

Standortauswahl für ein Endlager
für Wärme entwickelnde radio-
aktive Abfälle:

Empfehlungen der DAEF zu Rolle
und Methodik der im Standortaus-
wahlgesetz vorgesehenen Sicher-
heitsuntersuchungen

Juni 2017

Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik der im Standortauswahlgesetz vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen

Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung

Vorsitzender:

Prof. Dr. Horst Geckeis,
Karlsruhe Institut für Technologie (KIT)
Institut für nukleare Entsorgung
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Stellvertretender Vorsitzender:

Dr. Jörg Mönig
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Bereich Endlagersicherheitsforschung
Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig

Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	5
2	Definitionen und regulatorische Grundlagen	7
2.1	Begrifflichkeiten	7
2.2	Regulatorische Grundlagen und Empfehlungen	9
3	Erfahrungen und Vorgehensweisen in anderen Ländern	12
4	Sicherheitsuntersuchungen beim Standortauswahlverfahren in Deutschland	17
4.1	Rolle der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren	17
4.2	Methodik der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren ...	19
4.2.1	Gemeinsame methodische Grundlagen	19
4.2.2	Methodische Unterschiede und Besonderheiten der Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des Auswahlverfahrens	24
4.2.2.1	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 1 vor der übertägigen Erkundung	25
4.2.2.2	Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 2 nach der übertägigen Erkundung	29
4.2.2.3	Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 3 nach untertägiger Erkundung	30
5	Empfehlungen	31
6	Literatur	33

Abbildung

Abb. 1: Komponenten des Safety Case (IAEA 2012)	10
--	----

1 Einleitung und Zielsetzung

Das im Juli 2013 in Kraft gesetzte „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz StandAG)“ ist per Gesetz vom 5. Mai 2017 fortentwickelt worden. Die zur Vorbereitung des Standortauswahlverfahrens vom Bundestag 2014 eingesetzte Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe¹ hat ihren Abschlussbericht, der u. a. Empfehlungen für Auswahl- und Abwägungskriterien und Grundzüge für Vorgehensweisen bei der Standortauswahl enthält, am 05. Juli 2016 dem Deutschen Bundestag vorgelegt (Endlagerkommission 2016). Diese Empfehlungen bildeten die Grundlagen für die Fortentwicklung des StandAG durch den Deutschen Bundestag.

Das revidierte StandAG in der Fassung vom 05. Mai 2017 ist am 16. Mai 2017 in Kraft getreten. In § 1, Absatz 2, des StandAG wird das übergeordnete Ziel genannt: „Mit dem Standortauswahlverfahren soll in einem partizipativen, wissenschaftsbasierten, transparenten selbsthinterfragenden und lernenden Verfahren [...] ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung [...] in der Bundesrepublik Deutschland ermittelt werden. 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 Jahre gewährleistet.“

Der Ablauf des Standortauswahlverfahrens ist in Kapitel 2 des StandAG vom 17. Mai 2017 festgelegt und untergliedert sich in mehrere Phasen²:

- In Phase 1 wendet der Vorhabenträger auf Grundlage der geologischen Daten für das gesamte Bundesgebiet, die von den zuständigen Fachbehörden des Bundes und der Länder zur Verfügung zu stellen sind, zunächst die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22 und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 an. Durch Anwendung geowissenschaftlicher Abwägungskriterien werden Teilgebiete ermittelt, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen. Für diese Teilgebiete werden „repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ durchgeführt und darauf aufbauend unter erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Standortregionen für eine übertägige Erkundung vorgeschlagen.
- In Phase 2 werden die möglicherweise geeigneten Standortregionen übertägig erkundet. Mit den danach vorliegenden Informationen werden dann „weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“ und weitere vergleichende Analysen und Ab-

1 Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wird im Folgenden als "Endlagerkommission" bezeichnet

2 Im revidierten StandAG in der Fassung vom 5. Mai 2017 wird nur vereinzelt und in allgemeiner Form der Begriff „Phase“ im Zusammenhang mit den drei wesentlichen Entscheidungen im Standortauswahlverfahren (Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung, Entscheidung über untertägige Erkundung und Standortentscheid) verwendet. Im Bericht der Endlagerkommission von 2016 wurden die Zeitbereiche im Vorfeld dieser drei Entscheidungen durchgängig mit Phase 1, Phase 2 und Phase 3 bezeichnet. Diese Phasenbezeichnungen werden in diesem Dokument benutzt, auch um Zitatstellen aus dem Bericht der Endlagerkommission in den richtigen Kontext zu stellen.

wägungen durchgeführt. Ziel ist die Auswahl von Standorten für die untertägige Erkundung.

- In Phase 3 erfolgt die systematische untertägige Erkundung der ausgewählten Standorte und eine vertiefte Untersuchung im Hinblick auf die Anforderungen an eine sichere Endlagerung. Dazu gehören auch „*umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen*“. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchungen und mit Hilfe vorher abzuleitender Prüfkriterien werden die Standorte anschließend vergleichend bewertet. Ziel ist die Benennung eines Standortes.

Gemäß StandAG bleiben die anzuwendenden Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sowie die Anforderungen an die Sicherheitsuntersuchungen während des gesamten Standortauswahlverfahrens gültig. Der Vorhabenträger führt immer die entsprechenden Arbeiten durch und erarbeitet Vorschläge für die anstehenden Entscheidungen. Die Vorschläge des Vorhabenträgers werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Öffentlichkeitsbeteiligung, der Reviews und der Nachprüfrechte der Regionalkonferenzen jeweils vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE) geprüft. Empfehlungen dazu werden an das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) übermittelt, das anschließend den Deutschen Bundestag und den Bundesrat unterrichtet. Alle Entscheidungen im Standortauswahlverfahren werden durch Bundesgesetz beschlossen.

Die methodischen Vorgehensweisen und Inhalte der verschiedenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind im StandAG in § 27 in übergeordneter Weise beschrieben. Mit § 27, Abs. 6, StandAG wird das BMUB ermächtigt, „*durch Rechtsverordnung zu be-*

stimmen, welche Anforderungen für die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren gelten“. Im Bericht der Endlagerkommission werden in Teil A, Kap. 4.3.3, zunächst sehr allgemein Anforderungen an die Sicherheitsuntersuchungen beschrieben. Eine Konkretisierung erfolgt in Teil B, Kapitel 6.5.2, ohne dabei näher auf die Unterschiede in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens einzugehen. Es wird dabei deutlich, dass die verschiedenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sich in Ziel und Inhalt an Sicherheitsnachweisen orientieren sollen, die bei der Beantragung der Genehmigung zur Errichtung, zum Betrieb und zum Verschluss eines Endlagers für radioaktive Abfälle an einem ausgewählten Standort vom Vorhabenträger vorzulegen sind. Damit wird auch darauf hingewirkt, dass am letztlich ausgewählten Standort gute Aussichten bestehen, die geforderten Sicherheitsnachweise tatsächlich führen zu können. Andererseits dürfen die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aber nicht mit diesen Sicherheitsnachweisen gleichgesetzt werden. Der wesentliche Grund dafür ist, dass die Zielsetzungen der im Standortauswahlverfahren zu treffenden Entscheidungen und die Kenntnisse zu den Standortgegebenheiten zum jeweiligen Entscheidungszeitpunkt sehr unterschiedlich sind und der Schwerpunkt ausschließlich in der Langzeitsicherheit gesehen wird.

Mit dem vorliegenden Papier unterbreitet die DAEF Vorschläge zur Konkretisierung der Vorgehensweise bei den in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Berücksichtigt werden dabei auch die bisherigen internationalen Erfahrungen im Rahmen von Standortauswahlprozessen. Die DAEF möchte damit auch zur Klärung von Begrifflichkeiten beitragen, die Aussagekraft und die

Grenzen von Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen von Standortauswahlprozessen beleuchten und zielgerichtete Vorgehensweisen für die einzelnen Eingangsschritte (Phasen) beschreiben.

Die Ausführungen beziehen sich wie im Bericht der Endlagerkommission (Endlagerkommission 2016) ausschließlich auf vorläufige Sicherheitsuntersuchungen, die im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens durchgeführt werden und den Zeitraum nach Stilllegung und Verschluss des Endlagers für Wärme entwickelnde, hoch radioaktive Abfallstoffe betreffen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der Nachweis der Betriebssicherheit, der im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens für den anhand des Standortauswahlverfahrens identifizierten Standort unter den geltenden gesetzlichen und sonstigen regulatorischen Anforderungen zu erbringen ist, geführt werden kann. Allerdings muss bereits während des Standortauswahlverfahrens gezeigt werden, dass ein Endlager an den betrachteten Standorten sicher errichtet, betrieben und verschlossen werden kann.

2 Definitionen und regulatorische Grundlagen

2.1 Begrifflichkeiten

Gemäß StandAG sind in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens vorläufige Sicherheitsuntersuchungen vorzunehmen. Der Begriff Sicherheitsuntersuchungen ist international nicht gebräuchlich. Im Zusammenhang mit der Analyse und Bewertung der Sicherheit von Endlagern für radioaktive Abfallstoffe werden international verschiedene Begriffe verwendet, wie zum Beispiel Sicherheitsanalyse (engl. safety analysis), Sicherheitsbewertung (engl. safety assessment) und Safety Case. Für den Begriff Safety Case gibt es keine offizielle deutsche Übersetzung, allerdings wird dafür des Öfteren der deutsche Begriff Sicherheitsnachweis verwendet.

Alle oben genannten Begriffe unterscheiden sich in ihrer Bedeutung mehr oder weniger stark, haben aber gemeinsam, dass allgemein die Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfallstoffe in einer vorgegebenen, methodischen Weise analysiert und bewertet werden soll. In diesem Sinne wird in diesem Dokument der neue Ausdruck „**Sicherheitsbetrachtung**“ als übergeordneter Terminus verwendet, der die oben genannten Begriffe umfasst. Als „Sicherheitsbetrachtung“ wird also jede methodische Analyse und Bewertung der Sicherheit eines Endlagers bezeichnet, ohne dass dabei im Detail Unterscheidungen hinsichtlich der Bedeutung und Rolle in einem Endlagerprojekt getroffen werden. Sicherheitsbetrachtungen dienen jeweils einem bestimmten Zweck, wie z. B. im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens der Prüfung, ob an einem Standort in Verbindung mit dem betrachteten Sicherheitskonzept und dem technischen Endlagerkonzept ein ausreichendes Maß an Sicherheit gewährleistet werden kann, oder im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens der Entscheidung, ob eine Standortregion bzw. ein Standort weiter

im Auswahlverfahren betrachtet wird. Die in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens in Deutschland vorzunehmenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen stellen jeweils eine Sicherheitsbetrachtung zu einem Endlager in einer Region bzw. an einem Standort dar.

Zu den verschiedenen international gebräuchlichen Begriffen hat sich in den letzten Jahren im Wesentlichen durch Initiativen der Internationalen Atomenergieorganisation (engl. Abkürzung IAEA) und der Kernenergieagentur der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (engl. Abkürzung OECD-NEA) ein gemeinsames Grundverständnis entwickelt, das in verschiedenen Berichten dieser Organisationen dokumentiert ist. Trotzdem sind in einzelnen Ländern weiterhin leicht unterschiedliche Übersetzungen und Definitionen für die Begriffe zu finden.

Mit einem **Safety Case** belegt und begründet der Vorhabenträger umfassend, dass ein Endlager an einem Standort in Übereinstimmung mit dem betrachteten technischen Endlagerkonzept sicher betrieben und langzeitsicher verschlossen werden kann. Dabei werden anhand numerischer Berechnungen ermittelte quantitative Bewertungsgrößen sowie qualitative Argumente zu einer Gesamtaussage zusammengeführt. Ein Safety Case wird typischerweise von einem Vorhabenträger vorgelegt, wenn in einem Prozess zur Realisierung eines Endlagers bestimmte Entscheidungen, etwa zur Standortauswahl, zur Erkundung, Errichtung, Einlagerung oder zum Verschluss des Lagers anstehen. Je nach Gestaltung des Gesamtprozesses und dem zugrunde liegenden Regelwerk können das Genehmigungs- oder Gesetzgebungsentscheidungen, aber auch Entscheidungen des Vorhabenträgers sein. Das Konzept des Safety Case wurde

in den letzten beiden Jahrzehnten entwickelt und in verschiedenen Veröffentlichungen (NEA 2004, IAEA 2012, NEA 2013) beschrieben.

