergaben sich keine Hinweise darauf, die gegen eine Machbarkeit der in §§ 5 und 6 EndlSiAnfV geforderten Robustheitsnachweise für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das System der technischen und geotechnischen Barrieren in den erwarteten Entwicklungen sprechen. Diese Nachweise können durch eine sicherheitsanalytische Bewertung der erwarteten Entwicklungen geführt werden.

Problematischer gestaltet sich die Robustheitsbewertung für Sicherheitsvergleiche. Als prognostische Indikatoren können Robustheitsindikatoren keine unähnlichen Endlagersysteme vergleiche. Es bleibt also, ihre Eignung für den Vergleich ähnlicher Endlagersysteme zu prüfen. Diese Prüfung gestaltet sich aber, wie oben gezeigt wurde, schwierig:

- Vergleichende Robustheitsbewertungen sind nur dann aussagekräftig, wenn sie Entwicklungen ausloten, bei denen es zu einer mangelhaften Erfüllung von

Sicherheitsfunktionen kommt. Es gibt noch kein etabliertes Vorgehen, mit dem bestimmt werden könnte, welche Entwicklungen dazu betrachtet werden müssten.

- Bei vergleichenden Robustheitsbewertungen muss gewährleistet sein, dass alle Elemente eines Endlagersystems, von denen die Sicherheitsaussage wesentlich abhängt, direkt oder indirekt über Sicherheitsfunktionen erfasst sind.
- Robustheitsbewertungen, die sich an Sicherheitsfunktionen in Mittelformulierung orientieren, sind von einer möglichen Operationalisierungsungenauigkeit der Sicherheitsfunktionen betroffen.
- Vergleichende Robustheitsbewertungen benötigen einen eigenen Satz funktionsbezogenen Anforderungen, die frei von Sicherheitsreserven sind. Es ist noch nicht geklärt, ob bzw. wie ein solches Anforderungssystem konstruiert werden kann. Es erfordert in jedem Fall eine Ermittlung aller Sicherheitsreserven eines Systems. (Die Problematik einer solchen Bestimmung wird in Kapitel 7.5.2 analysiert.)

Es ist also anzunehmen, dass es Indikatoren gibt, die für Standortvergleiche besser geeignet oder zumindest mit weniger Aufwand evaluierbar sind als Robustheitsindikatoren.

So gesehen liegt der Schwerpunkt der Robustheitsbewertung auf den Robustheitsnachweisen des *Genehmigungsverfahrens*. Solche Nachweise sind als Sicherheitstests zu interpretieren und tragen daher zur Standortselektion nur begrenzt bei (siehe Kapitel 6.11). Weitere Einsatzgebiete von Robustheitsindikatoren im Standortauswahlverfahren wären Standortausschlüsse, die von konzeptuellen Präferenzen für bestimmte Robustheitseigenschaften von Endlagersystemen geleitet werden (Kapitel 6.4.4).

7.5.2 Sicherheitsreserven

Der Begriff der Sicherheitsreserve ist im Kontext der Endlagerung international geläufig (*IAEA 2011b*). Es liegt nahe, dass Systeme mit größeren Sicherheitsreserven sicherer sein dürften. Indikatoren für Sicherheitsreserven kommen daher für die Standortauswahl prinzipiell in Frage. Das Konzept der Sicherheitsreserve soll hier deshalb genauer untersucht werden.

7.5.2.1 Das Konzept der Sicherheitsreserve

Der Begriff der Sicherheitsreserve erscheint im Bericht der Endlagerkommission (*EndKom 2016f*) sowie in der Anlage 2 des StandAG und in § 5 Abs. 4 der EndlSiAnfV ohne dort definiert zu werden. Die Endlagerkommission erklärt aber, dass sie Zusammenhang zwischen Sicherheitsreserve und Robustheit sieht:

„Ferner müssen zum Zeitpunkt des Vergleiches bestehende Ungewissheiten in die Abwägung ebenso miteinfließen wie die Robustheit der Sicherheitsaussage und der Sicherheit des Endlagersystems, das heißt bestehende Sicherheitsreserven.“ (EndKom 2016f, S. 288).

Von welcher Art dieser Zusammenhang sein könnte, wird deutlicher, wenn der im Begriff „Sicherheitsreserve“ enthaltene Teilbegriff der Reserve ausdeutet wird. Der Duden definiert eine Reserve als „etwas, was für den Bedarfs- oder Notfall vorsorglich zurückbehalten, angesammelt wird“ (Dudenredaktion 2025). Dem Konzept der Reserve liegt also eine Unterscheidung zwischen Bedarfs- (bzw. Notfällen) und allen übrigen Fällen zugrunde (letztere sollen hier nur kurz „Normalfälle“ genannt werden).

Sicherheitsreserven sind Sicherheitsfaktoren, die in Bedarfsfällen eine Sicherheitswirkung entfalten, aber in Normalfällen nicht benötigt werden, um ausreichende Sicherheit zu erzielen. Es liegt nahe, Normal- und Bedarfsfälle als Teilmengen der möglichen Endlagerentwicklungen, das heißt, als Szenarienklassen zu verstehen. Voraussetzung ist aber, dass die Normalfälle keine unsicheren Entwicklungen enthalten, denn es macht keinen größeren Sinn, Sicherheitsreserven für ein unsicheres Endlagersystem zu bestimmen.

Da sich Sicherheitsreserven aus Sicherheitsfaktoren ergeben, die in Normalfällen nicht zwingend benötigt werden, kontrolliert die Definition der Normalfälle, welches Inventar an Sicherheitsreserven ein Endlagersystem besitzt. Ohne eine Definition von Normalfällen wird der Begriff der Sicherheitsreserve bedeutungslos. Es kann dann eigentlich nicht mehr von *Sicherheitsreserven*, sondern nur von *Sicherheitsfaktoren* die Rede sein.

Die Notwendigkeit einer Gliederung der möglichen Entwicklungen in Normal- und Bedarfsfälle unterscheidet das Konzept der Sicherheitsreserve noch nicht von dem der Robustheit. Wie in Kapitel 7.5.1 gezeigt wurde, wird zur Bestimmung von Robustheitsgraden ein Anforderungssystem benötigt, das keine Sicherheitsreserven ausweist. Diese Sicherheitsreserven sind Systemmerkmale, die in Normalfällen nicht benötigt werden, um Sicherheit zu erzeugen. Also muss auch bei der Robustheitsbewertung zwischen Normal- und Bedarfsfällen unterschieden werden.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Konzepten der Robustheit und Sicherheitsreserve liegt darin, welche Systementwicklungen zur Indikatorevaluation herangezogen werden: Robustheitsindikatoren werden anhand des Versagens des Endlagersystems in Bedarfsfällen evaluiert, das Inventar der Sicherheitsreserven wird dagegen anhand der nicht benötigten Sicherheitsfaktoren in den Nor-

malfällen bestimmt.¹⁵ Beide Konzepte stehen also für komplementäre Perspektiven auf das Endlagersystem.

Dennoch ist eine starke Verzahnung der Konzepte zu verzeichnen. Wie in Kapitel 7.5.1.4 ausgeführt wurde, erfordern Robustheitsvergleiche die Konstruktion eines Anforderungssystems, das frei von Sicherheitsreserven ist. Zur Konstruktion eines Robustheitsmaßstabes müssen also Sicherheitsreserven identifiziert werden. Wie im Folgenden gezeigt wird, müssen umgekehrt auch zur Konstruktion eines Maßstabes für Sicherheitsreserven Robustheitsbewertungen erfolgen. Dadurch ergibt sich eine enge Verflechtung beider Konzepte.

7.5.2.2 Probleme der Inventarisierung von Sicherheitsreserven

Prinzipiell lassen sich Sicherheitsreserven über konservative Modellrechnung identifizieren, denn bei sicheren Endlagern stellt jede konservative Modellannahme eine Sicherheitsreserve dar. Die Bestimmung einzelner Sicherheitsreserven dürfte daher unproblematisch sein.

Weitaus schwieriger ist eine Bestimmung *sämtlicher* Sicherheitsreserven eines Endlagersystems, etwa mit dem Ziel des Sicherheitsvergleichs. Hier lassen sich folgende Probleme identifizieren.

1. **Notwendigkeit der Konstruktion hypothetischer reservefreier Vergleichssysteme.** Sicherheitsanalysen sollen nach § 9 Abs. 2 EndlSiUntV realitätsnah sein, d. h. konservative Annahmen möglichst vermeiden. Somit zeichnen sie kein vollständiges Bild der Sicherheitsreserven eines Systems. Denn um sämtliche Sicherheitsreserven zu ermitteln, müsste ein Modell mit maximaler Konservativität konstruiert werden. Ein solches Modell soll hier ein *hypothetisches reservefreies Vergleichssystem* genannt werden. Es wäre in allen Normalfall-Entwicklungen langzeitsicher, aber nicht notwendigerweise in allen Bedarfsfall-Entwicklungen.
2. **Fehlende Eindeutigkeit der Reservenbestimmung.** Es ist wahrscheinlich, dass sich für ein Endlagersystem mehrere hypothetische reservefreie Vergleichssysteme konstruieren lassen. Beispielsweise könnte bei einem Endlagerkonzept für Tonstein ein reservefreies System konstruiert werden, indem wahlweise die Undurchlässigkeit oder die Sorptionsfähigkeit des Wirtsgestein reduziert würde. Beides würde zu einem anderen reservefreien System führen. Infolgedessen ändert sich auch das Inventar der Sicherheitsreserven.

¹⁵ Dies entspricht der von OECD-NEA (2002) ausgedrückten Auffassung, dass Sicherheitsreserven Sicherheitsfunktionen berücksichtigen, die im Safety Case noch nicht vollständig berücksichtigt sind.

3. **Notwendige Sicherheitsgleichheit der hypothetischen reservefreien Vergleichssysteme.** Um eine eindeutige Sicherheitsbestimmung zu ermöglichen, müssten alle für ein Endlagersystem konstruierbaren hypothetischen reservefreien Vergleichssysteme gleiche Sicherheit besitzen. Es muss also nachgewiesen werden, dass die Sicherheitsreserven der Vergleichssysteme die gleiche Sicherheitswirkung entfalten.
4. **Notwendigkeit von Robustheitsbewertungen.** Die zu ermittelnden Sicherheitswirkungen (s. o.) ergeben sich nicht aus den Normalfällen, sondern aus dem Systemverhalten in Bedarfsfällen. Das bedeutet, dass zur Bestimmung Sicherheitsreserven letztendlich auch eine Robustheitsbetrachtung notwendig wird.

Eine vollständige Inventarisierung von Sicherheitsreserven wäre also aufwändig. Ob sie in der Praxis gelingt, wurde noch nicht gezeigt. Damit lässt sich festhalten, dass es bezüglich der Nutzung von Sicherheitsreserven für Sicherheitsvergleiche noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf gibt.

Solche Sicherheitsvergleiche würden ohnehin auch nur für ähnliche Endlagersysteme machbar sein. Da Sicherheitsreserveindikatoren zu den prognostischen Indikatoren zählen, wären wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche mit ihnen grundsätzlich nicht machbar.

7.5.2.3 Fazit

Wie aufgezeigt wurde, bringt eine *vollständige* Inventarisierung von Sicherheitsreserven erhebliche methodische Schwierigkeiten mit sich, die bislang noch nicht gelöst wurden. Eine Bestimmung *einzelner* Sicherheitsreserven dürfte dennoch machbar sein. Indikatoren für einzelne Sicherheitsreserven ließen sich im Verbund mit anderen Indikatortypen einsetzen, beispielsweise um Vorhandensein einer eigentlich nicht benötigten geringpermeablen Deckgebirgsschicht abzuprüfen. Darüber hinaus dürfte sich das Konzept der Sicherheitsreserve gut zur Kommunikation von Sicherheitsursachen eignen.

