



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Endlagerkonzepte

Überblick über grundsätzliche Rahmenbedingungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens

Stand 28.09.2020

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 1 |
| Abbildungsverzeichnis | 2 |
| Abkürzungsverzeichnis | 3 |
| 1 Einführung | 4 |
| 1.1 Veranlassung | 4 |
| 1.2 Einleitung und Gegenstand | 4 |
| 1.3 Abgrenzung | 8 |
| 2 Grundlagen | 9 |
| 2.1 Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren | 9 |
| 2.2 Aufbau eines Endlagers | 9 |
| 3 Sicherheitskonzepte | 12 |
| 3.1 Sicherheitskonzept nach dem ewG-Prinzip | 12 |
| 3.2 Sicherheitskonzept auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren | 15 |
| 4 Regulatorische Vorgaben | 17 |
| 4.1 Vorgaben aus dem AtG | 17 |
| 4.2 Vorgaben aus dem StandAG | 17 |
| 4.3 Vorgaben aus der Sicherheitsverordnung | 18 |
| 5 Endlagerkonzepte im Rahmen des Standortauswahlverfahrens | 19 |
| 5.1 Grundzüge für in Frage kommende Endlagerkonzepte | 19 |
| 5.2 Endlagerkonzepte in Schritt 1 der Phase I | 19 |
| 5.3 Endlagerkonzepte in Schritt 2 der Phase I | 21 |
| 5.4 Endlagerkonzepte ab Phase II | 22 |
| 6 Literatur | 23 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1: | Schematische Ablauf des Standortauswahlverfahrens | 6 |
| Abbildung 2: | Beispiel eines möglichen Endlagers im Tongestein anhand der schematischen Darstellung eines geplanten Endlagers für hochradioaktive Abfälle in der Schweiz (Nagra 2011) | 10 |
| Abbildung 3: | Beispiel des in Finnland genehmigten Barrierenkonzepts (Rojmar o. J.) | 11 |
| Abbildung 4: | Schematische Darstellung des ewG-Prinzips (K-Drs. 268) | 13 |
| Abbildung 5: | In der Stellungnahme der ESK dargestellte wesentliche Barrieren für das ewG-Prinzip (in dem Fall der Abbildung für das Wirtsgestein Tongestein, die dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit der jeweiligen Barriere); *Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille (ESK 2019) | 14 |
| Abbildung 6: | In der Stellungnahme der ESK dargestellte wesentliche Barrieren für das Prinzip des Einschlusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren (die dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit der Barriere; *Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille (ESK 2019) | 15 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|--|
| AtG | Atomgesetz |
| BASE | Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung |
| BE | Brennelemente |
| BGBI | Bundesgesetzblatt |
| BGE | Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH |
| BMU | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit |
| DAEF | Deutsche Arbeitsgemeinschaft Endlagerforschung |
| EndlSiAnfV | Endlagersicherheitsanforderungsverordnung |
| EndlSiUntV | Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung |
| ESK | Entsorgungskommission |
| EURAD | European Joint Programme on Radioactive Waste Management |
| ewG | einschlusswirksamer Gebirgsbereich |
| HAA | Hochaktive Abfälle |
| KBS | Kärnbränslesäkerhet (Kernbrennstoffsicherheit) |
| LMA | Langlebige mittelaktive Abfälle |
| Nagra | Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle |
| OECD-NEA | Organisation for Economic Co-operation and Development – Nuclear Energy Agency |
| RESUS | Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle |
| StandAG | Standortauswahlgesetz |
| UVP | Umweltverträglichkeitsprüfung |
| UVPG | Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung |
| VSG | Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben |

1 Einführung

1.1 Veranlassung

Am 21. September 2016 wurde die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) auf Basis des Gesetzes zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung aus dem Juli 2016 gegründet.

Die Durchführung des Standortauswahlverfahrens richtet sich nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG). Die ursprüngliche Fassung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG 2013) vom 23. Juli 2013 (Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 2553) trat nach Evaluierung durch den Bundestag am 16. Mai 2017 außer Kraft. Zeitgleich trat die Neufassung, das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, Art. 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), überwiegend zum 16. Mai 2017 in Kraft. Letzte Änderungen des Standortauswahlgesetzes erfolgten durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) und traten am 27. Juni 2020 in Kraft.

Die Übertragung der Wahrnehmung der Aufgaben des Bundes nach § 9a Abs. 3 S. 1 des Atomgesetzes (AtG) auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erfolgte gemäß § 9a Abs. 3 S. 2 AtG am 25.04.2017. Damit ist die BGE Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren nach § 3 Abs. 1 StandAG. Am 5. September 2017 erfolgte der offizielle Start des Standortauswahlverfahrens in Berlin. Nach § 13 StandAG ist die Vorhabenträgerin zur Veröffentlichung ihrer ersten Zwischenergebnisse im Zwischenbericht Teilgebiete verpflichtet.

1.2 Einleitung und Gegenstand

Das Standortauswahlverfahren ist ein gestuftes Verfahren (vgl. Abbildung 1), das sich in drei Phasen gliedert. Die Ergebnisse jeder Phase und die daraus resultierenden Festlegungen durch den Gesetzgeber bestimmen den konkreten Arbeitsumfang der darauffolgenden Phase.

Die Phase I ist in zwei Schritte unterteilt. In Schritt 1 erfolgt die Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG, welche günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen. Dies geschieht durch die Anwendung der in den §§ 22 bis 24 StandAG festgelegten geowissenschaftlichen Kriterien und Mindestanforderungen.

Die ermittelten Teilgebiete werden in Form eines Zwischenberichtes durch die BGE veröffentlicht. In diesem Zwischenbericht zu den Teilgebieten werden u. a. alle erarbeiteten Grundlagen für die Anwendung der Kriterien und Mindestanforderungen und detaillierte Darlegungen über die Datenabfragen, die Datenlieferungen und die Homogenisierung der Daten für die Anwendung der Kriterien und Mindestanforderungen zusammengeführt. Ziel des Zwischenberichtes ist es, die ermittelten Teilgebiete mit zu erwartenden

günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle darzustellen.

Nach der Veröffentlichung des Zwischenbericht Teilgebiete durch die Vorhabenträgerin übermittelt diese den Bericht an das BASE. Das Bundesamt hat nach Erhalt des Berichtes gemäß § 9 Abs. 1 S. 1 StandAG die Aufgabe, eine Fachkonferenz Teilgebiete einzuberufen. Die Fachkonferenz Teilgebiete ist das erste Format des auf eine kontinuierliche Beteiligung angelegten Standortauswahlverfahrens und soll eine möglichst frühzeitige Einbeziehung von Vertretern der Teilgebiete noch vor der Auswahl von Standortregionen ermöglichen.

In dem demnächst startenden Schritt 2 der Phase I erfolgt die Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung gemäß § 14 StandAG auf Basis der zuvor ermittelten Teilgebiete und den Beratungsergebnissen aus der Fachkonferenz Teilgebiete. Hierfür werden für jedes Teilgebiet repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG durchgeführt, bevor durch die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien günstige Standortregionen ermittelt werden. Die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien dient vorrangig der Einengung von großen, potentiell für ein Endlager geeigneten Gebieten. Sie können auch für einen Vergleich zwischen Gebieten herangezogen werden, die unter Sicherheitsaspekten als gleichwertig zu betrachten sind (§ 25 S. 1 und 2 StandAG). Des Weiteren werden für die Standortregionen standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung erarbeitet. Dieser Schritt beginnt unmittelbar nach der Veröffentlichung des Zwischenberichtes Teilgebiete.

Die BGE fasst den Vorschlag für die übertägig zu erkundenden Standortregionen mit Begründung, den Ergebnissen aus der Fachkonferenz zu den Teilgebieten und den standortbezogenen Erkundungsprogrammen zusammen und übermittelt diesen an das BASE, das den Vorschlag der BGE prüft. Der Bundesgesetzgeber trifft hierzu die verbindliche Entscheidung und legt den Arbeitsumfang für die Phase II fest.