Empfohlene Bestandteile eines Safety Case sind die Darlegung des Kontextes (z. B. zum zu entsorgenden Abfallinventar, zum anzuwendenden Regelwerk und zur jeweils zu treffenden Entscheidung im nationalen Rahmen der schrittweisen Realisierung eines Endlagers), Informationen und Begründungen zum Standort, zum gewählten technischen Endlagerkonzept und möglichen Alternativen. Weiterhin gehören dazu die Grundlagen, Vorgehensweisen, Modelle und Ergebnisse von Sicherheitsanalysen und -bewertungen, Aussagen zu den verschiedenen Ungewissheiten und zum Umgang mit ihnen, Aussagen zur Robustheit und Verlässlichkeit des Endlagers sowie zusätzliche Argumente, mit denen sich die sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle belegen lässt. Der Safety Case sollte abgeschlossen werden mit einer Einschätzung des Vertrauens in die getroffenen Aussagen, zu verbleibenden Ungewissheiten und einer Empfehlung zum weiteren Vorgehen bei der Endlagerrealisierung und in Forschung und Entwicklung. Der Safety Case wird typischerweise im Laufe der Realisierung eines Endlagers wiederholt aktualisiert, insbesondere dann, wenn Prozessentscheidungen vorzuschlagen, zu treffen und zu begründen sind.

Gemäß (NEA 2012a) erlauben **Sicherheitsbewertungen** umfassende Aussagen zum Sicherheitsniveau eines Endlagersystems. Sicherheitsbewertungen basieren auf systematischen, insbesondere auch numerischen Analysen der potenziellen Gefährdungen, die mit einem Endlager zusammenhängen. In diesem Zusammenhang wird bewertet, inwieweit ein Standort in Verbindung mit dem gewählten technischen Endlagerkonzept Sicherheitsfunktionen bieten und

technische sowie sicherheitsbezogene Anforderungen erfüllen kann. Sicherheitsbewertungen spielen eine zentrale Rolle in einem Safety Case und betreffen zahlreiche aber nicht alle seiner Elemente.

Als **Sicherheitsanalysen** werden häufig im engeren Sinne quantitative numerische Analysen zur Freisetzung von Schadstoffen aus den radioaktiven Abfällen, zu ihrem Transport durch die Geosphäre und in der Biosphäre bis hin zur Exposition von Individuen verstanden. Mit Hilfe solcher Rechnungen werden für Szenarien, d. h. für bestimmte, unterstellte zukünftige Ereignisabläufe (Entwicklungen) in einem Endlager-System, potenzielle Auswirkungen ermittelt. Überwiegend werden in Sicherheitsanalysen so genannte Sicherheitsindikatoren, zum Beispiel die jährliche effektive Dosis oder das jährliche individuelle Risiko resultierend aus der hypothetischen Exposition einer angenommenen kritischen Gruppe, berechnet.

Solche Sicherheitsanalysen sind ein wichtiges Element von Sicherheitsbewertungen und damit eines Safety Case. Sie erlauben es u. a. bestehende, und zum Teil nicht reduzierbare, Ungewissheiten in den Kenntnissen zu einem Endlager-System hinsichtlich ihrer Sicherheitsrelevanz einzuordnen. So können die Auswirkungen von verschiedenen, denkbaren Szenarien, aber auch von bestehenden Daten- und Ungewissheiten oder dem Einfluss der gewählten konzeptuellen und numerischen Modelle zur Abbildung der im Endlager-System ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse auf das berechnete Ergebnis quantitativ ermittelt werden. Anhand der Ergebnisse von sicherheitsanalytischen Rechnungen können auch alternative technische Endlagerkonzepte miteinander verglichen werden und auf dieser Basis Optimierungen im technischen Endlagerkonzept vorgenommen werden.

2.2 Regulatorische Grundlagen und Empfehlungen

Das *Gemeinsame Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle* („Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management“), dem Deutschland 1998 zugestimmt hat (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung 1998) verlangt in Zusammenhang mit der Wahl jedes Standorts für die Endlagerung u. a. die Bewertung sicherheitsrelevanter standortbezogener Faktoren und die „*Bewertung der mutmaßlichen Auswirkungen einer solchen Anlage auf die Sicherheit des Einzelnen, der Gesellschaft und der Umwelt*“. Dies betrifft sowohl die Betriebsdauer als auch den Zeitraum nach Verschluss. Eine mögliche Veränderung von Standortbedingungen nach dem Verschluss ist zu berücksichtigen. Vor dem Bau des Endlagers wird dann eine systematische Sicherheitsbetrachtung anhand festgelegter Kriterien gefordert. Die EU-Richtlinie 2011/70/Euratom (Europäische Union 2011) fordert, dass sicherheitsrelevante Entscheidungen zu den einzelnen Schritten bei der Entsorgung auf den Ergebnissen einer Sicherheitsbetrachtung beruhen sollen und verweist auf die einschlägigen Empfehlungen der IAEA.

Die Schritte, die letztlich zur Realisierung eines Endlagers führen sollen, erstrecken sich über mehrere Jahrzehnte. Dieser Prozess wird international als Endlagerentwicklung bezeichnet. Im Kommissionsbericht (Endlagerkommission 2016) wird in diesem Zusammenhang der Begriff „Entsorgungsweg“ verwendet und es werden dafür folgende Etappen empfohlen:

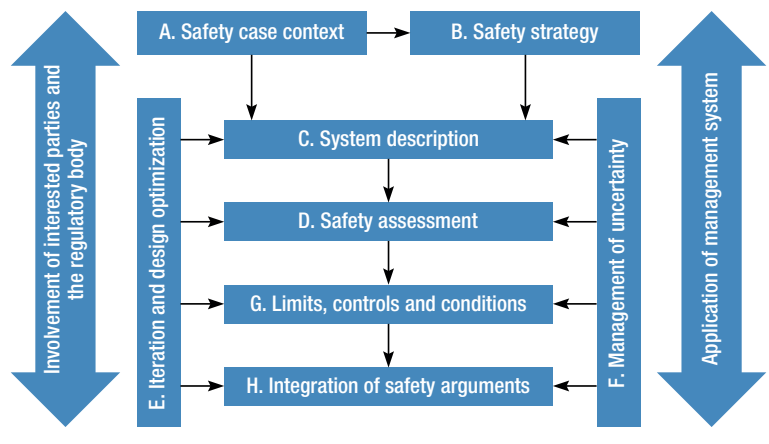
- Etappe 1: Standortauswahlverfahren
- Etappe 2: Bergtechnische Erschließung des Standortes
- Etappe 3: Einlagerung der radioaktiven Abfälle in das Endlagerbergwerk
- Etappe 4: Beobachtung vor Verschluss des Endlagerbergwerks
- Etappe 5: Verschlussenes Endlagerbergwerk

Der IAEA-Standard zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (IAEA 2011) empfiehlt, dass der Vorhabenträger sein Verständnis des Endlagersystems im Laufe der Endlagerentwicklung kontinuierlich vertieft und dabei eine Optimierung hinsichtlich der Sicherheit durchführt. Die Endlagerentwicklung soll schrittweise erfolgen, wobei sich alle wichtigen Entscheidungen auf einen Safety Case stützen sollen. Dieser soll Ungewissheiten und deren Sicherheitsrelevanz aufzeigen sowie darlegen, wie mit diesen Ungewissheiten im weiteren Verlauf des Endlagerprogramms (z. B. im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben) umgegangen werden soll. Auch der IAEA-Standard zum Safety Case (IAEA 2012) nennt die argumentative Untermauerung von Entscheidungen in allen Etappen der Entwicklung, des Betriebes und des Verschlusses von Endlagern als primäre Zielsetzung des Safety Case. Explizit genannt werden in diesem Zusammenhang für frühe Etappen einer Endlagerentwicklung der Vergleich und die Bewertung verschiedener Entsorgungsoptionen und verschiedener Standorte sowie später die

Unterstützung der Ausrichtung von Untersuchungen zur Standortcharakterisierung sowie von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. Die Komponenten des Safety Case gemäß (IAEA 2012) sind in **Abb. 1** dargestellt.

Es wird deutlich, dass die Entwicklung des Safety Case ein iterativer Vorgang ist. Ziel ist die Optimierung des Endlagers (E) unter besonderer Berücksichtigung von Ungewissheiten (F). Ausgehend vom Kontext (A – Regelwerk, Abfallinventar, Stand der Endlagerentwicklung, zu treffende Entscheidung) ist eine Sicherheitsstrategie (B) zu erarbeiten bzw. weiterzuentwickeln. Kontext und Strategie sind Grundlagen der Systembeschreibung (C), die die geologischen und technischen Komponenten des Endlagersystems einschließlich ihrer (Sicherheits-) Funktionen umfasst. Die Systembeschreibung ist Grundlage der Sicherheitsbewertung (D), deren Ergebnisse zur Herleitung von Grenzwerten, Überwachungsmaßnahmen

Abb. 1: Komponenten des Safety Case (IAEA 2012)



und Bedingungen (G, z. B. Abfallannahmekriterien) und einer Sicherheitsaussage auf der Basis aller sicherheitsrelevanten Argumente (H) herangezogen werden.

Die Sicherheitsbewertung für den Zeitraum nach Verschluss des Endlagers stützt sich auf die Betrachtung von Szenarien (potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems), die u. a. die Grundlage für Modelle und Rechnungen zur Abschätzung des Gefährdungspotentials sind (IAEA 2012). Der Detaillierungsgrad der einzelnen Elemente der Sicherheitsbewertungen hängt naturgemäß von den zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Informationen ab.

Dies gilt analog für die vom StandAG vorgesehenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. In Kapitel 4 wird unter Berücksichtigung der entsprechenden Ausführungen der Endlagerkommission dargelegt, welcher Detaillierungsgrad für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den einzelnen Phasen der Standortauswahl sinnvoll erscheint.

Die OECD/NEA formuliert in ihrer Safety Case Brochure (NEA 2013) Aussagen zu Inhalten des Safety Case, die mit denen der IAEA konsistent sind, und Empfehlungen zur guten Praxis bei seiner Erstellung. Dabei wird der Zusammenhang mit dem Optimierungsbegriff und den radiologischen Kriterien der International Commission on Radiological Protection (ICRP 2013) hergestellt. Als mögliche wesentliche Entscheidungspunkte und damit Zeitpunkte für die Erstellung eines Safety Case werden – in dieser Reihenfolge – die Definition des endzulagernden Inventars (Arten und Mengen), die Auswahl des Wirtsgesteins und des zugehörigen technischen Endlagerkonzepts, die Formulierung von allgemeinen

Anforderungen zu Forschung und Entwicklung sowie die Auswahl von Standorten genannt.

Alle genannten Dokumente nennen die Durchführung einer Sicherheitsbewertung als zentrale Aufgabe bei der Erstellung des Safety Case. Konkretisierende Empfehlungen zur Durchführung und Methodik einer Sicherheitsbewertung wurden in Projekten der OECD/NEA (NEA 2012a) und der EU (Galson & Richardson 2011) erarbeitet.

Obwohl die Dokumente und Empfehlungen internationaler Organisationen ein gemeinsames Verständnis hinsichtlich der erforderlichen Elemente und der anzuwendenden Methoden belegen, gab es keine systematischen Befassungen mit der Frage, wie die einzelnen Elemente der Sicherheitsbewertungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Etappe einer Endlagerentwicklung auszugestaltet sind und welche Ansprüche jeweils an Inhalte und Ergebnisse zu stellen sind. Diese Frage war Gegenstand einer Pilotstudie mehrerer europäischer Behörden und der sie unterstützenden technischen Sachverständigenorganisationen (Lemy & Bernier 2014, European Pilot Study 2016).

In Deutschland werden die grundlegenden Anforderungen des Atomgesetzes zur Schadensvorsorge gegenwärtig in den *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* konkretisiert, die 2010 vom damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit veröffentlicht worden sind (BMU 2010). Sie legen fest, welches Sicherheitsniveau zur Erfüllung der atomrechtlichen Anforderungen ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle nachweislich einzuhalten hat. Mit den Sicherheitsanfor-

derungen erfolgen ausdrücklich keine Festlegungen für das Verfahren zur Auswahl des Endlagerstandortes. Die Sicherheitsanforderungen enthalten aber u. a. Festlegungen zu den verfolgten Schutzziele und den zu beachtenden Sicherheitsprinzipien, zu den Anforderungen an die Sicherheitsanalysen und ihre Bewertung der Betriebs- und Langzeitsicherheit sowie zu den Auslegungsanforderungen und an das Sicherheitskonzept des Endlagers für die Betriebs- und Nachverschlussphase. Diese Anforderungen sollten vom Vorhabenträger bereits im Standortauswahlprozess entsprechend berücksichtigt werden. Damit soll sichergestellt werden, dass im Ergebnis des Standortauswahlverfahrens ein Standort identifiziert wird, der im Anschluss mit hoher Wahrscheinlichkeit genehmigungsfähig ist.