8 Schlussfolgerungen

Das Projekt METIENS untersuchte, wie Ausschlüsse oder Teilausschlüsse von Teilgebieten, Standortregionen und Standorten sicherheitsanalytisch gerechtfertigt werden können und zwar mit Blick auf das Verfahrensziel, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden. Diese Frage wurde zunächst theoretisch behandelt. Die Rechtfertigungsbeziehung zwischen Langzeitsicherheitsbewertung und Standortausschlussentscheidungen wurde in einem Rechtfertigungsmodell abgebildet (siehe Kapitel 6 und *Navarro 2025b*), aus dem dann Schlussfolgerungen für den Prozess der Standortauswahl und die hierfür benötigten Langzeitsicherheitsanalysen gezogen wurden. Die wichtigsten Schlussfolgerungen werden nachfolgend vorgestellt und im Kontext des deutschen Standortauswahlverfahrens beleuchtet. Zugunsten einer übersichtlicheren Darstellung werden dabei die potenziellen Endlagersysteme in den Teilgebieten, Standortregionen und Standorten des Standortauswahlgesetzes nur kurz „Standorte“ genannt.

Das im Projekt entwickelte Rechtfertigungsmodell zeigt, dass sich für Kriterien, Indikatoren und sicherheitsanalytischen Bewertungsmethoden nicht allgemein beurteilen lässt, ob sie für einen Einsatz im Standortauswahlverfahren geeignet sind. Vielmehr hängt ihre Eignung davon ab, mit welcher sicherheitsbezogenen Argumentation (Kapitel 6.4) ein konkreter Standortausschluss gerechtfertigt werden soll und ob die verwendeten Kriterien, Indikatoren und Bewertungsmethoden in der Lage sind, diese Argumentation zu stützen. Es gibt zum Beispiel Ausschlussargumente, die sich auf Nachweise eines *ausreichenden* Sicherheitsniveaus beziehen, und solche, die Nachweise eines *unzureichenden* Sicherheitsniveaus benötigen. Ein und dasselbe Bewertungsverfahren kann für den einen Nachweis geeignet und für den anderen ungeeignet sein. Die Kriterien, Indikatoren und sicherheitsanalytischen Bewertungsmethoden des Standortauswahlverfahrens können also erst dann bewertet werden, wenn klar ist, welcher sicherheitsbezogenen Argumentation sie zuarbeiten sollen.

Dass eine solche Klärung stattfindet, ist nicht selbstverständlich. So lässt beispielsweise das Standortauswahlgesetz offen, welche sicherheitsbezogene Argumentation seine Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) verfolgen: Sollen sie nachweisen, dass ein Standort unsicher ist (eine absolute Sicherheitsbewertung), dass er weniger sicher ist als andere Standorte (eine relative Sicherheitsbewertung) oder dass unerwünschte Endlagerungsbedingungen vorliegen (eine Bewertung der Einhaltung sicherheitsbezogener konzeptioneller Präferenzen)? Ohne eine Klärung des Nachweisziels und der angestrebten Argumentation lässt sich die Eignung eines Ausschlusskriteriums (für diese Argumentation) nicht bewerten. Wissenschaftsbasierte, transparente Sicherheitsbewertungen müssen aber bewertbar sein. Daher muss ihr argumentativer Kontext geklärt werden. Die nachfolgenden Schlussfolgerungen setzen voraus, dass solche Klärungen stattgefunden haben oder zumindest angestrebt werden.

8.1 Zielabwägung unter Ungewissheiten

Genehmigungsverfahren konzentrieren sich auf einen einzelnen Standort und benötigen für diesen zuverlässige Sicherheitsaussagen. Dagegen operieren Standortauswahlverfahren oft mit einer großen Anzahl an Standortkandidaten, sodass Ausschlussentscheidungen teilweise unter größeren Ungewissheit fallen müssen (Navarro 2025b). Das liegt nicht zuletzt daran, dass der Zeitrahmen und die Ressourcen zur Erkundung der Standortkandidaten auf ein sinnvolles Maß begrenzt werden müssen.

Wenn Ausschlussentscheidungen unter Ungewissheiten gefällt werden, dann findet eine Abwägung zwischen sicherheitsbezogenen Zielen und konkurrierenden Zielen (wie etwa, die Verfahrensdauer, den Erkundungsaufwand oder das Verfahrensrisiko zu begrenzen) statt. Bei einer solchen Zielabwägung besteht immer ein Risiko, Standorte mit guten Sicherheitseigenschaften ungewollt auszuschließen. Entscheidungsträgerinnen und -träger müssen daher überlegen, wie hoch sie dieses Risiko einschätzen und wie tolerant sie gegenüber diesem Risiko sind. Dabei kann die Risikotoleranz davon abhängen, wie viele gute Standorte nach dem Ausschluss noch im Verfahren verbleiben.

Ungewissheiten können auf unterschiedliche Weisen Einfluss auf Ausschlussentscheidungen nehmen. Es ist auch möglich, dass Ausschlussentscheidungen bestehende Ungewissheiten ignorieren. Betrachten wir hierzu folgende Vorgehensweisen.

1. **Ausschlussentscheidungen können sich an der besten Schätzung orientieren und die Ungewissheit dieser Schätzung ignorieren.** Dieses Vorgehen wird in Navarro (2025b) beschrieben. Das Ausmaß der Ungewissheiten hat hier keinen Einfluss auf die Auswahlentscheidung. Das Entscheidungsverhalten wäre damit risikoneutral.
2. **Bei Ausschlussentscheidungen können Ungewissheiten als Malus eines Standortes gewertet werden.** Dies entspräche einem risikoscheuen Entscheidungsverhalten. Allerdings handelt es sich dabei um keine rein sicherheitsbezogene Entscheidung, da es, wie Navarro (2025b) feststellt, keine kausale Beziehung zwischen dem Sicherheitsniveau und seiner Unkenntnis gibt. Das Verfahren, Sicherheitsniveau und Ungewissheiten miteinander zu verrechnen, ermöglicht zudem keine transparente Sicherheitsbewertung: *Ungewissere* Sicherheitsniveaus können nämlich nicht in *geringere* Sicherheitsniveaus übersetzt werden, ohne einen falschen Eindruck von den tatsächlichen Sicherheitsniveaus zu vermitteln. Dieses Problem kann allerdings umgangen werden, indem die Risikoscheue bei der übergeordneten multikriteriellen Entscheidungsfindung berücksichtigt wird. Dabei kann die Präferenz für geringere Ungewissheiten gegen die Präferenz für ein höheres Sicherheitsniveau abgewogen werden. Durch dieses Verfahren wird transparent gemacht, ob

Standorte wegen zu großer Ungewissheiten ausgeschlossen wurden oder weil ihr tatsächliches Sicherheitsniveau zu gering war.

- 3. Ausschlussentscheidungen können zum Ziel haben, die Anzahl der Standorte auf eine bestimmte Anzahl zu reduzieren.** Die Begrenzung der Standortanzahl senkt den Erkundungs- und Forschungsaufwand zur Reduktion von Ungewissheiten. Für sich alleine genommen handelt es sich nicht um ein sicherheitsbezogenes Ziel, da an die verbleibenden Standorte keine sicherheitsbezogenen Anforderungen gestellt werden. Insofern handelt es sich hierbei zwar um einen Umgang mit Ungewissheiten, aber nicht um einen sicherheitsbezogenen Umgang mit Ungewissheiten. Das Entscheidungsziel müsste also durch sicherheitsbezogene Entscheidungsziele ergänzt werden.

8.2 Sicherheitsbezogene konzeptionelle Präferenzen

Wie *Navarro 2025b* aufzeigt, können Standortausschlüsse auch über konzeptionelle Präferenzen gerechtfertigt werden, also über Präferenzen für oder gegen bestimmte Merkmale eines Endlagersystems oder seiner Umgebung. Ein wichtiges Beispiel ist die Präferenz für das Entsorgungsprinzip des sicheren Einschlusses, welche sich in den Sicherheitsanforderungen wiederfindet (§ 4 EndlSiAnfV). Mit der Forderung eines sicheren Einschlusses soll vermieden werden, dass der Schutz von Mensch und Umwelt schwerpunktmäßig über eine Verdünnung von Radionukliden bewerkstelligt wird. Diese Forderung gilt unbedingt, also selbst dann, wenn eine Verdünnung von Radionukliden im Deckgebirge zukünftige Strahlenexpositionen effektiv reduzieren würde. Das zeigt, dass das Prinzip des sicheren Einschlusses, obwohl es sicherheitsbezogen ist, sich nicht an Sicherheitsniveaus orientiert. Vielmehr betrifft es die Art und Weise der Sicherheitserzeugung, die hier auf einem Einschluss und nicht auf einer Verdünnung von Radionukliden beruht.

Navarro 2025b verallgemeinert diese Argumentation und sieht in sicherheitsbezogenen konzeptionellen Präferenzen eine grundsätzliche Möglichkeit, Standortausschlüsse zu rechtfertigen. Dabei können die konzeptionellen Präferenzen im Prinzip jeden Aspekt des Endlagersystems, seiner Umgebung oder seiner Bewertung betreffen. Da konzeptionelle Präferenzen subjektiv sind, können sie nur dann akzeptabel sein, wenn sie konsensual sind. Zusätzlich muss den Entscheidungsträgerinnen und -trägern das Risiko akzeptabel erscheinen, dass konzeptuelle Präferenzen auch Standorte mit hohem Sicherheitsniveau ausschließen können.

Es ist anzunehmen, dass Vergleiche von Sicherheitsniveaus den Ausschluss von Standorten überzeugender rechtfertigen können als Verstöße gegen sicherheitsbezogene konzeptuelle Präferenzen. Deshalb kommt ein Standortausschluss anhand konzeptueller Präferenzen vor allem dort in Frage, wo Sicherheitsvergleiche nicht möglich sind (*Navarro 2025a*). Wie in Kapitel 8.4.2 ausgeführt wird, dürfte das

bei wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleichen wahrscheinlich der Fall sein. Die Wahl zwischen verschiedenen Wirtsgesteinen könnte somit anhand sicherheitsbezogener konzeptueller Präferenzen vorgenommen werden. Sofern es solche Präferenzen gibt, dürften sie sich frühzeitig bestimmen lassen, da sie nicht von den Ergebnissen der Standorterkundung abhängen. Dadurch könnte das Standortauswahlverfahren signifikant beschleunigt werden.

Die notwendigen Bedingungen für eine solche Verfahrensweise lauten:

1. Es kann frühzeitig festgestellt werden, dass wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche nicht möglich sind. Unter welchen Bedingungen dies der Fall sein kann, wird in Kapitel 8.4.2 aufgezeigt.
2. Es kann frühzeitig festgestellt werden, dass es konsensuale Präferenzen für oder gegen bestimmte Sicherheitskonzepte gibt, die sich auf die Sicherheit oder die Bewertbarkeit der Sicherheit beziehen.

Auf dieser Grundlage könnte ein frühzeitiges Ausscheiden von Sicherheitskonzepten sicherheitsbezogen gerechtfertigt werden (*Navarro 2025a*).

8.3 Antikonservativität von Ausschlusskriterien

Wenn Standorte aufgrund eines unzureichenden oder geringeren Sicherheitsniveaus ausgeschlossen werden, so erfordert das *antikonservative*, das heißt, sicherheitsüberschätzende Bewertungen (*Navarro 2025b*).