In Phase II des Standortauswahlverfahrens erfolgt die übertägige Erkundung der gesetzlich festgelegten Standortregionen gemäß § 16 StandAG durch die festgelegten standortbezogenen Erkundungsprogramme. Auf Grundlage der Erkundungsergebnisse werden weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt. Für jede Standortregion werden sozioökonomische Potenzialanalysen durchgeführt. Des Weiteren erfolgt erneut die vergleichende Analyse und Abwägung nach Maßgabe der gesetzlich festgelegten Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sowie der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien. Weiter erarbeitet die BGE standortbezogene Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die untertägige Erkundung und die umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Den Vorschlag für die untertägig zu erkundenden Standortregionen mit Begründung übermittelt die BGE dem BASE. Der Bundesgesetzgeber trifft hierzu die verbindliche Entscheidung und legt den Arbeitsumfang für die Phase III fest.

Mit der Umsetzung der Phase III erfolgt die untertägige Erkundung der zuvor festgelegten Standorte mit einem anschließenden Vergleich. Die BGE führt auf Basis der zuvor durch das BASE festgelegten Erkundungsprogramme für die untertägige Erkundung diese innerhalb durch Bundestag und Bundesrat festlegten Standorte durch. Auf Basis dieser Erkundungsergebnisse führt die BGE umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durch und erstellt die Unterlagen für die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) gemäß § 16 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG), bevor eine erneute Anwendung der Kriterien und Anforderungen gemäß §§ 22 bis 24 StandAG erfolgt. Die Anwendung der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlage 12 (zu § 25) StandAG erfolgt nach Maßgabe von § 25 StandAG.

Auf Basis dieser Ergebnisse schlägt die BGE dem BASE den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für die Errichtung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle vor. Das BASE prüft den Vorschlag der BGE einschließlich des zugrundeliegenden Standortvergleiches von mindestens zwei Standorten Mit der Festlegung durch den Bundesgesetzgeber ist das finale Ziel des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle erreicht. Mit dem StandAG wird für die Festlegung eines Standortes das Jahr 2031 angestrebt.

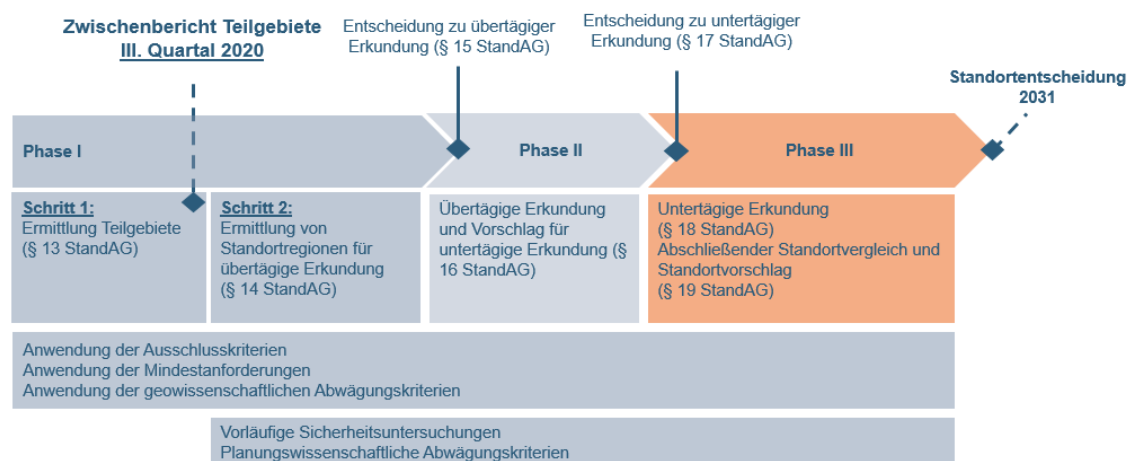


Abbildung 1: Schematische Ablauf des Standortauswahlverfahrens

Aus der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398) geht in § 13 hervor, dass „Voraussetzung für die Anwendung der gesetzlich festgelegten Anforderungen und Kriterien sowie insbesondere die Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen [...] die Entwicklung von Endlagersystemen für unterschiedliche geologischen Formationen und Konfigurationen durch den Vorhabenträger [ist]. Die Entwicklung der Endlagersysteme wird sich im laufenden Auswahlverfahren mit fortschreitendem Kenntnisstand standortspezifisch konkretisieren. Für die Ermittlung der Teilgebiete genügen generische, an den verschiedenen Wirtsgesteinskonfigurationen orientierte Endlagerkonzepte.“ Dem entsprechend müssen bereits in Phase I des Standortauswahlverfahrens Endlagerkonzepte betrachtet werden. In Schritt 1, der Ermittlung der Teilgebiete, genügen hierfür generische Endlagerkonzepte. Diese sollen an die verschiedenen Wirtsgesteinskonfigurationen angepasst sein.

In diesem Bericht werden grundlegende Überlegungen zu generischen Endlagerkonzepten im derzeitigen Stadium des Standortauswahlverfahrens aufgezeigt. Dabei wird ausgehend von den möglichen Wirtsgesteinskonfigurationen ein Überblick über die grundsätzlich anzusetzenden Endlagerkonzepte mit Bezug zum gewählten Sicherheitskonzept (siehe Kapitel 3) gemäß § 27 StandAG und der Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (kurz Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291)) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) gegeben. Daran anschließend werden grundlegende regulatorische Vorgaben aus dem StandAG, dem AtG sowie der Sicherheitsverordnung beschrieben (Kapitel 4). In Kapitel 5 erfolgt eine kurze Beschreibung der wesentlichen Rahmenbedingungen für Endlagerkonzepte mit Blick auf die Phase I des Standortauswahlverfahrens.

Wie eingangs aufgezeigt stellen die Wirtsgesteinskonfigurationen, welche bei der Ermittlung und Ausweisung der Teilgebiete (§ 13 StandAG) zu betrachten sind, eine wichtige Grundlage für die Endlagerkonzepte dar. Eine entscheidende Betrachtungsgröße ist dabei die räumliche Ausdehnung des Wirtsgesteins, da das Endlager für hochradioaktive Abfälle bzw. dessen Einlagerungsbereich im Wirtsgestein errichtet wird. Als Wirtsgesteine kommen grundsätzlich Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein in Frage (BGE 2020j). Wesentliche Randbedingungen für die einzelnen Endlagerkonzepte sind die zur Verfügung stehende Fläche sowie die Mächtigkeit der jeweiligen Wirtsgesteinskonfiguration. Diese wurden bei der Ermittlung der Teilgebiete im Rahmen der Bearbeitung der Mindestanforderungen (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG für die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) und § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG für die Fläche des Endlagers) berücksichtigt. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist *„der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet“* (§ 2 StandAG).

Bei der Anwendung der Mindestanforderungen und den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist zu beachten, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich beziehungsweise der Einlagerungsbereich prinzipiell räumlich möglich ist. Deshalb werden endlagerrelevante Gesteinsabfolgen/-formationen untersucht, welche die Aufgaben des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs übernehmen beziehungsweise den Einlagerungsbereich aufnehmen sollen (BGE 2020j). Es wurde der mögliche Einfluss dieses vereinfachten Vorgehens auf die Endlagerkonzepte untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass dieser in diesem Stadium des Suchverfahrens vernachlässigbar ist. Dies wird nachfolgend für die beiden oben genannten Mindestanforderungen *„Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“* und *„Fläche des Endlagers“* erläutert.