3 Erfahrungen und Vorgehensweisen in anderen Ländern

In Übereinstimmung mit den in Kap. 2.3 dargestellten internationalen Empfehlungen sind Sicherheitsbetrachtungen in unterschiedlicher Form ein zentraler Bestandteil des Endlagerentwicklungsprozesses. In der Regel werden in einer ersten Etappe des Prozesses an den geologischen Gegebenheiten des jeweiligen Landes orientiert konzeptionelle Überlegungen entwickelt. Standortauswahl und -charakterisierung sowie die Weiterentwicklung von Konzept(en) und Safety Case erfolgen dann parallel und iterativ. Gegenstand der oben dargelegten Empfehlungen ist die Ausgestaltung des Safety Case, ohne dass näher auf bestimmte Etappen oder Phasen (etwa der Standortauswahl) eingegangen wird.

Erfahrungen hinsichtlich konkreter Umsetzungen liegen u. a. zu folgenden Etappen der Endlagerentwicklung vor (NEA 2014):

- Generischer Safety Case zur Konzeptentwicklung (UK, USA, Südkorea)
- Vorbereitung und Durchführung der Standortauswahl (Schweiz)
- Forschungs- und Entwicklungsplanung und Konzeptentwicklung (Belgien)
- Antragstellung zur Endlagererrichtung (Frankreich, Schweden, Finnland)
- Überprüfung der Sicherheit während der Betriebsphase (USA)

Mit Ausnahme des generischen Safety Case in Großbritannien wurden alle anderen für jeweils ein bestimmtes Wirtsgestein und darauf abgestimmte Sicherheitskonzepte und technische Endlagerkonzepte entwickelt.

Die Standortauswahl wird prozessual sehr unterschiedlich ausgestaltet. So sind derart stringente Randbedingungen, wie sie das deutsche Standortauswahlgesetz vorgibt (explizite Nennung dreier Wirtsgesteine, Suche nach dem bestmöglichen Standort) in anderen Ländern nicht vorgegeben (NEA 2016). Es gibt daher auch keine international abgestimmten Empfehlungen für die Gestaltung von Sicherheitsbetrachtungen in bestimmten Phasen der Standortauswahl – diese sind vielmehr jeweils für den konkreten Prozess und seine Phasen individuell zu entwickeln. Da die Prozesse in Schweden und der Schweiz am ehesten Parallelen zur deutschen Standortauswahl aufweisen, wird auf diese nachfolgend näher eingegangen:

In **Schweden** kommt aufgrund der geologischen Situation nur Kristallingestein als Wirtsgestein, in dem ein Endlager realisiert werden kann, in Frage. Nach einer Reihe von Standort- und Machbarkeitsstudien wurde in den 1990er Jahren geschlussfolgert, dass hierfür potenziell geeignete Gesteinsformationen vermutlich in den meisten Teilen Schwedens anzutreffen sein werden. Die lokalen geologischen Verhältnisse sowie die Akzeptanz am Standort waren entscheidend hinsichtlich der Standortauswahl. Es wurde ein voluntaristischer Auswahlprozess begonnen. Hierfür erfolgten 1993 bis 2000 Machbarkeitsstudien für acht mögliche Standorte in Gemeinden, die sich freiwillig gemeldet hatten. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudien wurden geowissenschaftliche Daten sowie Informationen zu gesellschaftlichen und Infrastruktur-Sachverhalten zusammengestellt und Meinungsbilder in den Gemeinden erhoben. Bereits vorliegende geowissenschaftliche Daten wurden z. T. durch zusätzliche Kartierungen ergänzt. Es erfolgten jedoch keine Erkundungsbohrungen. Im Ergebnis wurde eine po-

tenzielle Standortgemeinde insbesondere aufgrund geowissenschaftlicher Argumente ausgeschlossen. Im weiteren Verlauf zogen sich jedoch alle Gemeinden bis auf Oskarshamn und Östhammar aus dem Prozess zurück.

Der Safety Case SR-97 (SKB 1999) wurde noch vor dem Beginn von Standorterkundungen erstellt. Dieser ging von einer Einlagerung nach dem KBS-3-Konzept aus und sollte die prinzipielle Machbarkeit sowie diejenigen Faktoren aufzeigen, die dann der Standortauswahl zugrunde gelegt wurden. Weiterhin wurden die Anforderungen hinsichtlich der Standortcharakterisierung abgeleitet. Außerdem sollten Anforderungen an die technischen Barrieren abgeleitet werden. Ausgehend von SR-97 und auf eine entsprechende behördliche Anforderung hin wurden im Jahr 2000 durch den Vorhabenträger SKB Kriterien und Indikatoren für die Standortauswahl und -charakterisierung formuliert. Dies schloss die Formulierung von Anforderungen (requirements) und Präferenzen (preferences) ein, die in der weiteren Standortauswahl zur Anwendung kamen (SKB 2000). Die Anforderungen sind in der Systematik mit den deutschen Ausschlusskriterien bzw. Mindestanforderungen, die Präferenzen mit den Abwägungskriterien vergleichbar (Hedin & Olsson 2015).

Sicherheits- und Machbarkeitsbetrachtungen wie z. B. SR-97 dienten hier also zunächst als Grundlage der Formulierung von Kriterien zur Standortauswahl. Basis war das zu dieser Zeit bereits entworfene KBS-3-Konzept in drei Varianten (vertikale und horizontale Einlagerung, ersteres mit einem bzw. zwei Behältern pro Bohrloch). Mit der Kenntnis des Konzepts war die Formulierung von Sicherheitsfunktionen sowie von Anforderungen zur Machbarkeit möglich,

die wiederum die Ableitung der oben genannten Kriterien ermöglichte. Die Kriterien zu den Aspekten

- Geologie,
- Gebirgsmechanik,
- Hydrogeologie,
- Chemie / Grundwasserzusammensetzung,
- Schadstofftransporteigenschaften des Gesteins,
- Einfluss der Temperatur im Endlagersystem auf Sicherheitsfunktionen

wurden systematisch auf der Basis quantitativer und semiquantitativer Betrachtungen mit Hinblick auf die Bedeutung

- für die Integrität der Behälter,
- für das Isolationspotenzial des Puffermaterials, das die Abfallbehälter umgibt,
- für das Isolations- und Rückhaltevermögen des Wirtsgesteins,
- für die Biosphäre sowie
- für die bautechnische Machbarkeit

abgeleitet, wobei Betrachtungen zur Datenverfügbarkeit und -erhebbarkeit berücksichtigt wurden.

Standortuntersuchungen mündeten 2009 in eine vergleichende Studie (SKB 2009) auf der Basis eines Safety Case (SKB 2006) für die in der Auswahl verbliebenen und inzwischen umfassend erkundeten Standorte Laxemar (Gemeinde Oskarshamn) und Forsmark (Gemeinde Östhammar). SKB hatte sich das Ziel gesetzt, den hinsichtlich der Langzeitsicherheit besseren Standort auszuwählen und hat ursprünglich multifaktorielle Methoden zum Standortvergleich untersucht, die jedoch zur Abwägung geologischer Kriterien ungeeignet waren. Letztlich wurde auf eine Wichtung von geologischen Argumenten und Kriterien verzichtet und stattdessen eine Entscheidung aufgrund einer ganzheitlichen Betrachtung des Systems und seiner Funktionen getroffen. Die Berechnungsergebnisse zu

radiologischen Indikatoren unterschritten in beiden Fällen die Grenzwerte und waren nicht ausschlaggebend für die Entscheidung.

Als Nachteile für Laxemar wurden die höhere Klüftigkeit im Endlagerniveau und die damit einhergehende höhere Wasserdurchlässigkeit, die höhere Wahrscheinlichkeit für das Szenarium eines Behälterdefekts durch Scherung sowie das geringere Rückhaltevermögen am Standort identifiziert. Für Forsmark wurden u. a. der Vorteil einer höheren Wärmeleitfähigkeit und daher eines kleineren und kostengünstigeren Endlagers sowie der Vorteil einer einfacheren Verfüllungsstrategie ermittelt. Nachteile von Forsmark hinsichtlich der geomechanischen Bedingungen (verbunden mit einem höheren Risiko thermisch induzierter Kluftbildung), einer höheren Klüftigkeit und damit auch höheren Permeabilität im oberflächennahen Bereich und sensitiver Umweltbedingungen wurden als handhabbar eingeschätzt (SKB 2000, 2009, 2011a, b).

Es wurde eingeschätzt, dass Forsmark besser geeignet ist als Laxemar und dass andere, weniger gut erkundete Standorte keine offensichtlich besseren Bedingungen als Forsmark erwarten lassen. Es sei jedoch durchaus denkbar, dass andere Standorte ähnlich gut geeignet seien wie Forsmark (Hedin & Olsson 2015).

In der **Schweiz** wurden seit den 1970er Jahren anhand sicherheitsbezogener Anforderungen unterschiedliche geologische Barrierensysteme im Hinblick auf ihre Eignung für ein Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle² bewertet. Der zuständige Vorhabenträger Nagra legte schließlich 1985 bzw. 2002

2 Schweizer Bezeichnung SMA-Abfälle

Unterlagen vor, die in ihrem Aufbau und Inhalt einem Safety Case nach heutigem internationalen Verständnis ähneln und mit denen die prinzipielle Machbarkeit einer Entsorgung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen im Kristallingestein (Nagra 1985) bzw. von hochradioaktiven Abfällen³ im Opalinuston im potenziellen Standortgebiet Zürcher Weinland in der Nordschweiz (Nagra 2002a-c) gezeigt wurde. Im Jahre 2005 legte die Nagra zusätzlich eine Bewertung der Möglichkeiten für Tiefenlagerstandorte in der Schweiz vor (Nagra 2005). Nach Prüfung durch die zuständigen Behörden stellte der Schweizer Bundesrat in den Jahren 1988 bzw. 2006 jeweils fest, dass damit der Entsorgungsnachweis für schwach- und mittelradioaktive Abfälle bzw. für hochradioaktive Abfälle erbracht worden ist.

Auf Basis einer vergleichenden Bewertung verschiedener potenzieller Standorte wählte die Nagra 1993 Wellenberg im Kanton Nidwalden als Standort für das Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle aus. Das Rahmenbewilligungsgesuch wurde 1994 eingereicht, aber 2002 zurückgezogen, nachdem die kantonale Bevölkerung in den Jahren 1995 und 2002 die Erteilung nach kantonalem Recht erforderlicher Konzessionen abgelehnt hatte. Im Hinblick auf die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wurde vom Bundesrat 2006 betont, dass mit dem Entsorgungsnachweis keine Standortentscheidung getroffen worden sei.

Nachdem die bisherigen Ansätze zur Standortauswahl nicht erfolgreich waren, wurde in der Schweiz beschlossen, ein Standortauswahlverfahren durchzuführen, mit dem in einem gestuften vergleichenden

Verfahren je ein Standort für die Entsorgung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen als auch von hochradioaktiven Abfällen gefunden werden soll. Die Sachziele des Schweizer Bundes für das Standortauswahlverfahren sowie die Verfahren und die Kriterienengruppen, Kriterien und Indikatoren sind im Konzeptteil zum Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT 2008) qualitativ beschrieben, der nach umfassender Debatte auf nationaler Ebene unter Einbeziehung von Stakeholdern in Deutschland und Österreich im Jahr 2008 verabschiedet worden ist. Im „Projekt Opalinuston“ wurden Sicherheitskonzepte zur Einlagerung im Sedimentgestein entwickelt und davon ausgehend die für diese Konzepte relevanten Standorteigenschaften identifiziert. Diese Arbeiten waren ein Ausgangspunkt für die Formulierung von Kriterienengruppen, Kriterien und Indikatoren in der Etappe I des Verfahrens (zur Ermittlung potenziell geeigneter Regionen) bzw. von entscheidungsrelevanten Merkmalen und Indikatoren in Etappe II (zur Zurückstellung von Gebieten mit eindeutigen Nachteilen).

In der Umsetzung des Standortauswahlverfahrens wurden vom Vorhabenträger für die Ableitung von Kriterien und zugehörigen Indikatoren in Etappe I quantitative Sicherheitsbetrachtungen herangezogen. Diese erforderten zunächst die Formulierung eines Sicherheits- und Barrierenkonzepts einschließlich quantitativer Anforderungen an die Barriereeffizienz sowie eine Zuordnung des zu entsorgenden Abfallinventars zu den beiden vorgesehenen Lagertypen (HAA- und SMA-Lager) (Nagra 2008a-c). Der Beitrag einzelner Abfalltypen zu unterstellten radiologischen Auswirkungen wurde u. a. in Analysen ermittelt. Mit Hilfe entsprechender Dosisrechnungen wurden auch die Anforderungen an die Mächtigkeit und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins formuliert. Weiterhin wurden Modellrechnungen zu Aufstieg

3 Schweizer Bezeichnung HAA-Abfälle

und Erosion, zur Schädigung des Gebirges im Untergrund durch bergbauliche Tätigkeit, zur Gaserzeugung, zur pH-Fahne und zum Wärmeeintrag durchgeführt. Außerdem erfolgten semiquantitative Analysen zum Einfluss von Mineralogie, Porenraum und Geochemie auf die Radionuklidrückhaltung sowie die Entwicklung von Kriterien zur technischen Machbarkeit (Festigkeit, maximale Tiefe, Geometrie) (Zuidema & Schneider 2014).