In der Praxis dürften solche Bewertungen über Ausschlusskriterien realisiert werden, die sich grundsätzlich antikonservativ gestalten lassen. Demgegenüber ist Antikonservativität bei szenarien- und modellgestützten Langzeitsicherheitsanalysen nicht üblich und voraussichtlich auch nicht leicht zu implementieren. Das liegt unter anderem daran, dass Szenarientwicklungen inhärent konservativ sind, weil sie sicherheitskritische Entwicklungen bei unklarer Eintrittswahrscheinlichkeit im Zweifelsfall erfassen, anstatt sie zu ignorieren (was zu einer Sicherheitsunterschätzung führt). Ein Konzept für eine antikonservative Szenarientwicklung wurde noch nicht entwickelt.

Ausschlusskriterien verwenden in der Regel einen einzigen Indikator für einen ausgewählten, dominanten Sicherheitsfaktor und überprüfen, ob dieser einen kritischen Wert unter- oder überschreitet (beispielsweise, ob eine gewisse Mächtigkeit der geologischen Barriere unterschritten wird). Nach *Navarro 2025b*, werden Ausschlusskriterien umso antikonservativer, je weniger Standorte sie ausschließen (siehe auch Kapitel 6.11). Umgekehrt heißt das, dass jeder Versuch, Ausschlusskriterien so zu modifizieren, dass sie mehr Standorte ausschließen kön-

nen, ihre Antikonservativität mindert. Damit sinkt ihre Zuverlässigkeit bei der Detektion eines unzureichenden oder geringeren Sicherheitsniveaus.

Betrachten wir beispielsweise das aus den Mindestanforderungen des StandAG (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) ableitbare Ausschlusskriterium, dass die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht kleiner als 100 m sein darf. Eine Erhöhung des Grenzwertes auf 400 m würde dazu führen, dass das Kriterium mehr Gebiete ausschließt. Allerdings wäre dann auch weniger sicher, ob die dadurch ausgeschlossenen Standorte unsicher oder weniger sicher als die verbleibenden Gebiete sind. Das Ausschlusskriterium könnte also nicht mehr verlässlich nachweisen, dass die Ausschlussbedingungen eines unzureichenden oder geringeren Sicherheitsniveaus erfüllt sind.

Dieses Ergebnis kann kontraintuitiv erscheinen, weil eine Grenzwertenerhöhung auf 400 m zuverlässiger nachweisen würde, dass die verbleibenden Standorte sicher sind. Standortausschlüsse benötigen aber im Wesentlichen keine Sicherheitsnachweise, sondern Nachweise unzureichender oder geringer Sicherheit. Deshalb muss hier die Sicherheit überschätzt werden. Dies ist kein konservativer, sondern ein antikonservativer Bewertungsansatz.

Aus diesem Befund kann nicht geschlossen werden, dass Ausschlusskriterien nicht auf die beschriebene Weise modifiziert werden dürfen. Entscheiderinnen und Entscheider sollten sich lediglich darüber bewusst sein, dass Standortausschlüsse dann nicht mehr rein sicherheitsbezogen gerechtfertigt werden. Vielmehr werden weitere Verfahrensziele ins Spiel gebracht, wie etwa das Ziel der Verfahrensbeschleunigung. Wie in Kapitel 8.1 ausgeführt wurde, sind solche Abwägungen in einem Standortauswahlverfahren nicht vermeidbar.

8.4 Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen

Eine wesentliche Motivation des vorliegenden Projektes war, zu klären, ob wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche möglich sind. Das Projekt behandelte den wirtsgesteinsübergreifenden Sicherheitsvergleich als einen Spezialfall des Sicherheitsvergleichs, dessen Problematik es auf allgemeiner Ebene analysierte (Navarro 2025b). Die wichtigsten Ergebnisse werden hier zusammengefasst und abschließend in Bezug auf das Standortauswahlgesetz diskutiert.

Navarro (2025b) stellte zunächst fest, dass es zwei praxisrelevante Typen von Sicherheitsvergleichen gibt: Suboptimalitätstests (*suboptimality tests*) und Rangfolgentests (*ranking tests*). Suboptimalitätstests schätzen ungenau ab, ob die Existenz sichererer Standorte wahrscheinlich ist. Dabei nehmen sie meist die Form von Ausschlusskriterien an. Aufgrund ihrer Ungenauigkeit können Suboptimalitätstests ein geringeres Sicherheitsniveau nur dann detektieren, wenn die Standorte größere Sicherheitsdifferenzen aufweisen. In allen anderen Fällen können sie

nicht zuverlässig unterscheiden, welcher Standort sicherer ist. Deshalb sind sie für sich alleine genommen nicht in der Lage, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu bestimmen.

Diese Aufgabe kommt den Rangfolgentests zu. Rangfolgentests vergleichen zwei Standorte und zeigen an, welcher der beiden Standorte die geringere Sicherheit besitzt. Weil sie auf umfangreicheren Langzeitsicherheitsanalysen beruhen, besitzen sie das Potenzial, Sicherheitsrangfolgen zuverlässiger zu bestimmen. Die folgenden Unterkapitel werden sich deshalb ausschließlich mit Rangfolgentests beschäftigen.

8.4.1 Grundannahmen

Navarro 2025b trifft in Bezug auf Rangfolgentests folgende Grundannahmen. Die erste Grundannahme bestimmt maßgeblich die Schwierigkeit des Sicherheitsvergleichs.

- **Sicherheitsrangfolgen sind weitgehend unabhängig von den gemeinsamen Merkmalen der verglichenen Standorte sowie von gemeinsamen sicherheitsanalytischen Bewertungsfehlern, sofern diese dieselbe Sicherheitswirkung besitzen.** Rangfolgenbestimmungen werden daher tendenziell umso schwieriger, je weniger sich die Standorte und Bewertungsmethoden ähneln. Wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche sind daher besonderes herausfordernd.
- **Bei der Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen geht es nur darum, das Vorzeichen der Sicherheitsniveaudifferenzen ausreichend zuverlässig¹⁶ zu bestimmen.** Nicht in allen Fällen dürfte dazu eine Bestimmung von Sicherheitsniveaudifferenzen oder absoluten Sicherheitsniveaus erforderlich sein. Das ist z. B. dann der Fall, wenn sich zwei Endlagersysteme in nur einem einzigen Parameter unterscheiden, wie etwa in der Mächtigkeit des Wirtsgesteins. Eine Sicherheitsrangfolge kann dann relativ einfach anhand dieses einen Parameters bestimmt werden, weil nur dieser eine Parameter vergleichsrelevant ist (siehe oben). Es müssten in diesem Beispiel also keine Sicherheitsniveaudifferenzen berechnet werden.

¹⁶ „ausreichend zuverlässig“: Gemeint ist hier ein ausreichendes Vertrauen, dass das Vorzeichen richtig bestimmt wurde. Der Vertrauensgrad kann z. B. durch eine epistemische Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden (*Chuaqui 1991; Navarro 2025b*).

8.4.2 Hinreichende Bedingungen für eine Nichtvergleichbarkeit

Im Projekt wurden die folgenden hinreichenden¹⁷ Bedingungen für eine Nichtbestimmbarkeit von Sicherheitsrangfolgen identifiziert (*Navarro 2025b*).

1. **Entscheiderinnen und Entscheider sind der Auffassung, dass die Operationalisierung des Schutzniveaus zu ungenau ist, das heißt, nicht verlässlich bestimmen kann, welches der betrachteten Endlagersysteme im Bewertungszeitraum wahrscheinlich höhere zusätzliche Strahlenexpositionen erzeugen wird.**

Die Bedingungen dürfte vor allem dann erfüllt sein, wenn zur Langzeitsicherheitsbewertung mehrere Indikatoren benutzt werden, und gleichzeitig unklar ist, ob die Aggregation dieser Indikatoren ihre relative physikalische Wirkung auf die zukünftigen Strahlenexpositionen korrekt abbildet. Die Zahl der erforderlichen Indikatoren sinkt allerdings mit zunehmender Ähnlichkeit der verglichenen Standorte.

2. **Entscheiderinnen und Entscheider sind der Auffassung, dass die sicherheitsanalytischen Verfahren zur Ermittlung von Indikatorwerten zu ungenau oder von unbekannter Genauigkeit sind, so dass sie nicht verlässlich bestimmen können, welches der betrachteten Endlagersysteme im Bewertungszeitraum wahrscheinlich höhere zusätzliche Strahlenexpositionen erzeugen wird.**

Das tritt mindestens in den folgenden Fällen ein.

2.1 Fall A: Die Sicherheitsrangfolge wird über paarweise Vergleiche von Endlagersystemen ermittelt. Dabei stellt sich heraus, dass die ermittelte Rangfolge von der Reihenfolge der einzelnen Vergleiche abhängt. Die Sicherheitsrangfolge ist also nicht eindeutig. Die sicherheitsanalytischen Verfahren sind dann wahrscheinlich zu ungenau.

2.2 Fall B: Die Sicherheitsbewertung ist konservativ. Gleichzeitig ist unklar, in welchem Ausmaß die Sicherheitsniveaus unterschätzt werden und bei welchem Standort das Sicherheitsniveau am stärksten unterschätzt wird.

Die Konservativität von Sicherheitsbewertungen wird dann problematisch, wenn sie zu unterschiedlich starken Sicherheitsunterschätzungen führt und somit vergleichsrelevant ist. Am ehesten dürfte das eintreten,

¹⁷ Das bedeutet, dass nicht ausgeschlossen ist, dass es weitere Bedingungen gibt, unter denen Sicherheitsrangfolgen nicht bestimmt werden können.

wenn Standorte einander so wenig ähneln, dass sie mit unterschiedlichen konservativen Annahmen bewertet werden müssen.

2.3 Fall C: Die Sicherheitsbewertung ist stark von der Einschätzung der tatsächlichen Systemmöglichkeiten abhängig. Gleichzeitig ist unklar, bei welchen Standorten die größeren Fehler bei der Einschätzung der tatsächlichen Systemmöglichkeiten gemacht werden.

Dieser Fall tritt ein, wenn Indikatoren verwendet werden, die für alle möglichen Entwicklungen einer Entwicklungsklasse (erwartete oder abweichende Entwicklungen) bewertet werden müssen. *Navarro (2025b)* nennt solche Indikatoren *prognostische Indikatoren* (predictive indicators). Zu ihnen gehört insbesondere auch der Dosisindikator. Wie *Navarro (2025b)* argumentiert, dürften viele Szenarien Systementwicklungen umfassen, die physikalisch gar nicht möglich sind und nur aus Unkenntnis für möglich gehalten werden. Es werden dann Szenarien oder Parameterbandbreiten betrachtet, die das Endlagersystem gar nicht realisieren kann. Das Ausmaß solcher Bewertungsfehler ist nicht quantifizierbar, weil nicht bekannt ist, in welchem Umfang Unmögliches für möglich gehalten wird. Vergleichsrelevant werden diese Bewertungsfehler, wenn sich Endlagersysteme einander so wenig ähneln, dass sie mit unterschiedlichen Szenarien bewertet werden müssen oder wenn sie zwar mit denselben Szenarien bewertet werden können, diese aber unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten aufweisen.

2.4 Fall D: Die Entscheiderinnen und Entscheider sind der Auffassung, dass die Sicherheitsdifferenzen zwischen den verbliebenen Standorten zu gering und die sicherheitsanalytischen Verfahren zu ungenau sind, um eine Sicherheitsrangfolge zu bestimmen.

3. Die Entscheiderinnen und Entscheider sind der Auffassung, dass es Angesichts der Verschiedenheit der zu vergleichenden Endlagersysteme grundsätzlich unmöglich sei, festzustellen, welches System das höhere Sicherheitsniveau besitzt.