Die Mächtigkeit des den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmenden Gebirges muss mindestens 100 m betragen (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG, mit Sonderregelungen für kristallines Wirtsgestein). Das in diesem zu errichtenden Endlager weist mindestens

die Höhe einer Einlagerungssohle auf. Da die aufzufahrenden Hohlräume auf ein Minimum zu begrenzen sind, ist dies der begrenzende Faktor für die Mächtigkeit des Endlagers. Für jedes ausgewiesene Teilgebiet mit der entsprechenden Mächtigkeit steht mindestens ein Endlagerkonzept zur Verfügung, mit dem das Endlager realisiert werden kann.

Bei der Ausweisung der Teilgebiete wurde für die Mindestanforderung „*Fläche des Endlagers*“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG) in der Bearbeitung die vorsorglich angegebenen Flächen aus der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398) herangezogen. Die notwendigen Flächen sind mit 3 km² für Steinsalz, 10 km² für Tongestein und 6 km² für kristallines Wirtsgestein angegeben. Im Zuge der Arbeiten der Endlagerkommission wurde ein Gutachten zum Flächenbedarf eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Auftrag gegeben. Dieses Gutachten kommt zu dem Ergebnis, dass für die Endlagerung (in einer Tiefe von 600 m) im Steinsalz ca. 2,3 km², im Tongestein ca. 6,6 km² und für kristallines Wirtsgestein (Granit) ca. 3,6 km² an notwendiger Fläche ausreichend sind (DBE TEC 2016 S. 6). Die BGE geht daher in ihrer Bearbeitung davon aus, dass die Angaben aus der Begründung des Gesetzentwurfs für die Erarbeitung der Endlagerkonzepte abdeckend sind.

1.3 Abgrenzung

Zum Bau, Betrieb und Stilllegung eines Endlagers sind technische Anlagen sowohl über als auch unter Tage erforderlich. Für die hier beschriebenen Endlagerkonzepte werden die Tagesanlagen nicht dargestellt. Innerhalb des Berichts werden allerdings Bezüge zu den Tagesanlagen aufgezeigt.

Die im Rahmen dieses Berichts beschriebenen Endlagerkonzepte beziehen sich ausschließlich auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Die Betrachtung von Endlagerkonzepten zur gemeinsamen Einlagerung größerer Mengen schwach- und mittlerradioaktiver Abfälle, zusätzlich zu den hochradioaktiven Abfällen, ist nicht Gegenstand dieses Berichts.

2 Grundlagen

2.1 Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren

Gemäß § 1 Absatz 2 StandAG soll der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ausgewählt 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 Jahren gewährleistet*“. Die im Rahmen von § 27 StandAG geregelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden mit der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) genauer spezifiziert. Darin werden die Anforderungen und durchzuführenden Arbeiten in Artikel 2 *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV)* geregelt. Die Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens von entscheidender Bedeutung für den sicherheitsgerichteten Vergleich verbliebener Regionen und Standorte.

2.2 Aufbau eines Endlagers

Ein Endlager unterteilt sich in mehrere Bereiche, die für den Betrieb erforderlich sind. Zunächst sind mindestens zwei Zugänge nach unter Tage (Schacht oder Rampe) notwendig. Durch diese Zugänge werden das Betriebspersonal, die Endlagergebäude (beladene Endlagerbehälter) und weitere Materialien (beispielsweise Baustoffe und Betriebsmittel) nach unter Tage transportiert. In der Nähe zu einem Zugang nach über Tage werden Infrastrukturbereiche errichtet, dazu zählen z. B. eine Werkstatt für Transportfahrzeuge, Lagerflächen für Ersatzteile oder Baustoffe und Sozialräume für das Personal. Die Endlagergebäude werden mit Hilfe der Transportfahrzeuge über Richtstrecken (Verbindungstunnel) zu dem Einlagerungsort eines Einlagerungsbereiches transportiert, dort entsprechend des Einlagerungskonzeptes eingelagert und mit einem Versatzmaterial zur Auffüllung des verbleibenden Hohlraums umgeben. Im Zuge des Einlagerungsbetriebs und insbesondere an dessen Ende werden an den im Sicherheitskonzept festgelegten Stellen Verschlussbauwerke (Streckenverschlüsse) errichtet, um Einlagerungsbereiche vom restlichen Endlager und den Tageszugängen zu trennen. Die Einlagerung weiterer Gebinde erfolgt anschließend in weiteren Einlagerungsbereichen. Nach der Einlagerung des gesamten hochradioaktiven Abfalls in dem Endlager werden die Zugänge nach unter Tage anforderungsgerecht verfüllt und somit das Endlager bestmöglich in das umgebende Wirtsgestein eingepasst.

Zur besseren Veranschaulichung sind nachfolgend zwei Beispiele geplanter Endlager in der Schweiz und in Finnland schematisch dargestellt. Mit dem schweizerischen Endlager (Abbildung 2) wird das Konzept eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verfolgt

(vgl. Kapitel 3.1). Das finnische Endlager (Abbildung 3) belastet bezüglich eines langzeitsicheren Einschlusses der hochradioaktiven Abfälle die technischen und geotechnische Barrieren (vgl. Kapitel 3.2).

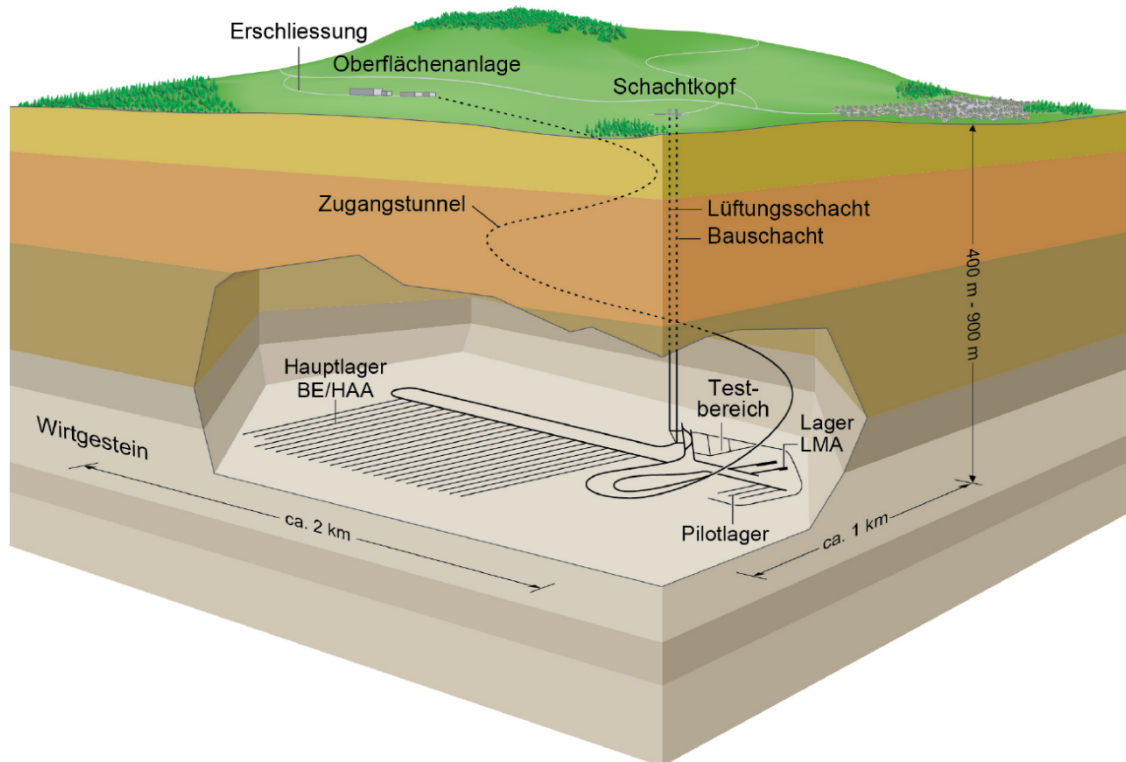


Abbildung 2: *Beispiel eines möglichen Endlagers im Tongestein anhand der schematischen Darstellung eines geplanten Endlagers für hochradioaktive Abfälle in der Schweiz (Nagra 2011)¹*

In einem von der Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) in der Schweiz entwickelten Endlagerkonzept (Abbildung 2) werden die hochradioaktiven Abfälle (*BE/HAA*) in dem Wirtgestein Tongestein in dem *Hauptlager* eingelagert. Es gibt mehrere Zugänge nach unter Tage, darunter sind zwei Schächte (ein *Bauschacht* und ein *Lüftungsschacht*) sowie eine Rampe (*Zugangstunnel*). Der *Zugangstunnel* ist an die *Oberflächenanlagen* (Tagesanlagen) angeschlossen. Die untertägigen Infrastrukturbereiche, das Versatzmaterial um die Endlagergebäude und die Verschlussbauwerke sind in dieser Abbildung nicht dargestellt. Darüber hinaus sind in diesem schweizerischen Konzept ein *Testbereich*, ein *Pilotlager* sowie ein Lager für langlebige mittelaktive Abfälle (*Lager LMA*) vorgesehen.

