



STELLUNGNAHME der Entsorgungskommission

Stellungnahme zur Möglichkeit der Durchführung der Erkundung ohne Auffahrung eines Bergwerks im Standortauswahlverfahren

INHALTSVERZEICHNIS

	Kurzfassung	2
1	Ausgangslage und Beratungsauftrag	4
2	Prämissen	5
3	Beratungshergang	7
4	Ergebnisse der Anhörungen durch die AG ZEIT	8
5	Wirtsgesteinsspezifische und wirtsgesteinsunabhängige Aspekte	12
6	Beratungsergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	19
	a) Beratungsergebnisse	19
	b) Schlussfolgerungen und Empfehlungen	21
7	Literatur	24
	 Abkürzungsverzeichnis	 28
	Anhang 1 - Protokoll zur Anhörung der BGE durch die AG ZEIT	30
	Anhang 2 - Protokoll zur Anhörung der BGR durch die AG ZEIT	33
	Anhang 3 - Protokoll zur Anhörung der Nagra durch die AG ZEIT	36
	Anhang 4 - Protokoll zur Anhörung der ANDRA durch die AG ZEIT	39
	Anhang 5 - Protokoll zur Anhörung der SKB durch die AG ZEIT	43
	Anhang 6 - Protokoll zur Anhörung der SNL durch die AG ZEIT	45
	Anhang 7 - Protokoll zur Anhörung der NWMO durch die AG ZEIT	46
	Anhang 8 - Protokoll zur Anhörung der K+S AG durch die AG ZEIT	49
	Anhang 9 - Protokoll zur Anhörung der DEEP.KBB GmbH durch die AG ZEIT	51
	Anhang 10 - Protokoll zur Anhörung des Konsortiums BGR, BGE-Technology und GRS durch die AG ZEIT	54

Kurzfassung

Im Hinblick auf die Zeitplanung des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle hat das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) die Entsorgungskommission (ESK) am 17.04.2025 um eine Stellungnahme gebeten, „unter welchen naturwissenschaftlich-technischen Prämissen bei der Ermittlung des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit für das zu errichtende Endlager für hochradioaktive Abfälle eine Erkundung mittels Bergwerken erforderlich ist“, wobei „sowohl wirtsgesteinsunabhängige als auch wirtsgesteinsspezifische Aspekte“ zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist zu berücksichtigen, „dass der Nachweis der im Regelwerk spezifizierten Anforderungen an die Sicherheit des am auszuwählenden Standort zu errichtenden Endlagers auch bei der Erkundung ohne ein Bergwerk zu führen ist“.

Die Stellungnahme der ESK ist den Verfahrensprinzipien des Standortauswahlgesetzes (StandAG) verpflichtet. Insbesondere geht sie davon aus, dass der Standort mit der bestmöglichen Sicherheit das Ergebnis eines unter dem Leitgedanken der Sicherheit vergleichenden Auswahlverfahren ist, in dem auch Ungewissheiten und Verfahrensrisiken zu minimieren sind. Diese können u. a. von einer ungünstigen Bewertung der Charakterisierbarkeit der sicherheitsrelevanten Eigenschaften eines Standorts herrühren (Anlage 3 zu § 24 Abs. 3 StandAG) und sind im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu bewerten (§ 27 StandAG i. V. m. § 11 EndlSiUntV).

Die Stellungnahme der ESK basiert u. a. auf einer Reihe von Anhörungen in- und ausländischer Organisationen mit Erfahrung in der Erkundung tiefer geologischer Formationen. Die Anhörungen ergaben wichtige Erkenntnisse zur Bedeutung verschiedener Erkundungsmethoden. Kein der ESK bekanntes ausländisches Endlagerprogramm hat für seine Standortentscheidung eine Erkundung mittels eines Bergwerks benötigt bzw. plant eine solche Erkundung.

Die Entscheidung, ob im Standortauswahlverfahren ein Erkundungsbergwerk zur Charakterisierung des Wirtsgesteins an einem potenziellen Endlagerstandort erforderlich ist, hängt direkt mit dessen Charakterisierbarkeit zusammen. Standort- bzw. regionsspezifisch kann zwischen drei möglichen Fällen unterschieden werden:

1 Ein Erkundungsbergwerk ist zur hinreichenden Standortcharakterisierung nicht erforderlich.

Dies wird voraussichtlich für Standorte bzw. -regionen im Tongestein sowie für Kristallingestein mit einem Konzept vom Typ 2 (d. h. ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich, ewG) gelten. Ob dies auch auf Steinsalz zutrifft, ist standortspezifisch aufgrund der Ergebnisse von Erkundungen von über Tage zu prüfen.