Anders gesprochen bestreiten die Entscheiderinnen und Entscheider, dass es für bestimmte Standorte eine Operationalisierung des Schutzniveaus geben könnte, mit der sich eine Sicherheitsrangfolge bestimmen ließe. Sie vertreten also die Auffassung, dass es für die betreffenden Endlagersysteme keinen Vergleichsmaßstab geben könne.¹⁸ Dass Entscheiderinnen und Entscheider zu dieser Auffassung gelangen, ist vor allem bei wirtsgesteinsübergreifenden Si-

¹⁸ Dass die Sicherheitsanforderungen ein zu erreichendes Schutzniveau definieren, widerspricht einer solchen Einschätzung nicht, weil das zu erreichende Schutzniveau auch wirtsgesteins- bzw. sicherheitskonzeptspezifisch sein könnte. Endlagersysteme, die das zu erreichende Schutzniveau exakt erreichen, wären dann zwar sicher, aber nicht zwangsläufig auch gleich sicher.

cherheitsvergleichen denkbar, weil hier unterschiedliche Sicherheitskonzepte miteinander verglichen werden.

Die genannten Bedingungen machen deutlich, dass die Chance auf eine zuverlässige Bestimmung von Sicherheitsrangfolgen sinkt, je unähnlicher die verglichenen Systeme sind. Somit ist es grundsätzlich möglich, dass wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsrangfolgen nicht ermittelbar sind. Ob dieser Fall eintritt, hängt von den verwendeten Bewertungsmethoden (Punkte 2.1 bis 2.3) und von den subjektiven Einschätzungen der bewertenden Personen ab (Punkte 1, 2.4 und 3).

Wie im nächsten Kapitel erläutert wird, ist eine Nichtvergleichbarkeit von Standorten für das Standortauswahlverfahren nicht grundsätzlich problematisch. Vielmehr kann sie die Möglichkeiten der Verfahrensbeschleunigung eröffnen.

8.4.3 Beschleunigungspotenziale

Eine Nichtbestimmbarkeit von Sicherheitsrangfolgen für bestimmte Standorte kann das Standortauswahlverfahren erheblich beschleunigen oder zumindest vereinfachen. Wo Sicherheitsrangfolgen nicht bestimmbar sind, können alternative Auswahlkriterien zum Zuge kommen, die geringere oder gar keine Ansprüche an die Standorterkundungen stellen. Diese Kriterien können immer noch sicherheitsbezogen sein, etwa dann, wenn sie Präferenzen für bestimmte sicherheitsbezogene Merkmale von Endlagersystemen bzw. Sicherheitskonzepten ausdrücken (Kapitel 8.2).

Ob wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche unmöglich sind, sollte zumindest für die oben genannten Bedingungen 1, 2.4 und 3 frühzeitig feststellbar sein, weil diese Bedingungen nicht von den Ergebnissen der Standorterkundung abhängen. Sollte sich herausstellen, dass wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche nicht möglich sind, dann eröffnet sich die Möglichkeit eines frühzeitigen Ausschlusses bestimmter wirtsgesteinsspezifischer Sicherheitskonzepte, z. B. anhand sicherheitsbezogener konzeptioneller Präferenzen.

Navarro (2025b) weist darauf hin, dass es prinzipiell auch möglich sein könnte, nicht vergleichbare Sicherheitskonzepte so zu modifizieren, dass sie einander ähnlicher und damit vergleichbar werden. Dies könne beispielsweise über die Konstruktion kombinierter Sicherheitskonzepte geschehen. So könnte beispielsweise versucht werden, die Vorteile der technischen und geotechnischen Barrieren eines Kristallinkonzeptes mit den Vorteilen eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Tongestein oder Steinsalz zu verbinden, und zwar so, dass das kombinierte Konzept sicherer als die Ursprungskonzepte erscheint. Die Machbarkeit und Langzeitsicherheit solcher Kombinationskonzepte sind jedoch noch nicht nachgewiesen worden. Auch kann der erhöhte Aufwand der Kombinations-

konzepte in Konflikt mit anderen Verfahrenszielen stehen, weshalb *Navarro (2025b)* auch keine explizite Empfehlung für diese Verfahrensweise ausspricht.

8.4.4 Kriterien und Indikatoren des Standortauswahlgesetzes

Für langzeitsicherheitsbezogene Bewertungen legt das Standortauswahlgesetz teilweise mittels der Sicherheitsanforderungen Kriterien und Indikatoren fest. Explizit führt es folgende Kriterien auf:

- Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG).
- Mindestanforderungen (§23 StandAG).
- Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (§ 24 sowie Anlage 1 bis 11 StandAG).

Die Sicherheitsanforderungen wiederum führen folgende Indikatoren ein:

- Die abgeschätzte zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung, die für erwartete und abweichende Entwicklungen zu bewerten ist (§ 7 Abs. 2 EndlSiAnfV). – Dieser soll nachfolgend nur kurz „Dosisindikator“ genannt werden.
- Die im Bewertungszeitraum insgesamt sowie jährlich aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragenen Anteile der Masse und Atomanzahl, die für die erwarteten Entwicklungen zu bewerten sind (§ 4 Abs. 5 EndlSiAnfV). – Diese Indikatoren sollen hier nur kurz „Austragsindikatoren“ genannt werden. Sie gehören zur Gruppe der Funktionsindikatoren (Kapitel 7.3.2).
- Die Beibehaltung der Funktion des sicheren Einschlusses, die für die abweichenden Entwicklungen zu bewerten ist (§ 4 Abs. 6 EndlSiAnfV). – Hier werden keine konkreten Indikatoren benannt. Sie können allerdings nur eine untergeordnete Rolle bei der Ermittlung von Sicherheitsrangfolgen spielen, weil sie nur für die abweichenden Entwicklungen bewertet werden. Sie werden daher im Folgenden nicht weiter behandelt.

Nachfolgend wird betrachtet, wie diese Kriterien und Indikatoren zur Ermittlung von Sicherheitsrangfolgen beitragen können.

Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

Das Standortauswahlgesetz lässt auch in seiner Begründung (*BT 2017*) offen, welche langzeitsicherheitsanalytische Aussage die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen über einen Standort treffen. Nach *Navarro (2025b)* kommen hier

mindestens drei mögliche Aussagen in Frage. So könnte der betreffende Standort, der eine Ausschlussbedingung¹⁹ erfüllt, entweder

1. ein unzureichendes Sicherheitsniveau aufweisen,
2. ein geringeres Sicherheitsniveau als andere (nicht spezifizierte) Standorte besitzen oder
3. gegen sicherheitsbezogene konzeptionelle Anforderungen verstoßen (siehe Kapitel 8.2).

Bei Punkt 2 handelt es sich um einen Sicherheitsvergleich. Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hätten hier also die Funktion von Suboptimalitätstests. Weil diese ungenau sind, können sie nur dann Sicherheitsrangfolgen bestimmen, wenn die betreffenden Standorte große Sicherheitsdefizite gegenüber anderen Standorten aufweisen. Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen können daher keine Sicherheitsrangfolge für sämtliche Standorte bestimmen.

Dosisindikator und Austragsindikatoren

Der Dosisindikator und die Austragsindikatoren sind wesentlich für die Prüfung der Genehmigungsfähigkeit eines Standortes. Genehmigungsfähige Standorte werden selbstverständlich gegenüber nicht genehmigungsfähigen bevorzugt, was im Grunde einem Sicherheitsvergleich entspricht. Auf diese Weise lassen sich allerdings keine Sicherheitsrangfolgen für genehmigungsfähige Standorte ermitteln.

Der Dosisindikator und die Austragsindikatoren müssen für alle Entwicklungsmöglichkeiten einer Entwicklungsklasse (erwartet, abweichend) evaluiert werden. Es handelt sich damit um prognostische Indikatoren, die anfällig für Fehleinschätzungen der tatsächlichen Entwicklungsmöglichkeiten sind (Kapitel 8.4.2). Die damit verbundenen sicherheitsanalytischen Bewertungsfehler sind nicht quantifizierbar und nach Einschätzung von *Navarro (2025b)* auch wahrscheinlich. Sie werden dann vergleichsrelevant, wenn die verglichenen Standorte einander so wenig ähneln, dass sie mit unterschiedlichen Szenarien bewertet werden müssen oder wenn sie zwar mit gleichen Szenarien bewertet werden können, diese aber unterschiedliche Eintrittswahrscheinlichkeiten besitzen. Unter diesen Bedingungen eignen sich der Dosisindikator und die Austragsindikatoren nicht für Sicherheitsvergleiche.

¹⁹ Die Mindestanforderungen formulieren indirekt auch Ausschlussbedingungen. Die Forderung, dass alle Mindestanforderungen des StandAG erfüllt sein müssen, ist äquivalent zu einem Verbot, eine der Mindestanforderungen nicht zu erfüllen. Die Nichterfüllung einer Mindestanforderung ist daher eine Ausschlussbedingung.

Sicherheitsvergleiche können auch deshalb schwierig werden, weil die Evaluierung des Dosisindikators und der Austragsindikatoren i. d. R. konservativ ist. Das liegt nicht zuletzt daran, dass Szenarientwicklungen konservativ sind, da sie sicherheitskritische Systemmerkmale und Systementwicklungen im Zweifelsfall eher berücksichtigen als vernachlässigen. Auch werden bei Modellvereinfachungen traditionellerweise konservative Annahmen gewählt. Weil sich die Sicherheitswirkung konservativer Annahmen meist nicht quantifizieren lässt, eignen sich der Dosisindikator und die Austragsindikatoren nicht für Sicherheitsvergleiche, wenn die verglichenen Standorte einander so wenig ähneln, dass sie mit unterschiedlichen konservativen Annahmen bewertet werden müssen (Kapitel 8.4.2).

Ein möglicherweise überraschendes Ergebnis des Projektes ist also, dass sich der Dosisindikator und die Austragsindikatoren nicht für wirtgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche eignen.

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Die geowissenschaftliche Abwägungskriterien bewerten nach § 24 Ab. 1. StandAG das Vorliegen einer günstigen geologischen Gesamtsituation. Es kann davon ausgegangen werden, dass Standorte mit günstiger geologischer Gesamtsituation gegenüber solchen mit einer weniger günstigen geologischen Gesamtsituation bevorzugt werden. Insofern dienen auch die geowissenschaftliche Abwägungskriterien einem Sicherheitsvergleich.

Mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien lassen sich keine Endlager-systeme mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich vergleichen, wenn sie unterschiedliche technische oder geotechnische Barrieren aufweisen, weil sie diese Barrieren nicht mitbewerten. Somit sind die geowissenschaftliche Abwägungskriterien für wirtgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche nicht geeignet (zumindest nicht ohne Ergänzung).

Die geowissenschaftliche Abwägungskriterien besitzen jedoch einige Eigenschaften, die es sinnvoll erscheinen lassen, über eine Erweiterung um Indikatoren für technische und geotechnische Barrieren nachzudenken. Bei den geowissenschaftliche Abwägungskriterien handelt es sich nämlich um nichtprognostische Indikatoren (Kapitel 7.3.3). Ihre Evaluierung benötigt keine umfassende Betrachtung aller relevanten Entwicklungsmöglichkeiten (was nicht ausschließt, dass sie für ausgewählte Szenarien evaluiert werden). Verglichen mit Dosis- oder Austragsindikatoren sind sie damit weniger abhängig von Fehleinschätzungen der tatsächlichen Systemmöglichkeiten (Kapitel 7.3.3). Auch muss ihre Wertermittlung nicht zwingend konservativ sein. Damit besäßen die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in erweiterter Form ein erhöhtes Potenzial, auch unähnliche Standorte in eine Sicherheitsrangfolge zu bringen.