Neben einer Aggregation und Abwägung der Indikatorwerte mittels Multikriterienanalyse wurden in der Etappe II auch die Ergebnisse von Dosisrechnungen als eine Grundlage der Einengungsprozedur herangezogen. Die Dosisrechnungen in Etappe II werden im SGT (2008) als provisorische Sicherheitsanalysen bezeichnet. Die dabei zu betrachtenden Rechenfälle wurden vor ihrer Anwendung von der Genehmigungsbehörde festgelegt (ENSI 2010). Die Vorgaben des ENSI umfassten auch ein standardisiertes Parametervariationsverfahren für sensible Eingangsdaten, und die zur Bewertung der Ergebnisse heranzuziehende Methodik während des Standortwahlverfahrens. Für alle betrachteten Standortgebiete wurde bei den Dosisrechnungen das gesetzliche Schutzkriterium unterschritten. Außerdem lagen die Dosisintervalle⁴ für alle Standortgebiete vollständig unterhalb eines zweiten Schwellenwertes, ab dem gemäß Schweizer Strahlenschutzverordnung eine weitere Optimierung nicht mehr erforderlich ist. Dies führte zu der Schlussfolgerung, dass alle Standortgebiete als unter diesem Aspekt sicherheitstechnisch geeignet und gleichwertig angesehen werden können. Unterschiede bei den berechneten Dosiswerten wurden nicht als Hinweis auf Unterschiede bei der Qualität des Einschlusses der Schadstoffe am Standort interpretiert. Über die Dosisrechnungen hinaus erfolgten weitere Sicherheitsbetrachtungen: Beispielsweise

wurden unter anderem im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit Kriterien zur maximalen Tiefenlage eines Endlagers aufgrund geomechanischer Rechnungen abgeleitet und angewandt (Schneider 2015, Gautschi 2016).

Aus den Erfahrungen in Schweden und der Schweiz kann zusammenfassend festgehalten werden:

- Entsprechend der Empfehlungen internationaler Organisationen und der Praxis nationaler Programme spielen Sicherheitsbetrachtungen in allen Etappen der Endlagerentwicklungen, also auch bei der Standortauswahl, eine bedeutende Rolle.
- Sicherheitsbetrachtungen erlauben eine ganzheitliche Bewertung des Endlagersystems und seiner Teilsysteme. Sie sind daher bei einer Abwägung sicherheitsrelevanter Aspekte maßgeblich.
- Dies gilt insbesondere für Standorteigenschaften, die durch die Anwendung von Kriterien nur punktuell bewertet werden können, da solche Kriterien immer nur für einzelne sicherheitsrelevante Aspekte stehen.
- Im Unterschied zu den Empfehlungen des AKEnd und der Endlagerkommission wurden systemati-

⁴ Die Dosisintervalle beschreiben die Bandbreite der für die verschiedenen betrachteten Rechenfälle jeweils ermittelten maximalen Dosiswerte, wobei das niedrigste Maximum eines Rechenfalls die untere Grenze des Intervalls und das Dosismaximum des Rechenfalls mit der höchsten Strahlenexposition die obere Grenze bilden. (Für jeden Rechenfall wurde der zeitliche Verlauf der Dosiswerte berechnet, mit „Maximum“ ist der höchste Wert dieses zeitlichen Verlaufs gemeint, der für den jeweiligen Rechenfall ermittelt wurde.)

sche Sicherheitsbetrachtungen des gesamten Endlagersystems daher bereits zur Formulierung von Kriterien zur Standortauswahl herangezogen.

- Darüber hinaus helfen Sicherheitsbetrachtungen beim Verständnis der Bedeutung der ablaufenden Prozesse für die Sicherheit und unterstützen damit die Ausrichtung und Setzung von Prioritäten von Standortcharakterisierung, Forschung und Konzeptentwicklung.
- Die Ergebnisse von Radionuklid-Freisetzungs- und Dosisrechnungen sind wichtige Indikatoren für die Bewertung der Sicherheit eines Endlagers und damit auch für den Standortvergleich. Allerdings stellen sie nicht den alleinigen Maßstab zur Bewertung der Sicherheit dar.

Die Nutzung bzw. Übertragung ausländischer Erfahrungen und internationaler Empfehlungen für die deutsche Standortauswahl hat Grenzen: Zum einen besteht nur in Deutschland die Anforderung, einen Standort mit der bestmöglichen Sicherheit auszuwählen, zum anderen kamen in Schweden und in der Schweiz bei den jeweiligen Standortvergleichen jeweils gleichartige Sicherheits- und technische Endlagerkonzepte zur Anwendung. Nach § 23 StandAG kommen in Deutschland „*die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht*“. Dies erfordert jedoch, dass für diese Wirtsgesteine stark unterschiedliche Konzepte zugrunde gelegt werden.

4 Sicherheitsuntersuchungen beim Standortauswahlverfahren in Deutschland

Das StandAG sieht in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens jeweils verschiedene Arten vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen als wichtiges Instrument zur Ableitung von Auswahlentscheidungen vor:

- a) **Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** vor Beginn der übertägigen Erkundung zur Auswahl der weiter zu verfolgenden Standorte (§14 StandAG – Phase 1 des Verfahrens)
- b) **Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** auf Grundlage der übertägigen Erkundung zur Auswahl der untertägig zu erkundenden Standorte (§ 16 StandAG – Phase 2 des Verfahrens)
- c) **Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen** auf Grundlage der untertägigen Erkundung zur abschließenden Standortauswahl (§ 18 StandAG – Phase 3 des Verfahrens)

Ausgehend von den Ausführungen im Kapitel 6.5.2.2.4 "Vorgehen bei Sicherheitsuntersuchungen - Vorschlag einer Methodik" des Berichtes der Endlagerkommission (Endlagerkommission 2016) werden nachfolgend Vorschläge der DAEF zur weiteren Konkretisierung dargelegt.

4.1 Rolle der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren

Zwischen den im Standortauswahlverfahren durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und dem Sicherheitsnachweis (Safety Case) bestehen ungeachtet der in Kapitel 2 herausgearbeiteten Unterschiede und Besonderheiten wesentliche Gemeinsamkeiten. Dies beruht nicht zuletzt darauf, dass

Sicherheitsuntersuchungen sicherstellen sollen, einen Standort auszuwählen, der möglichst günstige Voraussetzungen für die Führung des Sicherheitsnachweises im nachfolgenden Genehmigungsverfahren nach § 9b (1a) des Gesetzes über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz AtG) bietet.

Darüber hinaus ermöglichen nur vorläufige Sicherheitsuntersuchungen aufgrund der Einbeziehung von Sicherheits- und Nachweiskonzept sowie (vorläufiger) technischer Endlagerkonzepte eine ganzheitliche sicherheitsgerichtete Betrachtung des Endlagers am jeweiligen Standort bzw. in der jeweiligen Region. Nach internationalem Verständnis sollten bereits vor Beginn eines Standortauswahlverfahrens auch Vorstellungen zum technischen Endlagerkonzept vorliegen (IAEA 2012, Lemy & Bernier 2014, Lemy et al. 2013, European Pilot Study 2016).

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für die verschiedenen betrachteten Standortregionen bzw. Standorte soll aufzeigen, inwieweit die maßgeblichen Sicherheitsfunktionen im Einzelnen und durch ihr Zusammenwirken den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle und der in ihnen enthaltenen Radionuklide und sonstigen Schadstoffe gewährleisten, welche Sicherheitsreserven bestehen und wie robust das Endlagersystem hinsichtlich seiner Sicherheit ist. In diese vergleichende Bewertung sind bestehende Ungewissheiten einzubeziehen. Hierzu zählen auch Kenntnisdefizite. Letztlich ist zu bewerten, wie sich unterschiedliche geologische Merkmale der betrachteten Regionen bzw. Standorte vor- oder nachteilig auf die Sicherheit des Endlagersystems auswirken, um daraus Empfehlungen für die Auswahl der Standorte für die nächste Phase des Auswahlverfahrens abzuleiten. Da-

für allgemein gültige Regeln abzuleiten, wird als eher schwierig angesehen. Zielführender erscheint es, die sich im Einzelfall ergebenden maßgeblichen Fakten im Kontext der Sicherheitsuntersuchungen unter Berücksichtigung des daraus gewonnenen Verständnisses gegeneinander abzuwägen.

In diesen Zusammenhang – also dem Erfordernis einer Standortbeurteilung und -auswahl, die auf einem umfassenden Verständnis des Endlagersystems beruht – ist auch die Anwendung der Abwägungskriterien auf die verschiedenen Standortregionen zwingend einzuordnen. Es ist zu erwarten, dass Standortregionen (oder Standorte) bei der Anwendung verschiedener Abwägungskriterien unterschiedlich gut abschneiden. In solchen Fällen stellt sich die Frage, ob es wichtigere und weniger wichtige Abwägungskriterien gibt und wie die Erfüllung der Kriterien in ihrer Gesamtheit für jede Region zu beurteilen ist, um so zu einer „Einordnung von Gebieten in eine Rangfolge relativer Eignung“ (Endlagerkommission 2016) zu kommen. In diesem Zusammenhang führt die Endlagerkommission aus: „Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich also nicht aus der besonders guten Erfüllung eines einzelnen Kriteriums, sondern aus der Gesamtheit der Erfüllung oder der Erfüllungsgrade aller Anforderungen von Abwägungskriterien.“ und „Formale Aggregationsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregation der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend.“ (Endlagerkommission 2016)

Eine rein formale Aggregation der Abwägungskriterien – losgelöst von den Ergebnissen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen – oder eine wie auch immer geartete separate Betrachtung für jedes Kriterium stellen also kein sicherheitsgerichtetes Vorgehen

dar. Ursache dafür ist auch, dass, wie am Ende von Kapitel 3 festgestellt, die vom AkEnd und der Endlagerkommission empfohlenen Abwägungskriterien im Unterschied zu fortgeschrittenen und internationalen Vorgehensweisen, nicht systematisch und umfassend aus (generischen) Sicherheitsbetrachtungen abgeleitet wurden.

Sicherheitsbetrachtungen haben sich ferner international und in Übereinstimmung mit entsprechenden Empfehlungen bei der schrittweisen Realisierung von Endlagern als geeignetes Steuerungsinstrument für die

- gezielte Standorterkundung,
- Ausrichtung von FuE-Programmen und
- Optimierung von technischen Endlagerkonzepten bewährt.

Die Gründe dafür sind naheliegend. Sicherheitsbetrachtungen können mehr oder weniger zwangsläufig die Sicherheitsrelevanz der zum jeweiligen Zeitpunkt bestehenden Kenntnisdefizite zur Geologie, offene Fragestellungen, die zusätzlich FuE-Arbeiten erfordern, sowie Optimierungsmöglichkeiten bzw. Defizite der betrachteten technischen Endlagerkonzepte verdeutlichen. Daraus ergibt sich unmittelbar eine weitere wichtige Rolle der Sicherheitsbetrachtungen in den verschiedenen Phasen eines Standortauswahlverfahrens.

4.2 Methodik der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren

4.2.1 Gemeinsame methodische Grundlagen

Grundsätzlich sollte bei den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen von einer gleichen Vorgehensweise wie bei einem Safety Case ausgegangen werden, die

nachfolgend skizziert und erläutert wird. Der Bericht der Endlagerkommission (Endlagerkommission 2016) führt folgende Schritte für die Sicherheitsuntersuchungen auf, die sich am Safety Case-Konzept der IAEA (2012) und der NEA (2004, 2013) orientieren (s. Abb. 1):

1. Erstellung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für die jeweilige geologische Situation
2. Erarbeitung eines (vorläufigen) technischen Endlagerkonzeptes (= Endlagerplanung) zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes
3. Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems, insbesondere auf die Integrität der einschlusswirksamen Barrieren, sowie der Prozesse, die zur Mobilisierung und Freisetzung von Radionukliden führen können
4. Bewertung möglicher Freisetzungen von Radionukliden hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit und ihres Ausmaßes
5. Bewertung von Ungewissheiten und Sicherheitsreserven sowie der Robustheit des Endlagersystems und seiner Sicherheit
6. Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das technische Endlagerkonzept

Der Bericht der Endlagerkommission beschränkt sich im Wesentlichen darauf, diese Schritte zu erläutern, ohne auf die Unterschiede und Weiterentwicklung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens näher

einzuwenden. Nachfolgend werden zunächst generell die einzelnen Schritte erläutert, wobei die entsprechenden Ausführungen der Endlagerkommission berücksichtigt wurden. Anschließend werden die Besonderheiten der verschiedenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens hervorgehoben.