¹ Hinweis: In Deutschland ist die Menge der zu entsorgenden hochradioaktiven Abfälle größer als in der Schweiz, weshalb die angegebenen Abmessungen nicht übertragbar sind. In Deutschland sind größere Endlagerflächen zu erwarten.

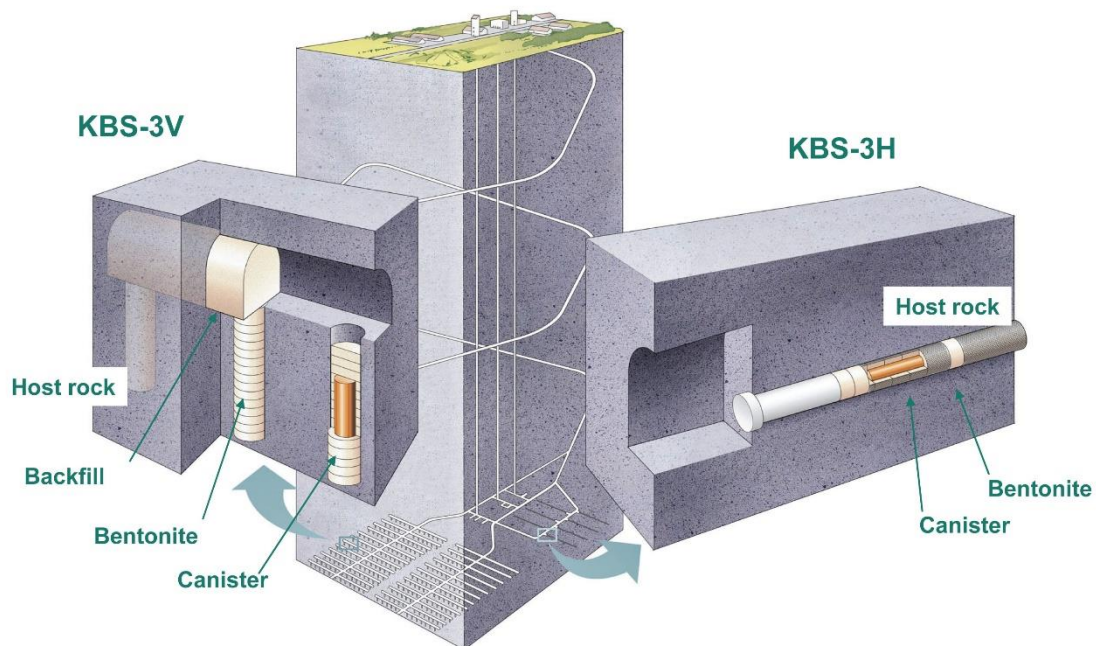


Abbildung 3: Beispiel des in Finnland genehmigten Barrierenkonzepts (Rojmar o. J.)

Das finnische Konzept des Unternehmens Posiva Oy (Abbildung 3) sieht wie das schweizerische Konzept sowohl Schächte als auch Rampen für den Zugang nach unter Tage vor. Am Fuße der Schächte sind die Infrastrukturbereiche angedeutet, die räumlich von dem restlichen Einlagerungsbereich im Wirtsgestein (*Host rock*) Kristallingestein getrennt sind. Auf der linken und rechten Bildseite ist die Einlagerung der mit den radioaktiven Abfällen befüllten Endlagergebilde für zwei unterschiedliche Einlagerungskonzepte dargestellt. Links ist das Konzept für eine vertikale Einlagerung der KBS 3-Behälter (Kärnbränslesäkerhet – Kernbrennstoffsicherheit) dargestellt (*KBS-3V*), rechts das Konzept für eine horizontale Einlagerung (*KBS-3H*). In Finnland soll das Konzept für eine vertikale Einlagerung umgesetzt werden. Dabei wird der Behälter (*Canister*) in ein Bohrloch mit Bentonitringen eingelagert und der übrige Hohlraum ebenfalls mit Bentonit (*Bentonite*) verfüllt. Die aufgefahrne Strecke wird mit Versatzmaterial (*Backfill*) aufgefüllt. Die Strecken- und Tageszugangsverschlüsse sind nicht dargestellt.

3 Sicherheitskonzepte

Der Schutz von Mensch und Umwelt vor der schädlichen Wirkung der endgelagerten hochradioaktiven Abfälle erfordert entsprechende Sicherheitskonzepte, deren Anforderungen durch das StandAG und die Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) grundsätzlich beschrieben werden. Der sichere Einschluss der Radionuklide über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre kann einerseits nach dem Prinzip des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erreicht werden, d. h. das Wirtsgestein Steinsalz, Tongestein oder kristallines Wirtsgestein sorgt als wesentliche Barriere für den sicheren Einschluss der Radionuklide, die technischen und geotechnischen Barrieren tragen somit nicht die Hauptlast des sicheren Einschlusses. Andererseits, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Falle des kristallinen Wirtsgesteins ausweisbar ist, wird der sichere Einschluss maßgeblich durch die für die jeweilige geologische Umgebung geeigneten technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barriere erreicht.

Im Rahmen der Sicherheitsuntersuchungen und der vergleichenden Bewertungen werden die weiteren Barrieren, die zusätzlich zu den wesentlichen Barrieren und im Zusammenwirken mit ihnen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern, ebenfalls berücksichtigt.

Im Folgenden werden die oben kurz angerissenen Sicherheitskonzepte nach dem ewG-Prinzip sowie dem Prinzip des Einschlusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren näher beschrieben.

3.1 Sicherheitskonzept nach dem ewG-Prinzip

Die Gewährleistung des sicheren Einschlusses erfolgt bei diesem Prinzip im Wesentlichen durch die Geologie Abbildung 4. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich hat u. a. die Hauptfunktion den Einlagerungsbereich räumlich von möglichen Transportwegen (für Radionuklide) in die Biosphäre zu trennen. Aus den §§ 22 bis 24 StandAG ergeben sich die Anforderungen an die Geologie zur Erfüllung des sicheren Einschlusses und der Rückhaltung.