Dabei muss allerdings bedacht werden, dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in ihrer Eigenschaft als lokale Indikatoren nur eine ungenaue Operationalisierung zusätzlicher zukünftiger Strahlenexpositionen erreichen können (Kapitel 7.3.1). Entscheiderinnen und Entscheider müssen einschätzen, ob ihnen diese Ungenauigkeit zu groß erscheint, um für gegebene Standorte eine Sicherheitsrangfolge bestimmen zu können. Das Ergebnis dieser Abschätzung wird u. a. davon abhängen, von welcher Art die in § 24 Abs. 1 Satz 2 StandAG geforderte sicherheitsgerichtete Abwägung der Abwägungskriterien ist und ob die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien um Indikatoren für technische und geotechnische Barrieren erweitert werden.

Schlussfolgerung für wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche

Es lässt sich festhalten, dass die besprochenen Kriterien des StandAG und der EndlSiAnfV zumindest in ihrer vorliegenden Form, also ohne weitere Ergänzungen, nicht in der Lage wären, wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche zu ermöglichen. Sie dürften aber Sicherheitsvergleiche durchaus erlauben, wenn die verglichenen Standorte eine starke Ähnlichkeit aufweisen, also beispielsweise das gleiche Wirtsgestein und Endlagerkonzept besitzen.

Auch wenn sich Dosis- und Austragsindikatoren nicht für wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche eignen, so bleiben die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, mit denen sie evaluiert werden, trotzdem sinnvoll. Denn sie stiften das Systemverständnis, das gemäß dem Rechtfertigungsmodell von *Navarro (2025b)* Voraussetzung für eine sicherheitsbezogene Rechtfertigung von Ausschlussentscheidungen ist.

Das größte Potenzial für wirtsgesteinsübergreifende Sicherheitsvergleiche bieten Kriterien vom Typ der geowissenschaftliche Abwägungskriterien (also lokale nichtprognostische Funktionsindikatoren, siehe Kapitel 7.4), sofern sie auch sämtliche technischen und geotechnischen Barrieren mitbewerten. Dieser Indikatortyp ist weniger von konservativen Annahmen sowie von Fehleinschätzungen von Systemmöglichkeiten betroffen. Allerdings geht er mit einer ungenauen Operationalisierung des Schutzniveaus einher – sofern „Schutz“ als Vermeidung zusätzlicher zukünftiger Strahlenexpositionen verstanden wird.

8.5 Zum Standortauswahlgesetz

Aus langzeitsicherheitsanalytischer Perspektive lässt sich aus den Ergebnissen, die in den Kapiteln 5 bis 7 sowie in *Navarro (2025b)* vorgestellt wurden, kein wesentlicher Korrekturbedarf für das Standortauswahlgesetz ableiten. Der allgemeine Grund hierfür dürfte in dem Konkretisierungsgrad des Standortauswahlgesetzes zu finden sein: Das Gesetz konkretisiert zwar die Verfahrensschritte und Auswahlkriterien relativ stark, lässt aber dennoch genug Spielraum für eine si-

cherheitsanalytisch sinnvolle Ausgestaltung. Das zeigen insbesondere die folgenden Punkte.

- Das StandAG schreibt zwar Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen vor, legt aber nicht fest, mit welcher sicherheitsanalytischen Argumentation sie einen Standortausschluss begründen. Damit lässt es Spielraum für eine relativ breite Palette an Ausschlussgründen. Wie in Kapitel 8.4.4 aufgezeigt wurde, könnte eine Erfüllung der Ausschlussbedingungen für einen bestimmten Standort z. B. aussagen,
 - a) dass der Standort unsicher ist,
 - b) dass er nicht so sicher wie andere Standorte ist oder
 - c) dass er gegen konsensuale sicherheitsbezogene konzeptionelle Anforderungen verstößt.

Ausschlussgrund c) lässt sich stets anwenden, weil die Kriterien des StandAG konsensuale Kriterien sind und somit konsensuale sicherheitsbezogene Präferenzen ausdrücken. Das bedeutet, dass sich jedes Ausschlusskriterium und jede Mindestanforderung mit dem Ausschlussgrund c) rechtfertigen ließe, was insbesondere dann genutzt werden kann, wenn sich für eines der Kriterien herausstellen sollte, dass es unzureichende Sicherheit (Grund a) oder geringere Sicherheit (Grund b) nicht zuverlässig nachweisen kann. Die sicherheitsanalytische Rechtfertigung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des Standortauswahlgesetzes wird also durch die Projektergebnisse gestärkt.

- Das StandAG fordert ein vergleichendes Verfahren, bei dem, wie in Kapitel 5.4 ausgeführt wurde, weniger günstige bzw. weniger geeignete Kandidaten ausscheiden. Die §§ 13, 14, 16 und 18 StandAG schreiben dazu vor, dass dies u. a. auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse, der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 zu geschehen habe. Mit dieser Vorgabe der Bewertungsgrundlage lässt das Standortauswahlgesetz immer noch Spielraum für eine Suche nach geeigneten sicherheitsanalytischen Verfahren zum Vergleich von Sicherheitsniveaus. Auch drückt es zumindest nicht explizit die Erwartung aus, dass ein solches Vergleichsverfahren immer – also auch im besonders komplizierten Fall des wirtsgesteinsübergreifenden Vergleichs – möglich sei. Insofern scheint das StandAG sogar Spielraum für mögliche zukünftige Erkenntnisse der Nichtvergleichbarkeit zu geben. Dass im Projekt Bedingungen einer Nichtvergleichbarkeit identifiziert wurden, läuft dem StandAG also nicht zuwider. Im Gegenteil scheint das StandAG mit seiner Forderung nach einem wissenschaftsbasierten, selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren (§ 1 Abs. 2 Satz 1 StandAG) zu solchen Untersuchungen eher einzuladen.

Das Standortauswahlgesetz lässt also Spielraum für unterschiedliche Arten der sicherheitsanalytischen Bewertung. Es ist wichtig zu betonen, dass dieser Spielraum auch sicherheitsanalytische unsinnige Bewertungsverfahren einschliesse, wenn das Standortauswahlgesetz nicht zugleich auch ein wissenschaftsbasiertes, selbsthinterfragendes und lernendes Verfahren einfordern würde. Aus dieser Forderung dürfte ableitbar sein, dass die eingesetzten sicherheitsanalytischen Bewertungsverfahren mit Blick auf die Bestimmung des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt sinnvoll sein sollten. Damit dürfte eine Hinterfragung sicherheitsanalytischer Bewertungsverfahren, wie sie im Projekt vorgenommen wurde, grundsätzlich im Einklang mit dem Standortauswahlgesetz stehen.

Literaturverzeichnis

ANDRA (2005a)

Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile. Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation. Meuse/Haute-Marne site. Collection les Rapports, 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry, France, 2005.

ANDRA (2005b)

Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile. Tome: Safety evaluation of a geological repository. Report Series, 525 S., ISBN 2-9510108-7-70108-8-5: Châtenay-Malabry, France, 2005.

Alt et al. (2017)

Alt, S., Kallenbach-Herbert, B. & Ustohalova, V.: Vergleichende Analyse der tschechischen Endlagerkriterien, Öko-Institut e.V.: Darmstadt, 21. Juli 2017.

Appel (2016)

Appel, D.: Kriterien zum Schutz des ewG durch das Deckgebirge. Einschätzung nach den Diskussionen in der "Adhoc-Ag Deckgebirge", Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, AG3-134, 5 S.: Berlin, 27. April 2016.

AkEnd (2002)

Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd. Abschlussbericht, 260 S.: Köln, Dezember 2002.

AtG (2011)

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I 1985, Nr. 41, S. 1565-1583), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I 2011, Nr. 43, S. 1704-1705).

AtG (2022)

Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I 1985, Nr. 41, S. 1565-1583), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 04. Dezember 2022 (BGBl. I 2022, S. 2153).

ASN (2008)

RFS-III.2.f du 01.06.1991 (abrogée par le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08) (ASN) zuletzt geändert 12. Februar 2008

Berkeley et al. (1991)

Berkeley, D., Humphreys, P., Larichev, O. & Moshkovich, H.: Modelling and supporting the process of choice between alternatives: the focus of ASTRIDA. Environments for Supporting Decision Processes, 59-82, 1991.

Best et al. (1982)

Best, G., Bornemann, O., Kockel, F. & Leydecker, G.: Bewertung von Salzformationen außerhalb Niedersachsens für die Errichtung von Endlagern. BGR-Bericht, 92 433, 48 S.: Hannover, 1982.

Bollingerfehr et al. (2011)

Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönneke, J. & Mingerzahn, G.: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Synthesebericht. FKZ 02 E 10346, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-29-2008-AB, 183 S.: Peine, November 2011.

Bracke et al. (2016)

Bracke, G., Beuth, T., Larue, P.-J., Moog, H. C., Seher, H. & Weyand, T.: Forschung und Entwicklung zu Methoden und Instrumenten des Langzeitsicherheitsnachweises (EMIL). Abschlussbericht, GRS-443, 59 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, Oktober 2016.

Bräuer (1999)

Bräuer, V.: Beauftragung der BGR zur Durchführung der Salinar- und Kristallinstudien. Präsentation, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). 1. Sitzung Arbeitskreis zur Auswahl von Endlagerstandorten, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Bonn, 26. Februar 1999.

Bräuer et al. (1994)

Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P. & Sprado, K.-H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 12437/91, 147 S.: Hannover, November 1994.

BT (2011)

Deutscher Bundestag (BT): Die Beschlüsse des Bundestages am 30. Juni und 1. Juli: Berlin, https://www.bundestag.de/webarchiv/textarchiv/2011/34915890_kw26_angenommen_abgelehnt-205788

BT (2013a)

Deutscher Bundestag (BT): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD, FDP und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Entwurf eines Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG). Drucksache des deutschen Bundestages, 17/13471, 36 S.: Berlin, 14. Mai 2013.

BT (2013b)

Deutscher Bundestag (BT): Stenografischer Bericht 241. Sitzung. Plenarprotokoll des deutschen Bundestages, 17/241: Berlin, 17. Mai 2013.

BT (2014)

Deutscher Bundestag (BT): Endlagerkommission hat Arbeit aufgenommen: Berlin, https://www.bundestag.de/webarchiv/textarchiv/2014/kommission_endlagerung-279544, abgerufen am 27. August 2024, Stand vom 22. Mai 2014.

BT (2017)

Deutscher Bundestag (BT): Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Drucksache des deutschen Bundestages, 18/11398, 77 S.: Berlin, 07. März 2017.

BT (2020)

Deutscher Bundestag (BT): Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Drucksache des deutschen Bundestages, 19/19291, 54 S.: Berlin, 18. Mai 2020.

BUND (2015)

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND): Vorschlag zur Klärung des Begriffs „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“. Beratungsunterlage zu TOP 6 der 11. Sitzung, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. /AG2-21, 3 S.: Berlin, 29. Oktober 2015.

BASE (2022a)

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Atomausstieg in Deutschland - Viele Aufgaben in der nuklearen Sicherheit bleiben, 144 S.: Berlin, September 2022.

BASE (2022b)

Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE): Endlagersuche. Standortauswahlverfahren: Berlin, https://www.base.bund.de/DE/themen/soa/standortauswahlverfahren/standortauswahlverfahren_node.html, abgerufen am 27. August 2024, Stand vom 28. November 2022.

BFE (2008)

Bundesamt für Energie (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Revision vom 30. November 2011, 92 S.: Bern, 02. April 2008.

BFE (2020)

Bundesamt für Energie (BFE): Geologische Tiefenlager, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/kernenergie/radioaktive-abfaelle/grundlagen-entsorgung/geologische-tiefenlager.html>, abgerufen am 15. Februar 2024, Stand vom 5. November 2020.