Für Standorte im kristallinen Wirtsgestein mit einem Sicherheitskonzept vom Typ 2 schätzt die ESK jedoch ein, dass das Kriterium des sicheren Einschlusses gemäß § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV nach dem derzeitigen Stand der Technik nicht eingehalten werden kann.

2 Die Errichtung eines Erkundungsbergwerks ist für eine hinreichende Charakterisierung des Wirtsgesteins am potenziellen Endlagerstandort erforderlich.

Dies könnte z. B. für einige erfolgversprechende Standortregionen bzw. Standorte im Steinsalz zur Ausweisung hinreichend großer Homogenbereiche gelten, was ebenfalls aufgrund der Ergebnisse von Erkundungen von über Tage zu prüfen wäre. Voraussichtlich gibt es jedoch andere Standortregionen

bzw. Standorte im Steinsalz, die auch ohne Errichtung eines Bergwerks hinreichend charakterisiert werden können. Dies wäre mit Blick auf die Anwendung des Kriteriums zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (vgl. § 24 Abs. 3 i.V. m. Anlage 3 StandAG) als vorteilhaft zu werten.

3 Für die hinreichende Charakterisierung des Wirtsgesteins reicht ein Erkundungsbergwerk nicht aus.

Die ESK geht davon aus, dass ein Erkundungsbergwerk deutlich kleiner sein sollte als das spätere Endlagerbergwerk. Eine hinreichende Charakterisierung und Eignung des Wirtsgesteins am potenziellen Endlagerstandort lässt sich jedoch insbesondere infolge der Ungewissheiten bzgl. der Einschlusswirkung des Endlagersystems nur mittels einer Erkundung durch ein Bergwerk nachweisen, das genauso groß wie das Endlagerbergwerk sein müsste. Dies gilt für Sicherheitskonzepte im Kristallingestein vom Typ 1 (mit ewG). Vor Abschluss der Auffahrung dieses Bergwerks und der damit einhergehenden Erkundung bliebe ein signifikantes Risiko bestehen, dass sich der Standort als ungeeignet herausstellt.

Erkundungsbergwerke sind nach Wertung der durchgeführten Anhörungen und international verfügbarer Erfahrungen nach Auffassung der ESK für eine den Prinzipien des StandAG folgende Standortentscheidung im Allgemeinen nicht erforderlich. Die ESK empfiehlt daher, Erkundungsbergwerke nicht als obligatorischen Teil der Standortauswahl vorzuschreiben, vielmehr sollte situativ entschieden werden, ob sie in Einzelfällen benötigt werden oder nicht.

Die ESK schätzt darüber hinaus ein, dass die derzeitige Unterscheidung von über- und untertägiger Erkundung aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht nicht zwingend ist. Eine stufenweise Verfeinerung der Erkundung für die vergleichende Bewertung der betrachteten Standortregionen bzw. Standorte zur Identifizierung der besten potenziellen Endlagerstandorte kann sich für unterschiedliche Wirtsgesteinstypen auch unterschiedlich gestalten.

Aufgrund der Bedeutung von Untertagelabors für Forschung und Entwicklung zur Endlagerung (hoch)radioaktiver Abfälle empfiehlt die ESK, die laufenden Kooperationen in diesen fortzuführen, ggf. zu intensivieren und mit Blick auf die Standortauswahl ein diesbezügliches systematisches Programm zu entwickeln, das auch die Nutzung deutscher Bergwerke im Salz umfasst.

1 Ausgangslage und Beratungsauftrag

Nach § 1 Abs. 5 S. 2 StandAG wird die Festlegung des Standorts „mit der bestmöglichen Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen hochradioaktiver Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren“ für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle für das Jahr 2031 angestrebt. Dem gegenüber stehen Schätzungen der Vorhabenträgerin (Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH; BGE), die eine Verschiebung der Standortfestlegung um mehrere Jahrzehnte prognostizieren [1]. Eine vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) beauftragte Studie des Öko-Instituts e. V. führt unter „idealen Bedingungen“ auf die Jahreszahl 2074 [2].