Zu 1. Erstellung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für die jeweilige geologische Situation

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept umfasst zwei Teile, die eng miteinander verzahnt sind. Das Sicherheitskonzept beschreibt verbalargumentativ, wie die natürlichen geologischen Gegebenheiten (einschließlich des Wirtsgesteins), die technischen Maßnahmen (z. B. Versatz, Verschlussbauwerke, Behälter) und die relevanten Prozesse im Endlager (z. B. Versatzkompaktion, Sorption) in ihrer Gesamtheit dazu führen sollen, dass sofort, dauerhaft und ohne aktive Maßnahmen der sichere Einschluss⁵ der Abfälle gewährleistet wird. Hierzu werden die Sicherheitsfunktionen der Komponenten des Endlagersystems ausgewiesen und ihr Zusammenwirken erläutert. Nach den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) lassen sich als übergeordnete Sicherheitsfunktionen „Einschluss“ sowie „Integrität“ (im Sinne des Erhalts der einschlussrelevanten Eigenschaften) ableiten. Diese wären dann entsprechend der geologischen Situation und des jeweiligen technischen Endlagerkonzeptes weiter zu spezifizieren. Die Sicherheitsanforderungen basieren auf dem konzeptionellen Ansatz eines „einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (ewG) gemäß AkEnd (2002)⁶, bei dem die Hauptlast hinsichtlich des Einschlusses den geologischen und geotechnischen Barrieren zugeordnet wird. Gleichwohl ist auch für anders gearordnete Endlagersysteme (z. B. im klüftigen Kristallin-gestein mit besonders wirksamen und langlebigen

technischen Barrieren) davon auszugehen, dass zum Erreichen eines gleichwertigen Sicherheitsniveaus diese übergeordneten Sicherheitsfunktionen zugrunde gelegt werden. Das Nachweiskonzept beschreibt dann detailliert die Vorgehensweise, nach der die Sicherheit des Endlagersystems bewertet wird. Im Laufe der Erstellung des technischen Endlagerkonzeptes ist das Ausmaß des einschlusswirksamen Bereichs eines Endlagersystems als Grundlage für die Endlagerplanung zu bestimmen (siehe auch Zu 2.).

Zu 2. Erarbeitung eines (vorläufigen) technischen Endlagerkonzeptes zur Umsetzung des Sicherheitskonzeptes

Durch das (vorläufige) technische Endlagerkonzept werden die eher allgemeinen Vorstellungen des Sicherheitskonzeptes in eine realisierbare technische Planungsgrundlage überführt. Hierzu zählt insbesondere, wie das Endlager unter möglichst günstiger Ausnutzung der geologischen Gegebenheiten aufzufahren und gestaltet werden soll, welche Behälter und Versatzmaßnahmen vorgesehen werden, sowie wo

5 Mit sicherem Einschluss ist hier ein Zustand gemeint, bei dem es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) kommt, die gemäß Sicherheitsanforderungen des BMU (2010) die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen. Im Bericht der Endlagerkommission wird außerdem der Begriff des vollständigen Einschlusses der radioaktiven Abfälle verwendet. Dieser Zustand ist dadurch gekennzeichnet, dass es zu keiner Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG kommt.

6 Zu den im Abschlussbericht der Endlagerkommission beschriebenen Varianten eines ewG siehe ausführlichere Beschreibung auf S. 26 (Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten).

und wie die Verschlussbauwerke ausgeführt werden. Sofern das Sicherheits- und Nachweiskonzept auf der Vorstellung eines ewG basiert, zählt dazu auch die Ausweisung des ewG.

Dabei ist darzulegen, wie die einzelnen Systemkomponenten technisch realisiert und die ihnen zugewiesenen Sicherheitsfunktionen gewährleistet werden können, wie die Anforderungen hinsichtlich Rückholbarkeit und Bergbarkeit erfüllt werden können und wie ein sicherer Betrieb des Endlagers erreicht werden kann. Neben den direkt auf die Sicherheit gerichteten Aussagen müssen also auch Aussagen bzgl. der technischen Realisierungsmöglichkeiten eines Endlagers abgeleitet werden. Diese können sich z. B. auf die Ausdehnung und Teufenlage des Wirtsgesteins und die geomechanischen Verhältnisse beziehen.

Zu 3. Identifikation und Bewertung von Einwirkungen auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems, insbesondere auf die Integrität der einschlusswirksamen Barrieren, sowie der Prozesse, die zur Mobilisierung und Freisetzung von Radionukliden führen können

Wesentliche Grundlage für die Ermittlung der relevanten Einwirkungen und Prozesse im Nachweiszeitraum ist die Szenarienentwicklung, die auf einer Zusammenstellung der für das betrachtete Endlagersystem maßgeblichen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (wird nach den englischen Begriffen üblicherweise mit FEP abgekürzt) in ihrer entsprechenden Ausprägung sowie der standort- bzw. regionsspezifischen geowissenschaftlichen und klimatischen Langzeitprognose beruht. Letztere beschreibt die wesentlichen zu berücksichtigenden geologischen und klimatischen Veränderungen im Zeitraum von wenigstens einer Million Jahren.

Die daraus identifizierten Einwirkungen auf die Sicherheitsfunktionen, insbesondere auf die Integrität der einschlusswirksamen Barrieren sowie auf die freisetzungsrelevanten Prozesse sind dahingehend zu bewerten, inwieweit sie zum Verlust wesentlicher Sicherheitsfunktionen und damit ggf. zu Freisetzungen von Radionukliden in die Biosphäre führen können. Zur Bewertung können sogenannte „Status of barriers related indicators“ nach /NEA 2012b/ herangezogen werden.

Zu 4. Bewertung möglicher Freisetzungen von Radionukliden hinsichtlich ihrer Wahrscheinlichkeit und ihres Ausmaßes

Für die im vorangegangenen Schritt ermittelten möglichen Einwirkungen auf das Endlagersystem, die zu Freisetzungen von Radionukliden in die Biosphäre führen können, ist deren Eintrittswahrscheinlichkeit und Ausmaß zu bewerten.

Die Quantifizierung der Wahrscheinlichkeiten stößt in der Regel auf erhebliche Schwierigkeiten. Daher hat sich in der Praxis eine eher grobe Klassifizierung bewährt, wie sie auch in den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010 vorgesehen ist:

- wahrscheinliche Entwicklungen
- weniger wahrscheinliche Entwicklungen
- unwahrscheinliche Entwicklungen

Für die Bewertung des Ausmaßes von Freisetzungen in die Biosphäre sind in der Regel numerische Transport- und Freisetzungsberechnungen erforderlich. Zum Vergleich mit regulatorischen Grenzwerten können daraus, unter Zugrundelegung ausgewählter Expositionsszenarien, Indikatoren in der Form von Dosiswerten ermittelt werden.

Hierzu wird meistens die hypothetische Exposition einer angenommenen kritischen Gruppe mit bestimmten Lebens- und Verzehrgewohnheiten zugrunde gelegt. Ungeachtet dessen, dass die so ermittelten Dosiswerte einen wichtigen Sicherheitsindikator darstellen, sind sie mit erheblichen Prognoseungewissheiten behaftet, da sich weder die Klimaentwicklung, die Lebens- oder Verzehrgewohnheiten der Menschen, noch die erheblichen Umgestaltungen unterliegenden Ausbreitungspfade im oberen Teil der Geosphäre über einen derart langen Betrachtungszeitraum in geeigneter Weise prognostizieren lassen. Daher werden in der Praxis zunehmend vereinheitlichte stilisierte Expositionsszenarien für die Bewertung radiologischer Konsequenzen aus möglichen Freisetzungen verwendet.

Um verschiedene potenzielle Endlagerstandorte bzw. -systeme mittels Freisetzungsberechnungen möglichst objektiv vergleichen zu können, empfiehlt die DAEF, das Einschlussvermögen des ewG oder im Falle von Endlagersystemen, die nicht dem ewG-Ansatz folgen, das Einschlussvermögen eines vergleichbaren einschlusswirksamen Bereichs zu bewerten. Dazu sind die Anteile des aus dem ewG bzw. aus dem vergleichbaren einschlusswirksamen Bereich freigesetzten Nuklidinventars und die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung zu betrachten. Zur Gegenüberstellung der Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen mittels eines radiologischen Indikators sollten dabei für alle Endlagerstandorte bzw. -systeme gleiche stilisierte Annahmen zu den Ausbreitungspfaden und Transferprozessen außerhalb des ewG verwendet werden, die in einer Berechnungsvorschrift vorab festzuschreiben sind.

Für einen geeigneten Standort sollte die Freisetzung aus dem ewG bzw. des einschlusswirksamen Bereichs so gering sein, dass sie auch unter ungünstigen Annahmen als geringfügig angesehen werden kann und

daher im Standortauswahlverfahren die Radionuklidmigration im Aquifersystem sowie ein Transfer in die Biosphäre nicht betrachtet werden müssen („Geringfügigkeitsaussage“). Damit soll sichergestellt werden, dass im Ergebnis des Standortauswahlverfahrens ein Standort identifiziert wird, der im Anschluss mit hoher Wahrscheinlichkeit genehmigungsfähig ist.

Ein entsprechender Gedanke wird in den Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) mit der sogenannten „vereinfachten radiologischen Langzeitaussage“ verfolgt. Hinsichtlich seiner Handhabung wirft der dort beschriebene Ansatz nach Einschätzung der DAEF jedoch einige Probleme auf und wird als überarbeitungsbedürftig angesehen (Fischer-Appelt et al. 2013). Darüber hinaus führte die Bezeichnung zu Missverständnissen, leider auch in der Endlagerkommission und letztlich zu deren Empfehlung, die vereinfachte radiologische Langzeitaussage ersatzlos zu streichen. Im Gegensatz dazu empfiehlt die DAEF eine Überarbeitung und eine Änderung der ihrer Auffassung nach irreführenden Bezeichnung.

Bei den Rechnungen zur Freisetzung aus dem ewG müssen die Ungewissheiten bzgl. des Einschlussvermögens und der Integrität des ewG für alle Endlagerstandorte bzw. -systeme explizit berücksichtigt werden. Sofern standortspezifische Ungewissheiten zu Zweifeln an der Geringfügigkeit der Freisetzung aus dem ewG führen, sollen diese Ungewissheiten im Rahmen der weiteren Erkundung systematisch näher eingegrenzt werden. Sie können dann sogar ggf. zur Ableitung von Prüfkriterien herangezogen werden.

Die Endlagerkommission (2016) empfiehlt die Entwicklung und Anwendung von standortspezifischen Prüfkriterien erst für die Phase 3 (untertägige Erkundung) und führt aus, dass in der Phase 2 bereits die

Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien die Bewertung der zu erhebenden notwendigen charakteristischen Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der günstigen geologischen Gesamtsituation an dem jeweiligen Standort erlauben. In diesem Zusammenhang führt die Endlagerkommission aus, dass die Prüfkriterien zur Bewertung der Ergebnisse der übertägigen Erkundung keinen direkten Bezug zu sicherheitsrelevanten Ergebnissen vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen aufweisen können, da die in Phase 1 durchzuführenden repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (aus denen ggf. die Prüfkriterien für die Phase 2 zu generieren wären) ohne Erkundungsbefunde durchgeführt werden müssen.

Die DAEF folgt dieser Begründung nicht, da ein so vorgezeichnetes Vorgehen die Spezifika der für die verschiedenen Wirtsgesteine unterschiedlichen Sicherheits- und Nachweiskonzepte und technischen Endlagerkonzepte außer Acht ließe. Damit würden auch sicherheitsrelevante Erkenntnisse, die aus den Ergebnissen der repräsentativen und weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gezogen werden können, nicht im Standortauswahlverfahren berücksichtigt werden.

Die DAEF geht davon aus, dass bereits in Phase 1 für den jeweiligen Wirtsgesteinstyp prototypische technische Endlagerkonzepte zu erarbeiten sind (vgl. 4.2.2.1). Damit ergibt sich, dass für den jeweiligen Wirtsgesteinstyp prototypisch unterschiedliche Endlagersysteme zu betrachten sind, was wiederum unterschiedliche Anforderungen an die geologischen Gegebenheiten bedingt. Daher ist die Erfüllung dieser Wirtsgesteinstyp-spezifischen Anforderungen in der übertägigen Erkundung zu überprüfen, unabhängig davon, ob dafür regulatorische Prüfkriterien abgeleitet wurden oder nicht.

Standorte, die diese Anforderungen nicht erfüllen und für die daher nicht zu erwarten ist, dass die Freisetzung geringfügig bleibt, gelten als nicht geeignet und sind auszuschließen.