BSI (2018)

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Redundanz, Modularität, Skalierbarkeit, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2018.

BGR (1977)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle - Katalog geeigneter geologischer Formationen in der Bundesrepublik Deutschland: Hannover, 1977.

BGR (2007)

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen, 17 S.: Hannover / Berlin, April 2007.

BGE (2024)

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE): Standortauswahlverfahren. Das Verfahren: Peine, <https://www.bge.de/de/endlager-suche/standortauswahlverfahren/>, abgerufen am 27. August 2024

BMI (1983)

Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk (BMI) in der Fassung vom 20. April 1983 (GMBI. 1983, Nr. 13, S. 220)

BMU (2005)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Begründung. Entwurf eines Gesetzes zur Errichtung eines Verbands und zur Festlegung eines Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Verbands- und Standortauswahlgesetz - VStG), 73 S., 17. Juni 2005.

BMU (2010)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

BMUV (2024)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Standortauswahl für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle: Berlin, <https://www.bmuv.de/themen/nukleare-sicherheit/endlagerung/ueberblick-endlagerung/umsetzungsschritte-des-standortauswahlverfahrens-im-ueberblick>, abgerufen am 27. August 2024, Stand vom 16. Januar 2024.

BR (2013)

Bundesrat (BR): Stenografischer Bericht 912. Sitzung. Plenarprotokoll des Bundesrates, 912: Berlin, 05. Juli 2013.

BR (2017)

Bundesrat (BR): Gesetzesbeschluss des Deutschen Bundestages. Gesetz zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Drucksache des deutschen Bundesrates, 239/17, 4 S., 24. März 2017.

Calabrese (2019)

Calabrese, E. J.: The linear No-Threshold (LNT) dose response model: A comprehensive assessment of its historical and scientific foundations. *Chemico-Biological Interactions* 301, 6–25, DOI 10.1016/j.cbi.2018.11.020, 2019.

Chapman (2012)

Chapman, N.: TOPAZ Project - Long-term Tectonic Hazard to Geological Repositories, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), NUMO-TR-12-05, 94 S., October 2012.

Chuaqui (1991)

Chuaqui, R.: Truth, Possibility and Probability. *New Logical Foundations of Probability and Statistical Inference*. North-Holland Mathematics Studies, 166, 484 S., ISBN 0 444 88840 3, DOI 10.1016/s0304-0208(08)x7127-0, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland): Amsterdam, 1991.

CNE (1995)

Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE): Rapport d'évaluation No. 1, 164 S.: Paris, France, Juni 1995.

CURIE (2024a)

Resource Portal for DOE Nuclear Waste Management Information (CURIE): Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), <https://curie.pnnl.gov/SED/pages/waste-isolation-pilot-plant-wipp>, abgerufen am 14. Februar 2024, Stand von 2024

CURIE (2024b)

Resource Portal for DOE Nuclear Waste Management Information (CURIE): Yucca Mountain (YM), <https://curie.pnnl.gov/SED/pages/yucca-mountain-ym>, abgerufen am 14. Februar 2024, Stand von 2024

Dudenredaktion (2025)

Dudenredaktion: "Reserve" auf Duden online., <https://www.duden.de/node/121165/revision/1273350>, abgerufen am 17. März 2025

ENSI (2024)

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sachplan geologische Tiefenlager, <https://www.ensi.ch/de/themen/sachplan-geologische-tiefenlager/>, abgerufen am 14.06.24, Stand von 2024

EndKom (2015a)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Stellungnahme des Landes Niedersachsen zum Begriff „bestmöglich“. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. /AG3-21: Berlin, 11. Mai 2015.

EndKom (2015b)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Geowissenschaftliche Kriterien – Papier der Vorsitzenden der AG 3. Entsprechend der Beschlusslage der 15. Sitzung der AG 3 am 17. Dezember 2015, 54 S.: Berlin, 29. Dezember 2015.

EndKom (2016a)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Geowissenschaftliche Kriterien - Papier der Vorsitzenden der AG 3. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, AG3-91a, 71 S.: Berlin, 22. Februar 2016.

EndKom (2016b)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“. Integration der Definition in das Standortauswahlgesetz. Bericht der Vorsitzenden der AG 2 für die 23. Sitzung der Kommission. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 189, 4 S.: Berlin, 10. März 2016.

EndKom (2016c)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 6.2. Wie kommt man zu einem Standort mit der ‚bestmöglichen Sicherheit‘? Vorlage der AG 3 für die 28./29. Sitzung der Kommission am 23./24. Mai 2016. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 240, 2 S.: Berlin, 20. Mai 2016.

EndKom (2016d)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Gesamtberichtsentswurf. Vorlage für die 33. Sitzung der Kommission am 27. Juni 2016. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 261, 615 S., 24. Juni 2016.

EndKom (2016e)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Wortprotokoll der 33. Sitzung (öffentlicher Teil), 143 S.: Berlin, 27. Juni 2016.

EndKom (2016f)

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Abschlussbericht. Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.

EndlSiAnfV & EndlSiUntV (2020)

Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV & EndlSiUntV) in der Fassung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I 2020, Nr. 45, S. 2094–2106).

EndSiAnfV (2020)

Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndSiAnfV) in der Fassung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I 45, S. 2094–2103).

EndSiUntV (2020)

Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle - Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndSiUntV) in der Fassung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I 45, S. 2094–2103).

ESK (2013)

Entsorgungskommission (ESK): Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Stellungnahme der Entsorgungskommission, 50 S., 31. Januar 2013.

ESK (2021)

Entsorgungskommission (ESK): Standortvergleich. Diskussionspapier der Entsorgungskommission: Bonn, 18. Februar 2021.

EC (2009)

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation (EC): SAPIERR II - Strategic Action Plan for Implementation Of European Regional Repository, 2009.

Ewing & Grambow (2025)

Ewing, R. C. & Grambow, B.: Final thoughts: The fragile connection of safety and science in the geological disposal of radioactive waste. Bulletin of the Atomic Scientists 81(1), 48–52, DOI 10.1080/00963402.2024.2439761, 2025.

Faybishenko et al. (2016)

Faybishenko, B., Birkholzer, J., Sassani, D. & Swift, P.: International Approaches for Nuclear Waste Disposal in Geological Formations: Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation—Fifth Worldwide Review, LBNL-1006984, DOI 10.2172/1353043, 2016.

Fischer (2016)

Fischer, B.: Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 6.5.6. Hier: Stellungnahme zur Eingruppierung „Schützender Aufbau des Deckgebirges“ in die Gewichtungsguppe 2), Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (End-Kom). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 264, 24. Juni 2016.

Fischer-Appelt & Baltes (2010)

Fischer-Appelt, K. & Baltes, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik. Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. GRS-A-3536, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (GRS), GRS-A-3536: Köln, 01. Dezember 2010.

Fischer-Appelt et al. (2017)

Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Faß, T., Larue, P.-J., Mayer, K.-M., Seher, H. & Hartwig-Thurat, E.: Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). GRS-Bericht, GRS-478, ISBN 978-3-946607-61-8: Köln, Oktober 2017.

Frieling et al. (2019)

Frieling, G., Fischer-Appelt, K., Beuth, T. & Bracke, G.: MABeST - Methoden für sicherheitsgerichtete Abwägungen und vergleichende Bewertungen im Standortauswahlverfahren. FKZ: 4718F13001, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). GRS-A-Bericht, GRS-A-3974: Köln, November 2019.

GGSC (2019)

Gaßner, Groth, Siederer & Coll. (GGSC): Standortauswahl: Zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, Teil 1, 40 S.: Berlin, 18. Dezember 2019.

Government of India (2023)

Government of India (Hrsg.): Radioactive Waste Management: Indian scenario, Bhabha Atomic Research Centre (BARC), <https://www.barc.gov.in/pubaware/nw.html>, abgerufen am 23. November 2023, Stand von 2023

Grunwald (2016)

Grunwald, A.: Kapitel 6.2 Was ist ein Standort mit der „bestmöglichen“ Sicherheit?, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. /AG3-135, 2 S.: Berlin, 11. Mai 2016.

Heiermann & Olszok (2024)

Heiermann, M. & Olszok, V.: Transdisciplinary research on the safety case for nuclear waste repositories with a special focus on uncertainties and indicators. *Frontiers in Nuclear Engineering* 3-2024, DOI 10.3389/fnuen.2024.1414964, 2024.

Hoth et al. (2007)

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H.: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (Hrsg.), 118 S.: Berlin / Hannover, 01. April 2007.

IAEA (2011a)

International Atomic Energy Agency (IAEA): Disposal of Radioactive Waste. Specific Safety Requirements, 62 S., IAEA: Vienna, 2011.

IAEA (2004)

International Atomic Energy Agency (IAEA): Developing multinational radioactive waste repositories: Infrastructural framework and scenarios of cooperation, TECDOC-1413: Wien, Oktober 2004.

IAEA (2011b)

International Atomic Energy Agency (IAEA): Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. No. WS-R4., 2011.

IAEA (2011c)

International Atomic Energy Agency (IAEA): Viability of Sharing Facilities for the Disposal of Spent Fuel and Nuclear Waste. IAEA-TECDOC-1658: Wien, 2011.

IAEA (2016)

International Atomic Energy Agency (IAEA): Framework and Challenges for Initiating Multinational Cooperation for the Development of a Radioactive Waste Repository, NW-T-1.5: Wien, 2016.

ICRP (2007)

International Commission on Radiological Protection (ICRP): The 2007 recommendations of the International Commission of Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, ICRP Publication 103 (Users Edition), 332 S., ISBN 0702030481, Elsevier, 2007.

Jahn et al. (2016)

Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L.: Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT). Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis. Ergebnisbericht; FKZ: 02E11061C, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 146 S.: Hannover, 08. Januar 2016.

Jaritz (1983)

Jaritz, W.: Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. BGR-Bericht, 94 770, 20 S.: Hannover, 1983.

Johnson et al. (2002)

Johnson, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G. & Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA). Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 360 S.: Wetztingen, 01. Dezember 2002.

Kockel et al. (1995)

Kockel, F., Krull, P., Fischer, M., Frisch, U. & Stiewe, H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 138 S.: Hannover, August 1995.

Kreusch (1999)

Kreusch, J.: Anforderungen an Standortsuche/Eignungsnachweis. Präsentation. 1. Sitzung Arbeitskreis zur Auswahl von Endlagerstandorten, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Bonn, 26. Februar 1999.

Krull (1991)

Krull, P.: Bewertung der Salzformationen der Bundesländer Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Thüringen für die Errichtung von Endlagern wärmeentwickelnder Abfälle. BGR-Bericht, 2024209, 133 S.: Berlin, 1991.

Kudla (2015)

Kudla, W.: Zur Definition der Begriffe „Bestmöglicher Standort“ bzw. „Bestmögliche Sicherheit“, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. /AG3-17: Berlin, 07. Mai 2015.

Larue et al. (2015)

Larue, P.-J., Fischer-Appelt, K. & Hartwig-Thurat, E.: Entwicklung des Standes von W & T bei der Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises für Endlager an den Beispielen VSG und Konrad. Bericht zum Arbeitspaket 2. Untersuchung und Entwicklung von sicherheitstechnischen Bewertungen für Endlager für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und Bereitstellung des notwendigen Instrumentariums am Beispiel des Endlagers Konrad, GRS-384, 108 S., ISBN 978-3-944161-65-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, September 2015.

Laux et al. (2012)

Laux, H., Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie, 8. Aufl., 577 S., DOI 10.1007/978-3-642-23511-5, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2012.