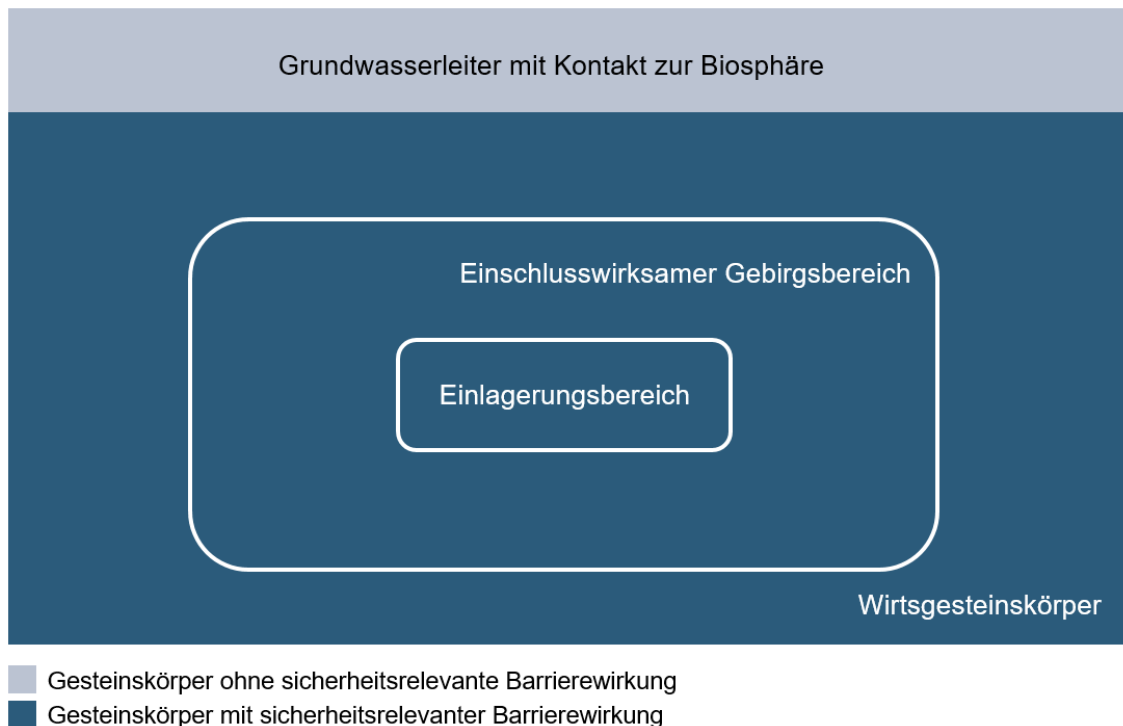


Abbildung 4: Schematische Darstellung des ewG-Prinzips (K-Drs. 268)

Im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wird ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich charakterisiert und sein Einschlussvermögens gemäß den Anforderungen der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) bewertet.

Zusätzlich dazu unterstützen die technischen und geotechnischen Barrieren die geologische Barriere bei der Erfüllung ihrer Aufgabe. Zu den technischen Barrieren gehören der Endlagerbehälter und die zu entsorgenden Abfälle selbst, beispielsweise die Hüllrohre der Brennelemente oder die Glasmatrix der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Zu den geotechnischen Barrieren gehören u. a. das Versatzmaterial zur Verfüllung der aufgefahrenen Hohlräume und die Verschlussbauwerke (beispielsweise von einer Einlagerungsstrecke oder den Zugängen des Endlagerbergwerkes von über Tage). Je nach Wirtsgestein und Sicherheitskonzept sowie dem daraus resultierenden Endlagerkonzept müssen die einzelnen Barrieren über unterschiedliche Zeiträume wirksam sein.

Die Entsorgungskommission (ESK) hat sich ausführlich mit den Anforderungen an das Barrierensystem beschäftigt und dazu eine entsprechende Stellungnahme veröffentlicht (ESK 2019). Eine wichtige Anmerkung zu den Ausarbeitungen der ESK (ESK 2019 S. 4) ist, dass ihnen ein Entwurf der Sicherheitsverordnung zu dem Ausarbeitungszeitpunkt bereits vorlag und ihre Arbeiten nicht auf den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des BMUs aus dem Jahr 2010 beruhen.

Abbildung 5 zeigt eine Darstellung der ESK, in welcher die wesentlichen Barrieren eines Endlagers, exemplarisch im Tongestein in der Schweiz, und deren einzelne notwendige Wirkungszeiträume dargestellt sind. Dieses Sicherheitskonzept findet ebenfalls im französischen und belgischen Konzept Anwendung.

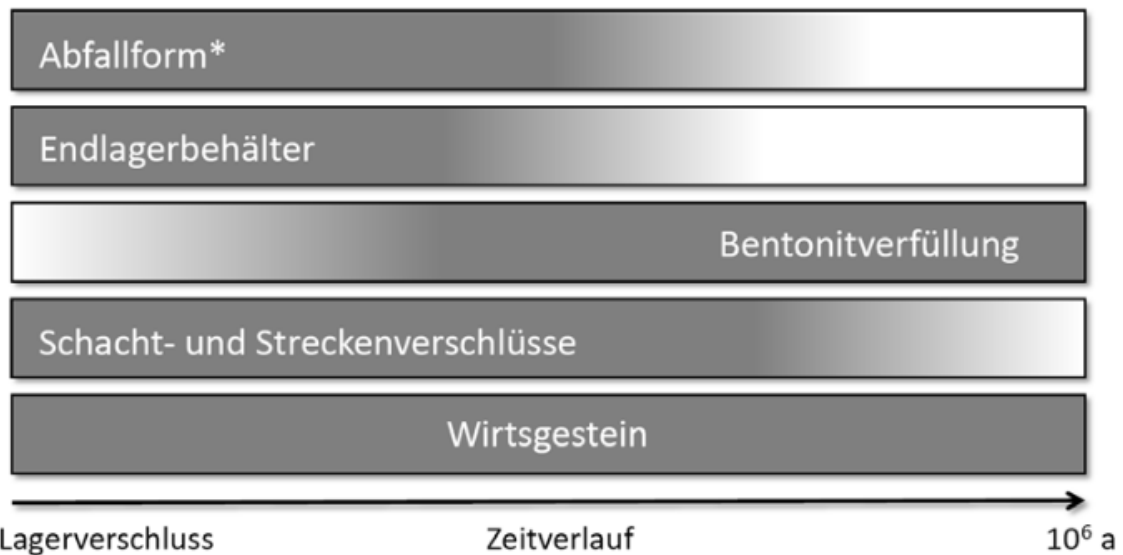


Abbildung 5: *In der Stellungnahme der ESK dargestellte wesentliche Barrieren für das ewG-Prinzip (in dem Fall der Abbildung für das Wirtsgestein Tongestein, die dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit der jeweiligen Barriere); *Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkockille (ESK 2019)*

Abbildung 5 verdeutlicht, dass das Wirtsgestein als Hauptbarriere über den gesamten Bewertungszeitraum wirken muss und durch die technischen und geotechnischen Barrieren unterstützt wird. Die Schacht- und Streckenverschlüsse sind als wirksame Barrieren zu errichten. Diese Abdichtbauwerke dienen als temporäre Barrieren, bis das Versatzmaterial (in diesem Fall Bentonit) seine Wirksamkeit durch die Aufnahme von Wasser erreicht hat. Der Endlagerbehälter und die Abfallform dienen ebenfalls als temporäre Barriere, da deren Einschusswirkung mit der Zeit nicht mehr erforderlich ist. Die Einschusswirkung des Wirtsgesteins wird hingegen für den ganzen Nachweiszeitraum von einer Million Jahren benötigt.

Im Wirtsgestein Steinsalz stellt sich die Wirkungsweise der Barrieren als Gesamtsystems ähnlich dar. Der Unterschied resultiert aus der Verwendung unterschiedlicher Versatzmaterialien. Im Wirtsgestein Steinsalz wird anstelle von Bentonit, welcher zur Erreichung seiner Wirksamkeit Wasser benötigt, in den meisten Konzepten Salzgrus als Versatzmaterial verwendet. Durch die natürliche Konvergenz des Gebirges kompaktiert der Salzgrus mit zunehmender Zeit und nimmt damit ähnliche Eigenschaften wie das umgebende unverritzte (ohne vorhandene bergmännische Eingriffe) Wirtsgestein an. Auch vorhandene Hohlräume werden durch die Konvergenzbewegungen mit der Zeit verschlossen. Im Laufe des Standortauswahlverfahrens und der weiteren Detaillierung im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen werden verschiedene Materialien hinsichtlich ihrer Eignungsfähigkeit als Barrierematerialien untersucht.