Wegen der Konservativitäten und Ungewissheiten, die Berechnungen zu radiologischen Indikatoren innewohnen, stellen berechnete Dosiswerte, die erheblich unter der Geringfügigkeitsschwelle liegen, keinen geeigneten Maßstab dar, um Unterschiede bezüglich des Sicherheitsniveaus der zu vergleichenden Endlagersysteme zu begründen. Die betrachteten Endlagersysteme bzw. Standorte sollten dann bezüglich dieses Indikators als gleichwertig angesehen werden, wie es im Schweizer Standortauswahlverfahren geschieht (SGT 2008, ENSI 2010).

Zu 5. Bewertung von Ungewissheiten und Sicherheitsreserven sowie der Robustheit des Endlagersystems und seiner Sicherheit

Im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen müssen zwangsläufig Ungewissheiten in Kauf genommen werden, die mit einer zielgerichteten Standorterkundung zwar reduziert, aber nicht eliminiert werden können. Sie sind daher explizit auszuweisen und in die Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems einzu beziehen. Die Sicherheitsanforderungen /BMU 2010/ fordern im Hinblick u. a. auf die Demonstration des erwarteten Systemverhaltens und die Optimierung des Endlagersystems „deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z. B. Medianwerte als Eingangsparameter)“. Soweit möglich, sollten solche Rechnungen auch im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen herangezogen werden. Darüber hinaus müssen im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen jedoch auch eine Reihe,

oftmals konservativer, Annahmen getroffen werden, die ebenso Sicherheitsreserven darstellen können, wie redundante oder bisher nicht berücksichtigte zusätzliche Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems. Diese Sicherheitsreserven sollten daher auch in die Bewertung der Sicherheit des Endlagers einfließen.

Im Übrigen zählt zur Bewertung von Endlagersystemen auch die Betrachtung der Robustheit des Endlagersystems und seiner Sicherheit. Darunter wird die Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einwirkungen bzw. deren Kombination, die in der Regel als unwahrscheinlich angesehen werden, sowie gegenüber Abweichungen von zugrunde gelegten Annahmen verstanden. Sie lässt sich auch am Erhalt der maßgeblichen Sicherheitsfunktionen bzw. ihres sicherheitsgerichteten Zusammenwirkens beurteilen.

Zu 6. Ableitung des Erkundungs- und FuE-Bedarfs sowie von Optimierungsmöglichkeiten für das technische Endlagerkonzept

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel ausgeführt, stellen die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ein wichtiges Steuerungsinstrument für die

- gezielte Standorterkundung in den nachfolgenden Phasen der Standortauswahl,
- Definition erforderlicher FuE-Arbeiten und
- Optimierung von technischen Endlagerkonzepten dar.

Wie ebenfalls bereits ausgeführt verdeutlichen Sicherheitsuntersuchungen die Sicherheitsrelevanz von Kenntnisdefiziten zur Geologie, von offenen Fragestellungen, die zusätzlich FuE-Arbeiten erfordern, sowie von Optimierungsmöglichkeiten bzw. von Defiziten der betrachteten technischen Endlagerkonzepte.

4.2.2 Methodische Unterschiede und Besonderheiten der Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des Auswahlverfahrens

Die maßgeblichen Eingangsdaten für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind

- Informationen zu Menge, Art und Eigenschaften der radioaktiven Abfälle sowie
- Kenntnisse über die geologischen Verhältnisse in den betrachteten Regionen bzw. an den Standorten.

Während aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung Menge, Art und Eigenschaften insbesondere der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen weitgehend feststehen (BMUB 2015) und für die unterschiedlichen Arten der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den drei Phasen des Standortauswahlverfahrens im Wesentlichen unverändert bleiben, werden sich Art und Umfang der geologischen Kenntnisse durch die Ergebnisse der Erkundung in den Phasen 2 und 3 erheblich erweitern. Folglich nehmen der mögliche Detaillierungsgrad der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und deren Aussagefähigkeit zu.

Nachfolgend werden unter Berücksichtigung der jeweils erwarteten nutzbaren geologischen Datenbasis wesentliche Aspekte der Durchführung und Weiterentwicklung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den verschiedenen Phasen des Standortauswahlverfahrens dargelegt.

4.2.2.1 Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 1 vor der über-tägigen Erkundung

Phase 1 gliedert sich gemäß StandAG in drei Schritte:

1. Nach StandAG § 13, Absatz 2, Satz 1 wendet der Vorhabenträger auf Grundlage der geologischen Daten für das gesamte Bundesgebiet, die von den zuständigen Fachbehörden des Bundes und der Länder zur Verfügung zu stellen sind, *„zunächst die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien nach § 22 und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 an“*.
2. *„Aus den identifizierten Gebieten ermittelt der Vorhabenträger durch Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 die Teilgebiete, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen. Der Vorhabenträger veröffentlicht das Ergebnis in einem Zwischenbericht und übermittelt diesen unverzüglich an das Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit.“* (Stand AG § 13 Absatz 2 Sätze 2 und 3)
3. Nach StandAG § 14, Absatz 1, Satz 2, führt der Vorhabenträger für die Teilgebiete nach § 13, Absatz 1, *„repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 durch. Auf der Grundlage der daraus ermittelten Ergebnisse hat der Vorhabenträger unter erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 günstige Standortregionen zu ermitteln.“*

Geologische Datenbasis

In Phase 1 des Standortauswahlverfahrens kann nur auf den bereits bei den geologischen Landesämtern und Bundesbehörden vorliegenden Datenbestand zurückgegriffen werden. Primärdaten zum tieferen Untergrund beruhen meist auf Bohrungen, die konkrete punktuelle Untergrundinformationen einschließlich Materialproben liefern, und indirekten geophysikalischen Untersuchungen, aus deren Interpretation sich sowohl die räumliche Verbreitung der Gesteine bzw. Formationen im Untergrund als auch einige spezifische Eigenschaften ableiten lassen (SGDD 2016). Hinzu kommen regionale geologische Kenntnisse zu Vulkanismus, seismischer Aktivität, großräumigen Hebungs- und Senkungsraten, Lage von größeren Störungszonen und weiteren Aspekten.

Auf dieser Grundlage sind in Schritt 1 die in Betracht gezogenen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (ggf. mit Ausnahme des Grundwasseralters und der Gebirgsdurchlässigkeit) im Wesentlichen anwendbar. Dabei handelt es sich um Ja/Nein-Kriterien, mit denen offensichtlich ungünstige Regionen bzw. Standorte ausgeschlossen werden. Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen erübrigen sich daher in diesem Schritt.

In Schritt 2 soll durch Anwendung von Abwägungskriterien eine weitere Einengung der potenziell geeigneten Standortregionen erfolgen. Allerdings kann vor Beginn der Standorterkundung ohnehin ein großer Teil der Abwägungskriterien infolge fehlender Daten im vorgesehenen Detailgrad nicht belastbar angewendet werden (SGDD 2016). Aus Sicht der DAEF sind in Zukunft noch regulatorische Klärungen erforderlich, wie im Standortauswahlverfahren mit dieser Problematik umgegangen werden soll. Dazu gehört auch der

Aspekt, dass, wie bereits ausgeführt, die alleinige Anwendung der Abwägungskriterien losgelöst von der ganzheitlichen Betrachtung des Endlagersystems in Sicherheitsuntersuchungen keine sicherheitsgerichtete Auswahl zulässt.

Für alle Schritte in Phase 1 und für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen steht grundsätzlich die gleiche geologische Datenbasis zur Verfügung, aus der geologische Standortmodelle zu entwickeln sind. Da spezifische Daten fehlen, sind die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu einem großen Teil noch generisch. Eine wesentliche Grundlage ist dabei das räumliche Modell des Untergrundes, das aus der Extra- und Interpolation verfügbarer geologischer Profile abgeleitet wird. Sofern keine direkten Befunde vorliegen, sind für die wesentlichen Eigenschaften der maßgeblichen geologischen Formationen/Schichten begründete Annahmen (z. B. anhand von Analogien) zu treffen und die erwarteten Bandbreiten auszuweisen.

Sofern durch Befunde oder anderweitig (z. B. Lineamente aus der Auswertung von Sattelitenbildern) hinreichend belegt, sind Störungen sowie Störungszonen und deren Lage zu ergänzen.

Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten

Der zuvor beschriebenen grundsätzlichen Vorgehensweise folgend sind auf dieser Basis jeweils Sicherheits- und Nachweiskonzepte zu entwickeln.

Wegen der ggf. erheblichen Anzahl zu betrachtender Standortregionen empfiehlt die DAEF, hierzu für jeden von der Endlagerkommission in Betracht gezogenen Wirtsgesteinstyp allgemeingültige Sicherheits-

und Nachweiskonzepte zu erstellen. Hinsichtlich der Wirtsgesteine sind grundsätzlich die Endlagerung im Kristallin, Tonstein und Salzgestein zu betrachten. Hinzu kommt ggf. im Falle eines ewG-Konzepts, in dem der ewG nicht Teil eines Wirtsgesteinskörpers mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung ist (Endlagerkommission 2016: ewG-Typen Ba und Bb), zusätzlich ein das Wirtsgestein, in dem das Endlager errichtet werden könnte, umgebender oder überdeckender ewG. In Abhängigkeit von der mittels Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen getroffenen Vorauswahl kann es zweckmäßig sein, zusätzlich zwischen

- Salzstöcken und flachlagernden Salzformationen,
- Tongesteinen in mittleren und großen Teufenlagen
- sowie Ton- und Salzformationen, die den überdeckenden ewG bilden,
- zu unterscheiden.

Auch in Abhängigkeit von der noch ausstehenden regulatorischen Umsetzung der teilweise unscharfen bzw. nicht vollständig konsistenten Empfehlungen der Kommission zum Kristallin kann es darüber hinaus erforderlich sein, zu unterscheiden zwischen

1. Kristallingestein, in dem ein einziger in sich geschlossener ewG ausgewiesen werden kann,
2. Kristallingestein, in dem mehrere voneinander getrennte (multiple) ewG (Jobmann, M., et al. 2016) ausgewiesen werden müssen, die durch stärker durchlässige Wirtsgesteinsbereiche voneinander getrennt sind, und
3. Konzepten (z. B. für Kristallingestein oder auch andere Gesteine), bei denen kein ewG ausgewiesen wird und bei denen der langzeitsichere Einschluss vorrangig durch technische Barrieren erfolgt.

Bei der Gestaltung des Sicherheitskonzeptes kann zunächst auf bereits vorliegende Konzepte für Endlager insbesondere Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle zurückgegriffen werden, die den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik verkörpern. Hierzu zählen für Tonstein die Endlagerprojekte in der Schweiz (Nagra 2002a-c) und in Frankreich (AN-DRA 2005), im Kristallin die Genehmigungsanträge für Endlager für abgebrannte Brennelemente in Schweden (SKB 2011a, Standort Forsmark) und in der Finnland (Posiva 2012, Standort Olkiluoto) sowie in Deutschland im Steinsalz in steiler Lagerung die "Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben" (Fischer-Appelt et al. 2013). Darüber hinaus sind im Hinblick auf die in Deutschland zu entsorgenden Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle und auf die in Deutschland herrschenden geologischen Verhältnisse die Arbeiten im Auftrage des BMWi zu folgenden FuE-Vorhaben hervorzuheben:

- für Kristallin
Machbarkeitsstudie zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in einer Kristallinegesteinsformation in Deutschland (CHRISTA)
- für Tonstein
Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein High Active Waste (HAW)-Endlager in Tonstein (ANSICHT), Referenzkonzept für ein Endlager für radioaktive Abfälle in Tongestein (ERATO)
- für Salzstöcke
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (ISIBEL)

- für flachlagernde Salzformationen
Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes (KOSINA)

Technische Endlagerkonzepte

Als nächstes sind zur Umsetzung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte für die betrachteten Standortregionen technische Endlagerkonzepte zu erstellen. Dabei empfiehlt die DAEF, für jeden Wirtsgesteins-/ewG-Typ zunächst ein prototypisches technisches Endlagerkonzept zu erstellen, das sich auf Arbeiten aus den vorgenannten FuE-Vorhaben im In- und Ausland stützen kann. Für die betrachteten Standortregionen sind dann die Modifikationen zu den Prototypplanungen auszuweisen, die sich aus den örtlichen geologischen Modellen ergeben.