MacKinnon et al. (2012)

MacKinnon, R. J., Sevougian, S. D., Leigh, C. D. & Hansen, F. D.: Towards a Defensible Safety Case for Deep Geologic Disposal of DOE HLW and DOE SNF in Bedded Salt, Sandia National Laboratories (SNL). SAND2012-6032: Albuquerque, July 2012.

Mönig et al. (2020)

Mönig, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Fahl and, S., Frenzel, B., Maßmann, J., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E. K., Thiedau, J., Weber, J. R. & Wolf, J.: RESUS, Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG. Synthesebericht, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), GRS-567, 192 S., ISBN 978-3-947685-53-0: Köln, 2020.

NRWDI (2023)

National Radioactive Waste Disposal Institute (NRWDI): NRWDI ANNUAL REPORT 2022-2023, RP 86/2023, 2023.

NAGRA (2014a)

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme. Nagra Technischer Bericht, NTB 14-03: Wettingen, Dezember 2014.

NAGRA (2014b)

Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Konzepte der Standortuntersuchungen für SGT Etappe 3. Nagra Arbeitsbericht, NAB 14-83, 89 S.: Wettingen, Dezember 2014.

Navarro (2025a)

Navarro, M.: How safety concepts can be rejected for reasons of safety. (Abstract and Poster), Federal Office for the Safety of Nuclear Waste Management (BASE), DOI 10.5194/safend2025-166: Berlin, 2025.

Navarro (2025b)

Navarro, M.: Foundations of site selection procedures for deep geological repositories: An argument-based model to explain how site rejection decisions can be justified by inaccurate operationalizations and assessments of long-term protection. Front. Nucl. Eng. Volume 4 - 2025, DOI 10.3389/fnuen.2025.1664370, 2025.

NLA (1977)

Niedersächsisches Landesarchiv (NLA): Informationsblatt der niedersächsischen Landesregierung über die Planung einer „Entsorgungsanlage“ in Gorleben. Aus den Magazinen des Landesarchivs, https://nla.niedersachsen.de/startseite/landesgeschichte/aus_den_magazinen_des_landesarchivs/2017/aus-den-magazinen-des-landesarchivs-november-2017-149899.html, abgerufen am 23. August 2024, Stand vom November 2017.

Nies (1999)

Nies, A.: Einladung zur ersten Sitzung des BMU-Arbeitskreises zur Auswahl von Endlagerstandorten, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 6 S.: Bonn, 18. Februar 1999.

NEA (2022)

Nuclear Energy Agency (NEA): NEA Annual Report 2022, NEA No. 7653: Boulogne-Billancourt, France, 2022.

NWMO (2010)

Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Process for Selecting a Site for Canada's Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel, 52 S., 2010.

Nuclear Waste Services (2023)

Nuclear Waste Services: Permanently safe, sooner. Our Corporate Strategy., 25. April 2023.

NUMO (2023)

NUMO: The geological disposal program, Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO): Tokyo, https://www.numo.or.jp/en/jigyounew_eng_tab03.html, abgerufen am 28. März 2023

OECD-NEA (2002)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): The Handling of Timescales in Assessing Post-closure Safety of Deep Geological Repositories. Workshop Proceedings, Paris, France 16-18 April 2002. Radioactive Waste Management, ISBN 92-64-09911-5, OECD-NEA: Paris, France, 2002.

OECD-NEA (2004)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Nature and purpose. Radioactive Waste Management, NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6: Paris, 01. Januar 2004.

OECD-NEA (2009)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC). Outcomes of the INTESC Project. NEA, 6251, ISBN Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA), OECD, 2009.

OECD-NEA (2012a)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcomes of the NEA MeSA Initiative. Radioactive Waste Management, 6923, 238 S., ISBN 978-92-64-99190-3, OECD-NEA: Issy-les-Moulineaux, France, 2012.

OECD-NEA (2012b)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): 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), 125 S.: Paris, 2012.

OECD-NEA (2013)

Organisation for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. Radioactive Waste Management, NEA/RWM/R(2013)1, OECD-NEA: Paris, France, 2013.

Okamura (2023)

Okamura, L.: Atom- und Atommüllpolitik in Japan – Ein Jahrzehnt nach Fukushima. SENSU REVIEW of INTERNATIONAL COMMUNICATION (Volume Number 2), 38–45, 28. März 2023.

Röhlig (2015)

Röhlig, K.-J.: Sachplan Etappe 2: Expertenauftrag Methodik (Multikriterienanalysen). Expertenbericht. Schweizerische Eidgenossenschaft (Hrsg.), Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI). ENSI, 33/465, 31 S., Juli 2015.

Sevougian et al. (2019)

Sevougian, S. D., Mariner, P. E., Connolly, L. A., MacKinnon, R. J., Rogers, R. D., Dobson, D. C. & Prouty, J. L.: DOE SFWST Campaign R&D Roadmap Update. Fuel Cycle Research & Development. U.S. Department of Energy (DOE) (Hrsg.), Sandia National Laboratories (SNL), SAND2019-9033R, 22. Juli 2019.

Son et al. (2023)

Son, K., Choi, K., Yang, J., Jeong, H., Kim, H., Chang, K. & Heo, G.: A review of the features, events, and processes and scenario development for Korean risk assessment of a deep geological repository for high-level radioactive waste. *Nuclear Engineering and Technology* 55(11), 4083–4095, 2023.

StandAG (2013)

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 23. Juli 2013 (BGBl. I 2013, Nr. 41, S. 2553-2561).

StandAG (2023)

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) (StandAG) zuletzt geändert 2023 (BGBl. I 2023, Nr. 88).

StandAG (2017)

Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074–1100).

SÚJB (2023)

State office for nuclear safety (SÚJB): RAW Management: Prag, <https://www.sujb.cz/en/nuclear-safety/radioactive-waste-management>, abgerufen am 8.12.23, Stand von 2023

SKB (2011)

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 276 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.

Svenson (1979)

Svenson, O.: Process Descriptions of Decision Making. *Organizational Behavior and Human Performance* 23, 86–112, DOI 10.1016/0030-5073(79)90048-5, 1979.

Thomauske (2014)

Thomauske, B.: AkEND Vorgaben – Arbeitsweise Standortsuche und Zeitbedarf. Präsentation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH). 7. Sitzung der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle, Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EndKom): Berlin, 06. Dezember 2014.

NWTRB (2015)

US Nuclear Waste Technical Review Board (NWTRB): Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel. Overview and Summary. Report to the United States Congress and the Secretary of Energy, 68 S.: Washington, DC, USA, 2015.

VStG (2005)

Gesetz zur Errichtung eines Verbands und Festlegung eines Standortauswahlverfahrens für die Endlagerung radioaktiver Abfälle (Verbands- und Standortauswahlgesetz – VStG) (VStG)

Weyand et al. (2020)

Weyand, T., Beuth, T., Eckel, J., Fischer-Appelt, K. & Navarro, M.: Fachberatung des BMU bei wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen im Zusammenhang mit Endlagerung und Standortauswahl. Abschlussbericht zum Vorhaben 4717E03210, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS). GRS-A-Bericht, GRS-A-4011, 38 S.: Köln, Oktober 2020.

WNA (2020)

World Nuclear Association (Hrsg.): International Nuclear Waste Disposal Concepts, 2020.

Zebralog (2016)

Zebralog: Ergebnisdokumentation. Fachtagung und Online-Konsultation „Kriterien für die Standortauswahl“ der von Bundestag und Bundesrat berufenen Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß 3.2.4 des Beteiligungskonzepts (K-Drs. 108 neu). Drucksache der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-Drs. 181: Berlin, 17. Februar 2016.

Zuidema et al. (2014)

Zuidema, P., Albert, W., Deplazes, G., Gautschi, A., Gribi, P., Hertrich, M., Madritsch, H., Ruff, M., Schneider, J. & Schnellmann, M.: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA). Nagra Technischer Bericht, NTB 14-01, 390 S.: Wetztingen, Dezember 2014.

Tabellenverzeichnis

Tab. 7-1:	Merkmale und Anwendungsbeschränkungen globaler und lokaler Indikatoren.....	67
Tab. 7-2:	Merkmale und Anwendungsbeschränkungen von Dosis- und Funktionsindikatoren.....	70
Tab. 7-3:	Merkmale und ableitbare Anwendungsbeschränkungen prognostischen und nichtprognostischen Indikatoren.	74
Tab. 7-4:	Realisierbare Indikatortypen mit prototypischen Indikatoren	75

A Kurze Einführungen für Fachfremde

A. 1 Geologische Endlager für hochradioaktive Abfälle

Hochradioaktive Abfälle sollen in Deutschland im tiefen Untergrund (bis in eine Tiefe von etwa 1,5 Kilometern) gelagert werden. Ziel ist es, Mensch und Umwelt über einen Zeitraum von 1 Million Jahre vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen der Abfälle zu schützen (vgl. § 1 Abs. 2 StandAG). Eine Rückholung der Abfälle ist nicht geplant, soll aber während der Betriebsphase möglich sein. Zusätzlich sollen für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers ausreichende Vorkehrungen für eine mögliche Bergung der Abfälle vorgesehen werden. Die Sicherheit soll nachsorgefrei durch das Endlager selbst hergestellt werden. Sie wird dann **Langzeitsicherheit** genannt. Bewertungen der Langzeitsicherheit heißen **Langzeitsicherheitsanalysen** und besitzen eine eigene Methodik, zu der auch die Szenarienentwicklung gehört (siehe z. B. *OECD-NEA 2012a*).

Die geologische Formation, in die das Endlagerbergwerk gebaut wird, heißt **Wirtsgestein**²⁰. Sie ist zugleich auch Teil eines hydrogeologischen Systems, in dem sich Grundwasser befindet. Die Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers sinkt im Allgemeinen mit der Undurchlässigkeit der durchflossenen Gesteine und der **Teufe** (d. h. Tiefe).

Das StandAG lässt die Wirtsgesteine **Steinsalz, Tongestein und Kristallgestein**²¹ zu (§ 1 Abs. 3 StandAG). Dabei handelt es sich um sehr weit gefasste Gesteinsgruppen, die ihrerseits Gesteine mit erheblich unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften enthalten können. Eine besonders breite Gesteinspalette umfasst die Gruppe der Kristallgesteine, da sie sowohl Vulkanite und Plutonite als auch Metamorphite enthalten kann.

Tongestein und Steinsalz kommen vor allem wegen ihrer sehr geringen oder verschwindend geringen Wasserdurchlässigkeit als Wirtsgesteine in Frage. Innerhalb solcher Wirtsgesteine soll in Deutschland ein **einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)** ausgewiesen werden, der für die Rückhaltung der Radionuklide zuständig ist (siehe auch Begriffsbestimmung in § 2 Punkt 9 StandAG).

²⁰ Bei den Begriffen *Formation* und *Gestein* handelt es sich strenggenommen nicht um geologische Fachbegriffe. Im Bereich der Endlagerung wird der Begriff *Wirtsgestein* sowohl zur lithologischen als auch zur räumlichen Charakterisierung verwendet. Räumliche Bereiche des tieferen Untergrundes werden in der Geologie *Gebirge* genannt. Im geologischen Sinne wäre ein Wirtsgestein also ein Gebirgsbereich, der sich lithologisch von seiner Umgebung absetzt und ein Endlager aufnehmen kann.

²¹ Auch die Begriffe *Tongestein* und *Kristallgestein* sind keine geologischen Fachbegriffe, aber im Bereich der Endlagerung gebräuchlich.

Kristallingesteine sind oft *geklüftet* und *gestört*, wobei Klüfte und Störungen Gesteinsbruchflächen sind, die Wasserwege erzeugen können. Deshalb verlassen sich Endlager in Kristallingestein zur Rückhaltung von Radionukliden in der Regel weniger auf geologische, sondern mehr auf **technische und geotechnische Barrieren**.