3.2 Sicherheitskonzept auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren

Gemäß StandAG und der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) ist das Wirtsgestein Kristallin ein Sonderfall, wenn hier kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Gemäß § 23 Abs. 4 StandAG kann der sichere Einschluss dann auch über höhere Anforderungen an die technischen und geotechnischen Barrieren nachgewiesen werden.

Als Beispiel für diesen Fall wird oft von dem skandinavischen (finnischen und schwedischen) KBS-3 Konzept (Abbildung 3) gesprochen, welches auch in der Stellungnahme der ESK (2019) behandelt wird. In Abbildung 6 sind die wesentlichen Barrieren nach diesem Prinzip mit den entsprechenden notwendigen Wirkungszeiträumen der jeweiligen Barrieren dargestellt. Für dieses Sicherheitskonzept werden höhere Anforderungen an die technischen Barrieren (Endlagerbehälter) und geotechnischen Barrieren (Bentonitmantel und Streckenabdichtung) gestellt.

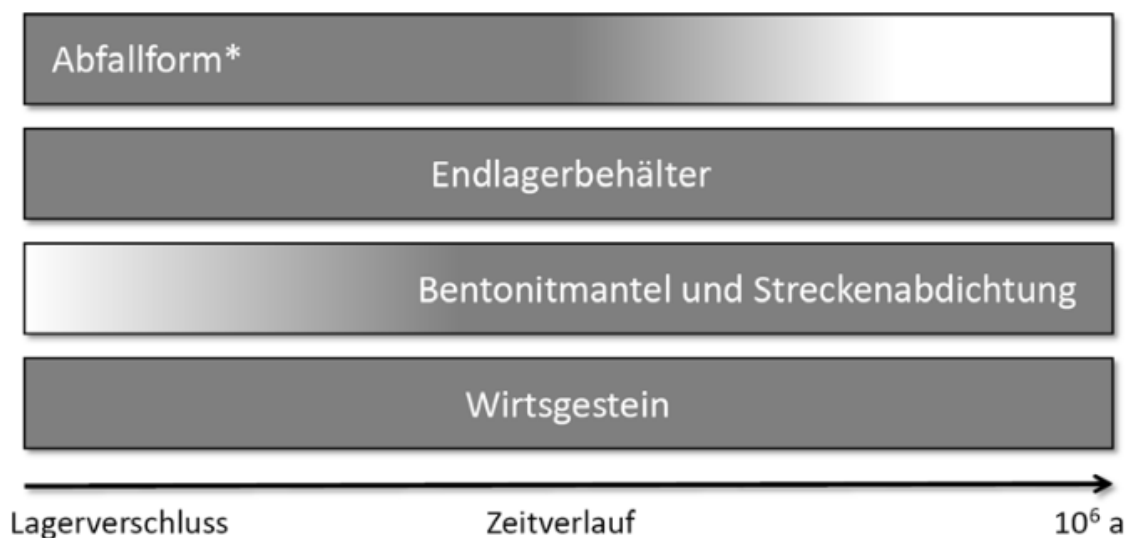


Abbildung 6: In der Stellungnahme der ESK dargestellte wesentliche Barrieren für das Prinzip des Einschlusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren (die dunkle Schattierung bedeutet Wirksamkeit der Barriere; *Brennstoff bzw. Glas mit Hüllrohr bzw. Stahlkokille (ESK 2019))

Als Hauptbarriere fungiert hier der Endlagerbehälter, welcher entsprechend der Randbedingungen im Kristallingestein (hauptsächlich feuchte Umgebung) eine sehr hohe Korrosionsresistenz aufweisen sollte. Im skandinavischen KBS-3-Konzept besitzt der Endlagerbehälter eine äußere Kupferummantelung, für dessen Integrität ein Zeitraum von mindestens 100.000 Jahren angegeben wird (Raiko 2005; King et al. 2012). Inwiefern das Wirtsgestein Kristallin hierbei als wirksame Barriere angesehen werden kann, ist im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu klären. Erstmalig erfolgt diese Betrachtung im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen entsprechend der in der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) eingeführten Begriff-

lichkeit der wesentlichen und weiteren Barrieren. Demnach ist eine eigene Sicherheitsphilosophie zu erarbeiten, welche dem entsprechenden Wirtsgestein am Standort zugeordnet werden kann. Im skandinavischen KBS-3-Konzept werden hohe Anforderungen an das Kristallingestein gestellt, z. B. eine hohe mechanische Stabilität (Posiva Oy & SKB 2017). Die Übertragbarkeit dieser Anforderungen auf die geologische Situation in Deutschland gilt es im Rahmen des Standortauswahlverfahrens zu überprüfen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass für das Prinzip des Einschlusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren analog zum KBS-3-Konzept nur Werkstoffe mit nachweisbar sehr langer Integrität bei sehr geringer Korrosionsrate für den noch zu entwickelnden Endlagerbehälter in Frage kommen. Dementsprechend ist das umgebende Versatzmaterial anzupassen, um einen sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle für den Nachweiszeitraum über die technische Barriere des Endlagerbehälters gewährleisten zu können.

4 Regulatorische Vorgaben

Auf Basis der unterschiedlichen Regelwerke können wesentliche Randbedingungen zur Entwicklung und Weiterentwicklung von Endlagerkonzepten identifiziert werden. Nachfolgend werden Randbedingungen aus dem StandAG, der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) und dem AtG für die Entwicklung von Endlagerkonzepten aufgeführt. Weitere Aspekte können sich mit dem Fortschritt des Standortauswahlverfahrens und der Berücksichtigung weiterer technischer Regelwerke ergeben.

4.1 Vorgaben aus dem AtG

Für die Errichtung und den Betrieb eines Endlagers für radioaktive Abfallstoffe bedarf es einer Genehmigung nach § 9b Abs. 1a AtG, welcher in Abs. 4 auf § 7 Abs. 2 Nr. 1-3 und 5 verweist. Dort heißt es unter Nr. 3: *„Die Genehmigung darf nur erteilt werden, wenn die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung und den Betrieb der Anlage getroffen ist“*. Dies ist bei der Ausarbeitung der Endlagerkonzepte zu berücksichtigen.

4.2 Vorgaben aus dem StandAG

Unabhängig des gewählten Sicherheitskonzepts beträgt der Nachweiszeitraum gemäß § 1 Abs. 2 StandAG eine Million Jahre. Dementsprechend muss das Endlagerkonzept in Zusammenarbeit mit der geologischen Situation am auszuwählenden Standort für diesen Zeitraum Sorge tragen, dass die radioaktiven Abfälle sicher von der Biosphäre zurückgehalten werden.

Darüber hinaus ist gemäß § 26 Abs. 2 Nr. 3 StandAG während des Betriebs des Endlagers zu gewährleisten, dass die radioaktiven Abfälle jederzeit rückgeholt werden können und dass für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem sicheren Verschluss des Endlagers eine Bergung der radioaktiven Abfälle möglich ist. Da die technischen und geotechnischen Barrieren unabhängig vom gewählten Sicherheitskonzept innerhalb des Nachweiszeitraums zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle als Bestandteil des Barrierensystems beitragen müssen, ist der negative Einfluss der eingebrachten Temperatur über die radioaktiven Abfälle auf ein Minimum zu beschränken. *„Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind“*, gilt aus Vorsorgegründen eine *„Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche“* des Endlagerbehälters (§ 27 Abs. 4 StandAG). Eine zu hohe Temperatur des Wirtsgesteins oder Versatzmaterials ist unerwünscht, da es dabei z. B. zur Freisetzung von Kristallwasser oder einer Mineralumwandlung kommen kann. Diese Prozesse wirken sich nachteilig auf den langzeitsicheren Einschluss der Radionuklide aus und sind daher auf ein Minimum zu beschränken oder ganz zu vermeiden. Des Weiteren muss das Endlager gemäß § 26 Abs. 2 Nr. 1 StandAG nach dem sicheren Verschluss wartungsfrei den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle über den Nachweiszeitraum gewährleisten.