Prototypische Sicherheitsuntersuchungen

Für die nachfolgende Identifikation und Bewertung maßgeblicher Einwirkungen sowie der Mobilisierungs- und Freisetzungsprozesse erscheint es jedoch vor Beginn der Standorterkundung nicht angemessen, eigenständige Szenarienanalysen durchzuführen, sondern es sollte auf bereits vorliegende Sicherheitsanalysen für Endlager in vergleichbaren Wirtsgesteinsformationen zurückgegriffen werden. Dabei soll überprüft werden, inwieweit unter Berücksichtigung der jeweiligen Standortgegebenheiten und der vorläufigen geowissenschaftlichen Langzeitprognose die relevanten Einwirkungen und Prozesse übertragen werden können.

Für jeden Wirtgesteins-/ewG-Typ soll dazu ein Satz relevanter Einwirkungen und Prozesse abgeleitet und dafür die jeweiligen standortspezifischen Unterschiede ausgewiesen werden. Die DAEF empfiehlt, für jeden Wirtgesteins-/ewG-Typ eine prototypische Sicherheitsuntersuchung zu erarbeiten, und auf dieser Grundlage für jeden betrachteten Standort bzw. für jede betrachtete Region Differenzbetrachtungen durchzuführen. Anschließend sollen anhand der konkreten standort- bzw. regionsspezifischen Merkmale die Unterschiede hinsichtlich der zu untersuchenden Sicherheitsaspekte herausgearbeitet werden.

Die identifizierten Einwirkungen auf die einschlusswirksamen Barrieren und die freisetzungrelevanten Prozesse sind dahingehend zu bewerten, inwieweit sie zu relevanten Freisetzungen aus dem ewG führen können. Während hierzu in nachfolgenden Sicherheitsuntersuchungen numerische Integritätsanalysen der einschlusswirksamen Barrieren sowie Mobilisierungs- und Transportrechnungen unverzichtbar sind, empfiehlt die DAEF für Sicherheitsuntersuchungen in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens (vor Beginn von Standorterkundungen), einen zuvor definierten Satz von Rechenfällen für die prototypischen Sicherheitsuntersuchungen zu verwenden und dann qualitativ den Einfluss der standortspezifischen Unterschiede auf die Ergebnisse zu diskutieren.

Für die sich daraus ergebenden Entwicklungen des Endlagersystems, die zu Freisetzungen aus dem ewG führen können, sind ihr Ausmaß und die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zu bewerten.

Bewertung der Ergebnisse

Für die Bewertung des Einschlussvermögens des ewG sind Rechnungen zur Freisetzung aus dem ewG er-

forderlich (vgl. 4.2.1, zu 4.). Für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 1, d. h. noch vor Beginn gezielter Erkundungsmaßnahmen, muss jedoch davon ausgegangen werden, dass dafür nur eine stark eingeschränkte Datenbasis zur Verfügung steht. Anhand von überschlägigen Abschätzungen und Analogiebetrachtungen sind daher eher qualitative Einordnungen zum Ausmaß der zu erwartenden Freisetzungen vorzunehmen. Hierzu kann es für eine vergleichende Betrachtung hilfreich sein, den Anteil des betroffenen Radionuklidinventars sowie den möglichen Zeitpunkt und die mögliche Transportdauer bis zum Erreichen des Randes des ewG zusammen mit dem fortschreitenden Zerfall der Radionuklide zu betrachten.

Bei der Bewertung der Sicherheit von Endlagersystemen und insbesondere für deren Vergleich untereinander stellt das Ausmaß der Freisetzung aus dem ewG jedoch nur einen von mehreren Gesichtspunkten (wie z. B. die Wahrscheinlichkeit von Freisetzungen, die Robustheit und Sicherheitsreserven des Endlagersystems) dar.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für die betrachteten Standortregionen sollte daher vielmehr im Vordergrund stehen, inwieweit die maßgeblichen Sicherheitsfunktionen im Einzelnen und durch ihr Zusammenwirken den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, welche Sicherheitsreserven bestehen und wie robust das Endlagersystem hinsichtlich seiner Sicherheit ist. In die vergleichende Bewertung sind bestehende Ungewissheiten, hierzu zählen auch Kenntnisdefizite, einzubeziehen.

Die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und die dabei identifizierten sicherheitsrelevanten Kenntnislücken stellen darüber hinaus eine wesentliche Grundlage für die Erstellung zielgerichteter standortspezifischer Programme für die übertägige Erkundung dar, die auf den Wirtsgesteins- bzw. ewG-typischen Anforderungen fußen.

In die Entscheidung über die Auswahl der Regionen, die übertägig zu erkunden sind, fließen die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen verbalargumentativ ein.

4.2.2.2 Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 2 nach der übertägigen Erkundung

Im Ergebnis der übertägigen Erkundung wird es bei einem hinreichend umfassenden Erkundungsprogramm dank der heute zur Verfügung stehenden geophysikalischen Messmethoden und Bohrverfahren möglich sein, vergleichsweise detaillierte standortspezifische geologische Modelle zu entwickeln, in denen die räumliche Anordnung der maßgeblichen geologischen Formationen, ihre Eigenschaften sowie größere Störungszonen und mögliche Inhomogenitäten abgebildet werden.

Sofern sich daraus oder aus den in Phase 1 durchgeführten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen relevante Erkenntnisse ergeben, sind die entsprechenden Sicherheits- und Nachweiskonzepte fortzuschreiben.

Die prototypischen technischen Endlagerkonzepte sind standortspezifisch anzupassen und gleichfalls auf Grundlage der in Phase 1 gewonnenen Erkenntnisse zu vervollkommen. Hierzu zählt auch die

standortspezifische Anpassung und Ausgestaltung des Grubengebäudes sowie der Verschluss- und Versatzkonzepte.

Die sich zusammen mit den geologischen Standortmodellen ergebenden standortspezifischen Endlagersysteme bilden die Grundlage für die Szenarienanalysen. Aus ihnen sind die relevanten Einwirkungen auf die Sicherheitsfunktionen und insbesondere auf die Integrität des ewG und die anderen einschlusswirksamen Barrieren zu ermitteln. Die Integrität der einschlusswirksamen Barrieren ist phänomenologisch und numerisch zu überprüfen.

Für alle Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems, für die eine Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann oder deren Beachtung sich wegen einer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit nicht erübrigt, sind mittels entsprechender numerischer Verfahren das Ausmaß ihrer Freisetzung zu ermitteln und deren geringfügigkeit anhand eines radiologischen Indikators zu bewerten. Dabei ist auch die Eintrittswahrscheinlichkeit der Freisetzungen zu berücksichtigen.

Auch in Phase 2 sollte die vergleichende Gegenüberstellung von Endlagersystemen nicht vordergründig allein auf der Grundlage dieses Indikators erfolgen, sondern zusammen mit der Bewertung der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems unter Berücksichtigung von Sicherheitsreserven sowie der Robustheit und Sicherheit des Endlagersystems betrachtet werden. Andererseits erfordert gerade die Ermittlung von Freisetzungen eine tiefgehende Auseinandersetzung mit dem Endlagersystem und allen für seine Sicherheit maßgeblichen Belangen. Sie liefert ein gutes Gesamtverständnis für das Zusammenwirken und die Bedeutung der einzelnen Sicherheitsfunktionen.

Auch wenn mit der übertägigen Erkundung für die Abwägungskriterien eine bessere Datengrundlage als in Phase 1 erhoben werden kann und die Abwägungskriterien damit besser angewendet werden können, wird aus den bereits genannten Gründen von einem Aggregieren, losgelöst von den Ergebnissen der Sicherheitsuntersuchungen, dringend abgeraten.

Vielmehr sollten aus dem in den Sicherheitsuntersuchungen gewonnenen Verständnis der betrachteten Endlagersysteme, ihrer Stärken und Schwächen standortspezifische Prüfkriterien (vgl. Kapitel 6.5.7 in Endlagerkommission (2016)) abgeleitet werden, die zur abschließenden Standortentscheidung nach untertägiger Erkundung herangezogen werden können. Bei der Ableitung der Prüfkriterien sind insbesondere noch bestehende maßgebliche, erst durch die untertägige Erkundung aufzulösende Ungewissheiten zu berücksichtigen.

4.2.2.3 Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen – Phase 3 nach untertägiger Erkundung

Im Unterschied zu den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 1 unterscheiden sich die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 2 und 3 nicht mehr grundsätzlich, sondern im Wesentlichen nur dadurch, dass die geologische Datenbasis durch die untertägige Erkundung standortspezifisch erweitert und dadurch bestehende Ungewissheiten ausgeräumt bzw. eingeengt werden können. Gleichzeitig werden aber auch technische Weiterentwicklungen (z. B. bzgl. der Entwicklung

neuer Behälterkonzepte, geotechnischer Barrieren etc.) und neue wissenschaftliche Erkenntnisse (z. B. zum Korrosionsverhalten radioaktiver Abfallformen) in die Sicherheitsuntersuchungen Eingang finden.

Auf Grundlage der aus den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 2 und aus der untertägigen Erkundung gewonnenen Erkenntnisse sind die standortspezifischen technischen Endlagerkonzepte sowie ggf. die Sicherheits- und Nachweiskonzepte anzupassen und weiterzuentwickeln.

Im weiteren Vorgehen gleichen die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Phase 3 methodisch denen in Phase 2.

Lediglich in die abschließende vergleichende Bewertung und Standortentscheidung können zusätzlich die in der Phase 2 abgeleiteten standortspezifischen Prüfkriterien einbezogen werden.

Die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen stellen jedoch, wie in Kapitel 2.1 ausgeführt, noch keinen Sicherheitsnachweis dar, der im Zuge des Genehmigungsverfahrens nach § 9 (1a) AtG vorzulegen ist. Hierzu sind weitere Optimierungen und Detaillierungen des technischen Endlagerkonzeptes insbesondere hinsichtlich der Belange der Betriebssicherheit, Rückholbarkeit und Bergbarkeit erforderlich, um letztlich die Schadensvorsorge nach dem Stand der Wissenschaft und Technik nachweisen zu können. Für die zu genehmigende Detailplanung des Endlagers werden weitere untertägige Erkundungsmaßnahmen erforderlich, um offene Fragen zu klären.

5 Empfehlungen

Inhalte und Vorgehensweisen der verschiedenen, im Standortauswahlverfahren vorzunehmenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind im StandAG in der Fassung vom 5. Mai 2017 nur in übergeordneter Weise beschrieben. In ihrem Abschlussbericht formuliert die Endlagerkommission dazu einige generelle Empfehlungen. Im vorliegenden Dokument werden diese Empfehlungen detaillierter ausgestaltet und konkretisierende Vorschläge hinsichtlich der einzelnen Phasen des Standortauswahlverfahrens formuliert.

In allen ausländischen Programmen zur Realisierung von Endlagern spielen – auch bereits vor der Standortauswahl – systematische Sicherheitsbetrachtungen zum gesamten Endlagersystem unter unterschiedlichen Bezeichnungen (safety case, safety assessment, ...) eine wichtige Rolle. Diese Rolle ergibt sich aus dem Ziel, durch adäquate Standortauswahl und technische Endlagerkonzepte zu einem langzeitsicheren und genehmigungsfähigen Endlager zu gelangen. Der diesbezügliche internationale Stand wurde daher im vorliegenden Dokument berücksichtigt.

Im Bericht der „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ werden Abwägungskriterien für den Vergleich von Standortregionen bzw. Standorten formuliert. Vorgaben zur Aggregation oder Wichtung bei der Anwendung der Kriterien „hält die Kommission nicht für zielführend“. Folglich sind auch im revidierten StandAG in der Fassung vom 5. Mai 2017 keine entsprechenden Regelungen festgelegt. Die DAEF begrüßt den Verzicht auf die Vorgabe formalisierter Aggregierungsregeln zum gegenwärtigen Zeitpunkt, weist jedoch darauf hin, dass die Befunde zu den Abwägungskriterien und die Ergebnisse von Sicherheitsuntersuchungen immer miteinander zu verknüpfen sind, weil nur auf diese Weise eine sicherheitsorientierte sachgerechte Abwägung und

damit eine vergleichende Bewertung von Standorten möglich ist. Nur Sicherheitsuntersuchungen auf der Basis von Sicherheits- und Nachweiskonzepten sowie technischen Endlagerkonzepten erlauben ein ganzheitliches Verständnis der Funktionsweise des Endlagersystems und damit der Bedeutung einzelner geologischer Sachverhalte. Aus Sicht der DAEF ist dieser Aspekt von besonderer Bedeutung, da beim Standortauswahlverfahren unterschiedliche Wirtsgesteine zu vergleichen sind, die auch unterschiedliche Sicherheitskonzepte und ewG-Typen aufweisen. Damit ergibt sich, dass für den jeweiligen Wirtsgesteins-/ewG-Typ eigene prototypische technische Endlagerkonzepte zu betrachten sind, was wiederum unterschiedliche Anforderungen an die geologischen Gegebenheiten bedingt. Daher ist die Erfüllung dieser Wirtsgesteins-/ewG-Typen spezifischen Anforderungen in der übertägigen Erkundung zu überprüfen. Dies gilt selbst dann, wenn die Sicherheitsuntersuchungen aufgrund der Informationslage – etwa in Phase 1 – noch weitgehend generisch sind.