Endlager bestehen aus Endlagerkomponenten, zu denen auch das Wirtsgestein gehört. Endlagerkomponenten können **Sicherheitsfunktionen** zugewiesen werden. Sicherheitsfunktionen beschreiben, wie eine Komponente zur Rückhaltung von Radionukliden oder zum Schutz anderer Komponenten beitragen soll. Rückhaltende Sicherheitsfunktionen findet man zum Beispiel bei der Abfallmatrix, den Abfallbehältern, den Bentonit-Puffern, den Bohrloch-, Strecken- und Schachtabdichtungen und dem Wirtsgestein.

Welche Sicherheitsfunktionen ein Endlager besitzt und wie die Erfüllung von Sicherheitsfunktionen bemessen wird, wird im sogenannten **Sicherheitskonzept** dokumentiert. Ein Sicherheitskonzept führt die Prinzipien und technischen Maßnahmen aus, mit denen Sicherheit erreicht werden soll. Auf allgemeinsten Ebene gehört auch das in § 4 EndlSiAnfV festgelegte **Prinzip des sicheren Einschlusses** zum Sicherheitskonzept. Dieses schreibt vor, dass Sicherheit durch den Einschluss der Radionuklide in großen Tiefen entstehen soll und nicht etwa nur durch ihre Verdünnung im Deckgebirge oder in der Biosphäre.

Im **Endlagerkonzept** wird beschrieben, wie das Sicherheitskonzept konkret umgesetzt wird. Es legt den genauen Aufbau des Endlagers fest und welche Materialien verwendet werden. Endlagerkomponenten müssen so ausgelegt werden, dass sie Sicherheitsfunktionen erfüllen können und dabei wenig störanfällig, d. h. robust sind.

Endlagersysteme werden oft als **Multibarrierensysteme** interpretiert. Der Begriff verweist nicht nur darauf, dass verschiedene Barrieren vorhanden sind (wie etwa die Abfallmatrix, der Abfallbehälter, der Bentonit-Puffer, die Abdichtungsbauwerke oder das Wirtsgestein). Der Begriff spielt vor allem darauf an, dass Sicherheit auch durch **Redundanzen** im Barrierensystem erzeugt wird, die als **Sicherheitsreserven** fungieren. Hierdurch wird ein passives *Defence-in-Depth*-Prinzip (OECD-NEA 2012a, S. 224) realisiert. In einem Endlagersystem können beispielsweise folgende Formen von Redundanz auftreten:

- **Vorhandensein entbehrllicher Endlagerkomponenten.** Dies könnte z. B. eine geringpermeable Schicht im Deckgebirge sein, die zur Herstellung von Sicherheit eigentlich nicht benötigt wird.
- **Vorhandensein entbehrllicher Sicherheitsfunktionen.** Bei einem geringpermeablen Tongestein mit hoher Sorptionsfähigkeit könnte es z. B. sein, dass die hohe Sorptionsfähigkeit zur Herstellung von Sicherheit eigentlich nicht nötig wäre.

- **Entbehrliche Separation** (siehe auch *BSI 2018*, S. 9). Beispielsweise sorgt die Aufteilung der Abfälle auf mehrere Einlagerungsstrecken dafür, dass eine fehlerhaft konstruierte Abdichtung nicht alle Abfälle betrifft.
- **Diversität, d. h. Vorhandensein unähnlicher Komponenten mit ähnlicher Funktion** (siehe auch *BSI 2018*, S. 9). Zum Beispiel besitzen Abfallbehälter und Bentonitversatz eine Rückhaltefunktion, sie implementieren diese aber unterschiedlich, weil sie aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Das reduziert das Risiko systematischer Fehler, die von bestimmten Komponententypen ausgehen könnten.

Das Multibarrierenprinzip ist nicht so zu verstehen, dass jede einzelne Komponente von anderen Komponenten ersetzt werden könnte. Das wäre beispielsweise bei der Komponente des einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht der Fall. Es drückt eher aus, dass die Erzeugung von Redundanzen ein Prinzip der Endlagerkonzeption sein sollte. Dabei spielt es für die Sicherheit des Endlagersystems keine Rolle, ob die Redundanzen planmäßig oder als Nebenwirkung notwendiger Konstruktionsmaßnahmen entstehen.

A. 2 Langzeitsicherheitsanalytik

Langzeitsicherheitsanalysen bewerten die langfristige Sicherheit eines Endlagers im sogenannten **Bewertungszeitraum**, den das Standortauswahlgesetz auf 1 Million Jahre festlegt. Sie untersuchen dabei physikalische und chemische Prozesse, die im Endlagersystem ablaufen. Sie identifizieren auch Ungewissheiten und untersuchen ihren Einfluss auf die Sicherheitsbewertung.

Im Rahmen von Genehmigungsverfahren bzw. zur Vorbereitung solcher Verfahren muss gezeigt werden, dass ein Endlager ausreichend sicher ist. Es ist die Aufgabe der Langzeitsicherheitsanalysen, dies zu überprüfen und das Verständnis der im Endlagersystem ablaufenden Prozesse zu verbessern.

Weil der Bewertungszeitraum von 1 Million Jahre die menschliche Lebenszeit um ein Vielfaches übersteigt, können Langzeitsicherheitsanalysen nicht auf Erfolgs- oder Misserfolgserfahrungen der Endlagerung zurückgreifen. Sie erfordern daher eine umfangreiche und komplizierte Argumentation, bei der umfangreiche Erkenntnisse aus der Forschung und Standorterkundung sowie komplexe sicherheitsanalytische Methoden zu Hilfe genommen werden müssen. Diese Argumente können in einem sogenannten **Safety Case** (*OECD-NEA 2012b; OECD-NEA 2013*) dargelegt werden. Bis zur Mitte der 2010er-Jahre, war es noch üblich, hier von einem „Langzeitsicherheitsnachweis“ zu sprechen (*ESK 2013; Bracke et al. 2016; Jahn et al. 2016; Larue et al. 2015*). Dieser Begriff wurde später seltener gebraucht, wohl auch, um angesichts unvermeidbarer Ungewissheiten den Eindruck zu vermeiden, dass es sich um einen strengen Beweis handeln könne. Da es aber auch schwächere Formen des Beweises gibt, beabsichtigt die Vermeidung des Begrif-

fes Langzeitsicherheitsnachweis vermutlich weniger eine Begriffspräzisierung als vielmehr eine Vermeidung von Missverständnissen.

Wesentliche Vorgaben zur Bewertung der Langzeitsicherheit sind in der *Verordnung über die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle* (EndlSiAnfV) enthalten. Dort wird beispielsweise festgelegt, dass die zu untersuchenden Endlagerentwicklungen in **erwartete und abweichende Entwicklungen** unterschieden werden sollen und welche Dosisgrenzwerte in diesen Entwicklungen eingehalten werden müssen.

Ein wichtiges sicherheitsanalytisches Werkzeug ist die numerische Modellierung. **Numerische Modelle**²² sind Computerprogramme, die bestimmte Aspekte eines Endlagersystems abbilden und zeitliche Entwicklungen berechnen. Oft beruht ein numerisches Modell auf Annahmen, die mit anderen Modellen überprüft werden müssen. Daher verwenden Langzeitsicherheitsanalysen oft mehrere numerische Modelle für unterschiedliche Zwecke.

Jedes numerische Modell hat individuelle Stärken und Schwächen. So können komplexere Modelle tiefere Einblicke in Detailprozesse und Entwicklungsmöglichkeiten eines Endlagersystems eröffnen; sie reagieren allerdings auch sensibler auf Fehler in den Modellannahmen. Dagegen sind einfache Modelle tendenziell weniger störanfällig; dagegen sind sie weniger geeignet, die Bandbreite der Entwicklungsmöglichkeiten auszuloten. Oft werden daher unterschiedliche Modelle verwendet, um ein und dasselbe System aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu betrachten (eine Strategie der **Diversität**). Solche Modelle werden auch **komplementär** genannt. Widersprechen sich ihre Ergebnisse stark, dann stößt das eine Ursachen- und Fehlersuche an. Dadurch verbessert sich oft auch das Systemverständnis. Solche **Gegenprüfungen** durch andere Modelle oder andere Modellierungsteams sind daher eine wichtige sicherheitsanalytische Strategie. Sie findet sich letztendlich auch darin wieder, dass die Aufsicht ausgewählte Modellrechnungen der Verfahrensbetreiberin gegenprüft.

Es ist unmöglich, ein Endlagersystem in allen seinen Details zu kennen. Langzeitsicherheitsanalysen operieren daher mit vielen **Ungewissheiten**. Im Prinzip können Ungewissheiten jeden Aspekt eines Endlagersystems betreffen: Seine Eigenschaften und Zustände, die in ihm wirkenden Mechanismen, seine Entwicklung oder die äußeren Einflüsse, denen es ausgesetzt ist. Ungewissheiten können einer begrenzten Erkenntnisfähigkeit entspringen und heißen dann **epistemisch**. Entspringen sie einem Zufallsverhalten des Endlagers, heißen sie **aleatorisch**. Aleatorische Ungewissheiten charakterisieren das zu bewertende System, während epistemische Ungewissheiten die Grenzen unserer Erkenntnisfähigkeit mitbewerten. Die Unterscheidung dieser beiden Ungewissheitstypen ist daher für die Ein-

²² Hierfür werden oft auch andere, ebenfalls unspezifische Begriffe verwendet wie *Code*, *Programm* oder *Modell*. Der Begriff *Modellrechnung* verweist in der Regel auf das Ergebnis eines Programmlaufs mit konkreten Eingabedaten.

schätzung der Objektivität bzw. Subjektivität der Langzeitsicherheitsbewertung wichtig. Einige epistemische Ungewissheiten lassen sich reduzieren, indem man mehr Forschung betreibt und Wissenslücken schließt.

Langzeitsicherheitsanalysen behandeln Ungewissheiten auf unterschiedliche Weise. In Deutschland verwendet man die Methode der **Szenarientwicklung** für eine erste, grobe Unterteilung der Möglichkeiten eines Endlagersystems. Dabei werden größere Entwicklungsklassen, die **Szenarien**, abgeleitet. Einige Szenarien müssen mit numerischen Modellen bewertet werden. Auch dabei lassen sich Ungewissheiten berücksichtigen, etwa indem man alternative Modelle und Parameterwerte in sogenannten **Unsicherheitsanalysen** untersucht.

Wenn gezeigt werden soll, dass ein Endlager die Sicherheitsanforderungen erfüllt, dann dürfen Langzeitsicherheitsanalysen die Sicherheit unterschätzen. Das erhöht das Vertrauen in die Aussagen, dass das Endlager tatsächlich sicher ist, wenn die Langzeitsicherheitsanalyse zu diesem Ergebnis kommt. Eine solche sicherheitsunterschätzende Bewertung wird „**konservativ**“ genannt. Im Wesentlichen werden dabei ungewisse Szenarien- oder Modellannahmen durch pessimistische Annahmen ersetzt. Durch dieses Verfahren reduziert sich die Zahl der ungewissen Informationen, von denen die Sicherheitsbewertung abhängt. So wäre es beispielsweise nicht mehr wichtig, die genauen Korrosionsraten von Abfallbehältern zu kennen, wenn man die konservative Annahme trafe, dass es gar keine Abfallbehälter gäbe. Man erkennt hieran, dass konservative Annahmen selten realistisch sind. Sie sind dennoch in der Lage, realistisch einzuschätzen, wie hoch die Sicherheit eines Endlagers mindestens ist.