4.3 Vorgaben aus der Sicherheitsverordnung

Im Folgenden werden wesentliche Aspekte aus der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) und deren Artikel 1 *Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV)* wiedergegeben. Die in Artikel 2 *Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV)* aufgeführten Anforderungen beziehen sich auf die durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen des Standortauswahlverfahren. Die EndlSiUntV verweist auf die EndlSiAnfV, in der die konkreten Grenzwerte und Anforderungen festgelegt sind.

Unter dem Begriff des sicheren Einschusses ist gemäß der § 4 Abs. 4 EndlSiAnfV zu verstehen, dass die wesentlichen Barrieren dafür Sorge tragen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen für den Nachweiszeitraum weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben. Im Zuge der Sicherheitsuntersuchungen sind u. a. gemäß § 3 Abs. 3 bis 5 EndlSiAnfV die zu erwartenden, abweichenden und hypothetischen Entwicklungen des Endlagers und seiner Umgebung zu betrachten. In Abhängigkeit zu den erwartenden Entwicklungen sind in § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV Grenzwerte bezüglich der Freisetzungsmassen aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren festgelegt, die einerseits jährlich und andererseits über den gesamten Bewertungszeitraum nicht überschritten werden dürfen. Neben den Grenzwerten für die Freisetzungsmassen sind ebenfalls Grenzwerte für die zusätzliche jährliche effektive Dosis für die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen aufgeführt, die gemäß § 7 Abs. 2 EndlSiAnfV bei den Berechnungen zur Bewertung des sicheren Einschusses ebenfalls nicht überschritten werden dürfen. In Abhängigkeit von dem gewählten Sicherheitskonzept werden darüber hinaus Anforderungen an die Integrität und Robustheit der jeweiligen wesentlichen Barrieren gestellt. § 5 EndlSiAnfV stellt Anforderungen an den Einschluss nach dem ewG-Prinzip und § 6 EndlSiAnfV Anforderungen an den sicheren Einschluss nach dem Prinzip des Einschusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren. Des Weiteren ist gemäß § 8 EndlSiAnfV für den gesamten Bewertungszeitraum eine Unterkritikalität (Ausschluss einer sich selbst erhaltenen Kettenreaktion) nachzuweisen.

5 Endlagerkonzepte im Rahmen des Standortauswahlverfahrens

5.1 Grundzüge für in Frage kommende Endlagerkonzepte

Im nationalen und internationalen Raum sind bereits eine Vielzahl an unterschiedlichen Endlagerkonzepten betrachtet worden. Inwiefern diese auf ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland übertragen werden können, ist gerade mit Blick auf die regulatorischen Vorgaben (siehe Kapitel 4) sowie der Art und Menge der einzulagernden radioaktiven Abfälle zu überprüfen.

Wie in Kapitel 3 dargelegt, ist das Endlagerkonzept ein Zusammenwirken des Einlagerungskonzeptes, den darauf abgestimmten technischen und geotechnischen Barrieren und der geologischen Situation. Dementsprechend werden die Endlagerkonzepte insbesondere auf Basis der folgenden Aspekte ausgearbeitet:

1. Zu Grunde gelegtes Sicherheitskonzept
 - ewG-Prinzip, siehe Kapitel 3.1
 - Prinzip des Einschlusses auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren, siehe Kapitel 3.2
2. Einlagerungskonzept (einschließlich Behälterkonzept)

Als Einlagerungskonzept wurden im nationalen und internationalen Raum hauptsächlich die **Streckenlagerung** oder die **Bohrlochlagerung** (ausgehend von den Strecken) betrachtet. Die Endlagerkommission hat ebenfalls nur diese beiden Möglichkeiten zur Endlagerung dargestellt (K-Drs. 268, S. 34). Bei der Bohrlochlagerung wird zwischen vertikaler und horizontaler Lagerung unterschieden und die Anzahl an Endlagergebinden pro Bohrloch variiert z. T. stark.
3. Materialauswahl

Die ausgewählten Materialien für die technischen und geotechnischen Barrieren hängen stark vom Sicherheitskonzept ab. Bei Verfolgung des Prinzips des Einschlusses vorrangig auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren sind die Anforderungen an die Materialien dieser Barrieren wesentlich höher als bei dem Sicherheitskonzept des sicheren Einschlusses durch die Geologie (ewG-Prinzip). Das Barrierensystem wird dabei stets so ausgelegt, dass der sichere Einschluss bestmöglich über den Bewertungszeitraum gegeben ist.

5.2 Endlagerkonzepte in Schritt 1 der Phase I

Für die Ermittlung der Teilgebiete sind generische Endlagerkonzepte zugrunde gelegt worden, die sich an den verschiedenen Wirtsgesteinskonfigurationen orientieren. Dabei handelt es sich um folgende Konfigurationen:

- Steinsalz in stratiformer Lagerung
- Steinsalz in steiler Lagerung
- Tongestein
- Kristallingestein stellt den Einlagerungsbereich und den ewG

- Kristallingestein stellt den Einlagerungsbereich und der sichere Einschluss wird durch technische und geotechnische Barrieren gebildet
- Kristallingestein stellt den Einlagerungsbereich und der ewG wird durch Schichten gebildet, die das Kristallin überlagern

In Abhängigkeit zu der gewählten Wirtsgesteinskonfiguration wurden in Schritt 1 der Phase I unterschiedliche Endlagerkonzepte zugrunde gelegt. In den nachfolgenden Absätzen wird dies für die einzelnen Wirtsgesteinskonfigurationen erläutert.

Für Steinsalz in stratiformer Lagerung ist das Sicherheitskonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (siehe Kapitel 3.1) möglich (§ 23 Abs. 1 StandAG). Je nach ermittelter Mächtigkeit sowie Fläche der Konfigurationen ergeben sich die verschiedensten Möglichkeiten bei der Auswahl des Einlagerungskonzeptes. Bei genügend großer Mächtigkeit oder Fläche stehen sowohl die Streckenlagerung, als auch die vertikale oder horizontale Bohrlochlagerung zur Auswahl. Ein limitierender Faktor zur Einengung der Auswahl an verschiedenen Variationen scheint in Schritt 1 der Phase I nicht begründbar. Gleiches gilt auch für die Auswahl der möglichen Behälterwerkstoffe sowie der Materialien der Verschlussbauwerke. Zum jetzigen Zeitpunkt des Auswahlverfahrens sind noch zu viele Variablen vorhanden, als dass das Endlagerkonzept detaillierter ausgewiesen werden könnte.

Bei Steinsalz in steiler Lagerung gilt nahezu Gleiches wie bei Steinsalz in stratiformer Lagerung, auch hier beruht das Sicherheitskonzept auf dem ewG-Prinzip. Als Unterschied kann angeführt werden, dass ersteres in der Regel größere Mächtigkeiten aufweist, was Vorteile für die vertikale Bohrlochlagerung mit sich bringen könnte. Allerdings scheint zum jetzigen Zeitpunkt auch nichts gegen eine mehrsöhlige Einlagerung, d. h., dass der radioaktive Abfall über mehrere Einlagerungssohlen eingelagert wird, zu sprechen.

Im Tongestein gilt nahezu Gleiches wie für Steinsalz in stratiformer und steiler Lagerung. Auch hier basiert das Sicherheitskonzept auf dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Mächtigkeiten und Flächen der Gesteinsformationen variieren teilweise sehr stark, je nach Region in Deutschland. Diese Variation lässt unterschiedliche Möglichkeiten für die detaillierte Ausgestaltung des Endlagerkonzeptes zu.