Ausländische Erfahrungen bestätigen diese Sichtweise: Es zeigt sich sogar, dass das Erfordernis ganzheitlicher Betrachtungen dazu führt, dass Sicherheitsbetrachtungen möglichst *vor der Formulierung von Kriterien* ausgeführt werden sollten.

Da die vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) wie auch die im Bericht der Endlagerkommission vorgeschlagenen Abwägungskriterien im Gegensatz zu den Vorgehensweisen in anderen Ländern *nicht* aufgrund vorheriger systematischer Sicherheitsbetrachtungen zum gesamten Endlagersystem entstanden sind, wird eine Verknüpfung von Sicherheitsuntersuchungen und Abwägungskriterien umso notwendiger. Dieses Verknüpfungsgebot gilt auch schon für die Phase 1 des Standortauswahlverfahrens.

Zu konkretisierenden Vorschlägen zur Methodik von Sicherheitsuntersuchungen in den einzelnen Phasen des Verfahrens wird auf Kapitel 4 verwiesen. In die vergleichende Sicherheitsbewertung müssen immer sowohl die Ergebnisse quantitativer Sicherheitsuntersuchungen (radiologische Indikatoren, Rechnungen zur Integrität des ewG, andere Indikatoren zum Verhalten von Barrieren und zu eventuellen Freisetzen) als auch qualitative Aspekte wie zum Beispiel Aussagen zur Robustheit einfließen und zu einer Gesamtaussage verknüpft werden. Um verschiedene potenzielle Endlagerstandorte bzw. -systeme möglichst objektiv vergleichen zu können, empfiehlt die DAEF, insbesondere das Einschlussvermögen des ewG bzw. eines vergleichbaren einschlusswirksamen Bereichs zu bewerten. Die methodischen Vorgehensweisen müssen im Vorfeld der Anwendung im Standortauswahlverfahren festgelegt werden. Hierzu besteht auch noch deutlicher F&E-Bedarf in Deutschland.

Grundlage der Sicherheitsuntersuchungen sollten die Sicherheitsanforderungen sein. Zu deren Weiterentwicklungen hat die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ eine Reihe von Empfehlungen formuliert. Die DAEF verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass die sogenannte "vereinfachte radiologische Langzeitaussage" nach ihrer Auffassung nicht ersatzlos entfallen sollte. Nach Auffassung der DAEF ist die Prüfung der Geringfügigkeit der aus dem ewG bzw. den langfristig einschlusswirksamen Barrieren möglicherweise freigesetzten Schadstoffmengen unverzichtbarer Bestandteil von Sicherheitsuntersuchungen. Die DAEF empfiehlt eine Überarbeitung der diesbezüglichen Rechenvorschrift sowie eine Änderung der irreführenden Bezeichnung. Dies sollte im Rahmen einer Novellierung der Sicherheitsanforderungen oder aber durch eine entsprechende Leitlinie vorgesehen werden.

6 Literatur

- Andra (2005): Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs: Dossier 2005 Argile. Synthesis. Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation
- BMU (2010): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 30. September 2010
- BMUB (2015): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)
- Endlagerkommission (2016): Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Kommissionsdrucksache K-Drs. 268
- ENSI (2010): Eidgenössisches Nukleares Sicherheitsinspektorat: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan Geologische Tiefenlager Etappe 2. – ENSI 33-075, April 2010
- Europäische Union (2011): RICHTLINIE 2011/70/EURATOM DES RATES vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle. Amtsblatt der Europäischen Union, 2.8.2011
- European Pilot Study (2016): Report on the European Pilot Study on the Regulatory Review of a Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste. Final version 16/08/2016, <http://www.fanc.fgov.be/GED/00000000/4300/4322.pdf>
- Fischer-Appelt, K.; Baltés, B.; Buhmann, D.; Larue, J.; Möning, J. (2013): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. – GRS-290, ISBN 978-3-939355-66-3
- Galson, D. A.; Richardson, P. J. (2011): Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case. Project Summary Report. – PAMINA deliverable D5.1, www.ip-pamina.eu
- Gautschi, A. (2016): Site Selection in Switzerland: Content and Contribution of the Technical-Scientific Work. 47th Annual Meeting on Nuclear Technology, 10 – 12 May 2016, Hamburg, Germany
- Gesetz zu dem Gemeinsamen Übereinkommen vom 5. September 1997 über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Gesetz zu dem Übereinkommen über nukleare Entsorgung) vom 13. August 1998. Bundesgesetzblatt Jahrgang 1998 Teil II Nr. 31, ausgegeben zu Bonn am 20. August 1998
- Hedin, A.; Olsson, O. (2015): Role of geoscientific arguments in siting an SNF repository in Sweden. In (NEA 2016)
- IAEA (2011): International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-5
- IAEA (2012): International Atomic Energy Agency: IAEA Safety Standards, The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, N° SSG-23 Specific Safety Guide

- ICRP (2013): International Commission on Radiological Protection: Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122. Ann. ICRP 42(3)
- Jobmann, M., et al. (2016): Projekt CHRISTA – Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine 2016
- Lemy, F.; Bernier, F. (2014): Regulatory Expectations Regarding the Safety Case: Moving from Conceptualization to Implementation. Euradwaste'13, 8th EC Conference on the Management of Radioactive Waste. Community Policy and Research on Disposal. 14–17 October 2013, Vilnius, Lithuania. Conference proceedings, EUR 26846 EN, pp. 167–170
- Lemy, F. et al. (2013): Sustainable Network of Independent Technical Expertise for Radioactive Waste Disposal. Main Key Technical Issues, Expertise and Support Needed. – SITEX Deliverable D2.2, www.sitexproject.eu
- Nagra (1985): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: «Projekt Gewähr 1985»; Nagra Gewähr Berichte NGB 85-01 bis NGB 85-08. Nagra, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2002a): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Nagra Technical Report NTB 02-02, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2002b): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, NTB 02-03, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2002c): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Project Opalinus Clay: Safety Report: Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Long-Lived Intermediate-Level Waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technical Report NTB 02-05, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2005): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle: Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete, Nagra Technical Report NTB 05-02, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2008a): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Nagra Technical Report NTB 08-03, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2008b): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie (Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit), Nagra Technical Report NTB 08-05, Wettingen, Switzerland
- Nagra (2008c): Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Modellhaftes Inventar der radioaktiven Abfälle: MIRAM 2008, Nagra Technical Report NTB 08-06, Wettingen, Switzerland
- NEA (2004): OECD Nuclear Energy Agency: Post-closure Safety Case for Geological Repositories: Nature and Purpose. – NEA-Report No. 3679, (2004)
- NEA (2012a): OECD Nuclear Energy Agency: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Outcome of the NEA MeSA Initiative. – NEA-Report No. 6923, ISBN 978-92-64-99190-3

- NEA (2012b): OECD Nuclear Energy Agency: Indicators in the Safety Case. A report of the Integrated Group on the Safety Case (IGSC). NEA/RWM/R(2012)7
- NEA (2013): OECD Nuclear Energy Agency: The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Case for Geological Repositories, OECD/NEA/RWM/R (2013) 1
- NEA (2014): OECD Nuclear Energy Agency: The Safety Case for Deep Geological Disposal of Radioactive Waste: 2013 State of the Art. Symposium Proceedings, 7–9 October 2013, Paris, France. NEA/RWM/R(2013)9, March 2014
- NEA (2016): OECD Nuclear Energy Agency: Integration Group for the Safety Case. Summary of the 2015 Topical Session on “Role of geoscientific arguments in the siting process”. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, Im Erscheinen
- POSIVA (2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto – Synthesis 2012. December 2012. POSIVA 2012-12
- Schneider, J. (2015): Role of geo-scientific arguments in the ongoing site selection process in Switzerland. In (OECD/NEA 2016)
- SGDD (2016): Staatliche Geologische Dienste Deutschlands: Datengrundlagen für die geowissenschaftlichen Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens, Weimar, 5. April 2016, (K-MAT53a)
- SGT (2008): Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Energie (BfE): Sachplan Geologische Tiefenlager. Konzeptteil
- SKB (1999): Svensk Kärnbränslehantering AB: Deep repository for spent nuclear fuel; SR 97 – Post Closure Safety; Main Report. November 1999. TR 99-06
- SKB (2000): Svensk Kärnbränslehantering AB: What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. April 2000. TR-00-12
- SKB (2006): Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. October 2006. TR-06-09
- SKB (2009): Svensk Kärnbränslehantering AB: Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection. June 2009. SKBdoc 1221293
- SKB (2011a): Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. March 2011. Updated 2015-05. TR-11-01
- SKB (2011b): Svensk Kärnbränslehantering AB: Site selection – siting of the final repository for spent nuclear fuel. March 2011. TR-11-07
- Zuidema, P; Schneider, J. (2014): The role of safety analyses in site selection: Nagra’s experience from the ongoing Swiss site selection process. In (NEA 2014)

Wer ist die DAEF?

Die Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung (DAEF) versteht sich als eine unabhängige Arbeitsgemeinschaft, die sich der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Endlagerung radioaktiver Abfälle widmet. Mit ihren Arbeiten leisten ihre Mitglieder einen Beitrag zur sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall und entwickeln die damit verbundene naturwissenschaftliche, sozialwissenschaftliche und technische Expertise weiter.

Dabei ist die DAEF ein fachorientierter Zusammenschluss der beteiligten Mitgliedsinstitutionen und kein Zusammenschluss der beteiligten Institutionen im Sinne einer eigenständigen juristischen Person.

Mitglieder der DAEF (Stand: Juni 2017):

DBE TECHNOLOGY GmbH

Eschenstraße 55, 31224 Peine

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Wilhelm Bollingerfehr

(bollingerfehr@dbe.de)

Dr.-Ing. Jürgen Krone

(krone@dbe.de)

DMT GmbH & Co. KG

Am Technologiepark 1, 45307 Essen

Ansprechpartner:

Dieter Wittenberg

(dieter.wittenberg@dm-group.com)

Forschungszentrum Jülich GmbH

Institut für Energie- und Klimaforschung,

Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit (IEK-6)

Wilhelm-Johnen-Straße, 52425 Jülich

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dirk Bosbach

(d.bosbach@fz-juelich.de)

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

• Schwertnergasse 1, 50667 Köln

Ansprechpartner:

Dr. Klaus Fischer-Appelt

(klaus.fischer-appelt@grs.de)

• Theodor-Heuss-Straße 4, 38122 Braunschweig

Ansprechpartner:

Dr. Jörg Mönig, stellv. Vorsitzender

(joerg.moenig@grs.de)

Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf

Institut für Ressourcenökologie,

Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Thorsten Stumpf

(t.stumpf@hzdr.de)

Dr. Vinzenz Brendler

(v.brendler@hzdr.de)

IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG) GmbH

Friederikenstraße 60, 04279 Leipzig

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. habil. Wolfgang Minkley

(wolfgang.minkley@ifg-leipzig.de)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

- Institut für Nukleare Entsorgung (INE)

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Horst Geckeis, Vorsitzender

(horst.geckeis@kit.edu)

- Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Armin Grunwald

(armin.grunwald@kit.edu)

Dr. Peter Hocke-Bergler

(peter.hocke@kit.edu)

Öko-Institut e.V.

Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Beate Kallenbach-Herbert

(b.kallenbach@oeko.de)

RWTH Aachen

**NET – Institut für nukleare Entsorgung
und Techniktransfer**

Elisabethstraße 16, 52062 Aachen

Ansprechpartner:

Dr. Frank Charlier

(charlier@net.rwth-aachen.de)

Technische Universität Clausthal

Institut für Endlagerforschung

Adolph-Roemer-Straße 2a, 38678 Clausthal-Zellerfeld

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhlig

(klaus.roehlig@tu-clausthal.de)

Technische Universität Bergakademie Freiberg

Institut für Bergbau und Spezialtiefbau

Gustav-Zeuner-Str. 1A, 09599 Freiberg

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla

(wolfram.kudla@mabb.tu-freiberg.de)

TÜV Rheinland ISTec GmbH

Garching-Forschungszentrum

Boltzmannstraße 14, 85748 Garching b. München

Ansprechpartner:

Dr. Jörg Kaulard

(joerg.kaulard@de.tuv.com)

Universität Stuttgart

**Institut für Sozialwissenschaften, Abteilung für Technik
und Umweltsoziologie**

**Zentrum für Interdisziplinäre Risiko- und Innovationsfor-
schung an der Universität Stuttgart (ZIRIUS)**

Seidenstr. 36, 70174 Stuttgart

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Dr. h.c. Ortwin Renn

(ortwin.renn@sowi.uni-stuttgart.de)