Das Sicherheitskonzept nach dem ewG-Prinzip ist auch für das Kristallingestein denkbar, für den Fall, dass dieses den Einlagerungsbereich und den ewG stellt. Auch hier ist die Bandbreite möglicher Flächen sowie Mächtigkeiten sehr breit, sodass die unterschiedlichsten Ausgestaltungen denkbar sind.

Für den Fall, dass im Kristallingestein ein eigener einschlusswirksamer Gebirgsbereich nicht ausgewiesen werden kann, sind zwei weitere Fälle denkbar.

In dem ersten Fall stellt das Kristallin den Einlagerungsbereich und der sichere Einschluss wird durch technische und geotechnische Barrieren gebildet (§ 23 Abs. 1 StandAG) und das entsprechende Sicherheitskonzept ist geboten (siehe Kapitel 3.2). Als Behälterwerkstoffe sind hierfür nur Werkstoffe mit niedrigen Korrosionsraten

in den entsprechenden Umgebungsbedingungen zielführend. Die geotechnischen Barrieren müssen den Einschluss durch die technischen Barrieren unterstützen und entsprechend ausgewählt und dimensioniert werden. Die BGE geht derzeit davon aus, dass in einzelnen ausgewiesenen Teilgebieten nur dieses Sicherheitskonzept auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren zur Erfüllung des langzeitsicheren Einschlusses verwendet werden kann.

In dem zweiten Fall stellt das Kristallingestein den Einlagerungsbereich und der ewG wird durch Schichten gebildet, die das Kristallin überlagern. Hierbei wird das Endlager im Kristallingestein errichtet, der sichere Einschluss wird hingegen durch die darüber liegende Formation gewährleistet². Hier sind verschiedene Endlagerkonzepte denkbar, eine Einengung der Auswahl dieser Konzepte kann in Schritt 1 der Phase I noch nicht erfolgen.

Einige der angeführten Varianten von Endlagerkonzepten sind für unterschiedliche Wirtsgesteinskonfigurationen im Vorhaben RESUS beschrieben worden. Im Rahmen der durchzuführenden repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 StandAG werden diese Ergebnisse kritisch zu prüfen sein.

5.3 Endlagerkonzepte in Schritt 2 der Phase I

Für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in Schritt 2 der Phase I ist gemäß § 6 Abs. 4 und § 7 Abs. 6 EndISiUntV eine schematische Beschreibung des Endlagers ausreichend. Die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems ist zunächst überschlägig zu beschreiben. Zusätzlich kann angenommen werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren, unabhängig von dem Sicherheitskonzept, ihre Funktion grundsätzlich erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen scheint. In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind gemäß § 4 Abs. 4 EndISiAnfV darüber hinaus die Berechnungen der ausgetragenen Masse an Radionukliden durchzuführen, eine Dosisberechnung ist jedoch in den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen noch nicht erforderlich (§ 7 Abs. 6 EndISiUntV). Eine betriebliche Sicherheitsanalyse ist ebenfalls noch nicht durchzuführen. Dementsprechend genügen einfache, an das Teilgebiet angepasste Endlagerkonzepte für die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen. Dabei ist voraussichtlich eine kriterienbasierte Einengung aller jeweiligen möglichen Sicherheitskonzepte auf die vielversprechenden Varianten durchzuführen. Diese Endlagerkonzepte müssen alle regulatorischen Anforderungen, wie in Kapitel 4 aufgeführt, im Zusammenwirken mit den geologischen und räumlichen Randbedingungen erfüllen.

² Ein überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich ist nach den Vorgaben des StandAG grundsätzlich auch bei anderen Wirtsgesteinen als Kristallin zulässig. Entsprechende Konzepte werden derzeit nicht verfolgt, da im Fall von Steinsalz und Tongestein derzeit davon ausgegangen wird, dass das jeweilige Wirtsgestein als einschlusswirksamer Gebirgsbereich dient.

Die Konzepte können auf unterschiedliche Weise hergeleitet werden. Zum einen kann eine Auflistung und Beschreibung aller bestehenden Endlagerkonzepte im nationalen und internationalen Raum erarbeitet werden, die eine Überprüfung der einzelnen Endlagerkonzepte mit Blick auf die regulatorischen Vorgaben in Deutschland und auf die Übertragbarkeit der Konzepte auf das deutsche Verfahren erlauben. Über eine Anpassung der am besten geeigneten Konzepte könnten diese für das deutsche Verfahren entsprechend einbezogen werden. Zum anderen können ggf. neue Konzepte anhand der in Kapitel 5.1 beschriebenen Aspekte und der regulatorischen Anforderungen aus Kapitel 4 erarbeitet werden. Unabhängig von dem gewählten Vorgehen sind die aufgeführten Anforderungen auf Vollständigkeit zu überprüfen, um weitere Randbedingungen und wesentliche Einflüsse zu ergänzen und die zusätzlichen Faktoren in die Ausarbeitung mit einzubeziehen. Darüber hinaus werden Erkenntnisse und Hinweise weiterer nationaler und internationaler Institutionen (beispielsweise DAEF, OECD-NEA und EURAD) berücksichtigt.

5.4 Endlagerkonzepte ab Phase II

Für die weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen der Standortregionen im Rahmen von § 16 Abs. 1 StandAG und den umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen der Standorte im Rahmen von § 18 Abs. 1 StandAG reicht nach der Sicherheitsverordnung (BT-Drs. 19/19291) eine schematische Beschreibung nicht mehr aus. Auch eine Detaillierungsabstufung zwischen den weiterentwickelten und umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gibt es in der Sicherheitsverordnung nicht. Dadurch ergibt sich für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den Phasen II und III die Forderung nach einem höheren Detaillierungsgrad der Endlagerkonzepte.

Da die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen aufeinander aufbauen, sind auch die entsprechenden Endlagerkonzepte weiterzuentwickeln und zu detaillieren. Eine wesentliche Änderung eines bisher zugrunde gelegten Endlagerkonzeptes für die entsprechende Standortregion oder den entsprechenden Standorten wäre nach § 4 Abs. 3 EndlSiUntV zu begründen. Ein Beispiel für eine wesentliche Änderung wäre z. B. die Umplanung von einer Streckenlagerung zu einer Bohrlochlagerung, wenn dadurch eine besseren Langzeitsicherheit zu erwarten wäre.

6 Literatur

- AtG: Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 239 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- BGE (2020j): *Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BT-Drs. 18/11398: Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017
- BT-Drs. 19/19291: Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
- DBE TEC (2016): *Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle*. K-MAT 58. DBE Technology GmbH. Peine
- ESK (2019): *Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit, Stellungnahme der Entsorgungskommission*. Entsorgungskommission. Bonn
- K-Drs. 268: *Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Berlin, 5. Juli 2016
- King, F., Lilja, C., Pedersen, K., Pitkänen, P. & Vähänen, M. (2012): *An Update of the State-of-the-art Report on the Corrosion of Copper Under Expected Conditions in a Deep Geologic Repository*. Posiva 2011-01. Posiva Oy. Eurajoki, Finland
- Nagra (2011): *Vorschläge zur Platzierung der Standortareale für die Oberflächenanlage der geologischen Tiefenlager sowie zu deren Erschliessung - Genereller Bericht*. Technischer Bericht 11-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz
- Posiva Oy & SKB (2017): *Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository*. Posiva SKB Report 01. Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Eurajoki (Finland), Stockholm (Sweden)
- Raiko, H. (2005): *Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report*. Posiva 2005-02. VTT Processes. Olkiluoto, Finland
- Rojmar, J. (o. J.): *Courtesy of SKB*. [Webpage]: Posiva Oy,. Zugriff am: 18.09.2020. http://www.posiva.fi/files/533/KBS-3_en.jpg
- StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- StandAG 2013: Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553), außer Kraft getreten zum 16.05.2017 (BGBl. I S. 1105) und ersetzt durch das Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074)
- UVPG: Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2010 (BGBl. I S. 94), das zuletzt durch Artikel 117 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de