Für das nachfolgende Genehmigungsverfahren, die Errichtung und Inbetriebnahme des Endlagers sowie der hierfür notwendigen Konditionierungsanlage und des Eingangslagers wurde eine Dauer von ca. 20 bis 35 Jahren abgeschätzt [3] [4]. Damit wäre mit einer Inbetriebnahme der Anlagen und dem Beginn der schrittweisen Leerung der Zwischenlager möglicherweise erst zu Beginn des nächsten Jahrhunderts zu rechnen. Wird für den Betrieb des Endlagers ein Zeitraum von weiteren 30 Jahren angenommen, könnte man unter den angeführten Bedingungen erst in den 2120er bis 2140er Jahren mit dem Verschluss des Endlagers beginnen. Verzögerungen durch Gerichtsverfahren oder durch etwaige Rücksprünge im Verfahren sind in diesen Schätzungen nicht berücksichtigt.

Eine Standortentscheidung, die um mehrere Jahrzehnte später als im StandAG vorgesehen erfolgt, hat zur Folge, dass der gesetzliche Auftrag zur Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen (§ 1 Abs. 2 S. 3 StandAG) trotz des wahrscheinlichen Vorhandenseins vieler potenziell sehr gut geeigneter Endlagerstandorte nicht verwirklicht werden kann. Die erforderliche Zwischenlagerung hochradioaktiver Abfälle würde sich auf weit über 100 Jahre verlängern und zu technischen, genehmigungsrechtlichen sowie gesellschaftlichen Verfahrensrisiken führen. Vor dem Hintergrund des im Raum stehenden Zeitbedarfs für das Standortauswahlverfahren hat die ESK ein Positionspapier [5] erstellt, das sich im Wesentlichen auf die erste Phase des Standortauswahlverfahrens bezieht. Angesichts der zu erwartenden langen Verfahrensdauer haben sowohl BASE als auch BGE Beschleunigungsvorschläge für die Phasen II und III des Standortauswahlverfahrens vorgelegt [6] [7].

Das Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) hat vor diesem Hintergrund die Entsorgungskommission (ESK) mit seinem Beratungsauftrag vom 17.04.2025 um eine Stellungnahme gebeten, „unter welchen naturwissenschaftlich-technischen Prämissen bei der Ermittlung des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit für das zu errichtende Endlager für hochradioaktive Abfälle eine Erkundung mittels Bergwerken erforderlich ist“, wobei „sowohl wirtsgesteinsunabhängige als auch wirtsgesteinsspezifische Aspekte“ zu berücksichtigen sind. Weiterhin ist zu berücksichtigen, „dass der Nachweis der im Regelwerk spezifizierten Anforderungen an die Sicherheit des am auszuwählenden Standort zu errichtenden Endlagers auch bei der Erkundung ohne ein Bergwerk zu führen ist“.

In der Beantwortung dieser Frage und im Ergebnis der Beratung (s. u.) ist die ESK den in § 1 Abs. 2 StandAG formulierten Prinzipien verpflichtet, insbesondere dem Ziel der Auswahl des sich im Verfahren herausstellenden Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit. In ihren Aussagen beschränkt sich die ESK auf technisch-wissenschaftliche Aspekte. Mögliche Anpassungen im Verfahren, die sich aus dieser Einschätzung ergeben, müssen aber ebenso die gesellschaftlichen und politischen Auswirkungen berücksichtigen.

2 Prämissen

Die Einschätzungen der ESK beruhen auf den in § 1 StandAG festgelegten Verfahrensprinzipien. Insbesondere darf es bei allen Vorschlägen zur Beschleunigung des Verfahrens keinen Kompromiss in Bezug auf Sicherheit, Wissenschaftlichkeit und Transparenz geben.

Die Stellungnahme der ESK ist der Grundnorm des Gesetzes verpflichtet, einen „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit für eine Anlage zur Endlagerung“ zu ermitteln: „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. Dazu gehört auch die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen“ (§ 1 Abs. 2 S. 2 StandAG).

Also bedeutet „bestmöglich“ das Ergebnis eines unter dem Leitgedanken der Sicherheit stattfindenden vergleichenden Auswahlprozesses. Dagegen geht es nicht um einen materiell möglicherweise irgendwo im Untergrund vorhandenen Standort, der möglicherweise nie identifiziert werden kann.

Die Verpflichtung, ein „selbsthinterfragendes und lernendes“ Verfahren durchzuführen (§ 1 StandAG) impliziert, dass Änderungen aufgrund von im deutschen Verfahren gewonnenen oder aus dem Ausland übertragenen Erfahrungen und aufgrund der Weiterentwicklung des Wissensstands nicht nur möglich, sondern zwingend sind [8]. Dies gilt auch für die Frage der Notwendigkeit der Erkundung von unter Tage mittels eines Erkundungsbergwerks: Die Erkundung des Standorts Gorleben basierte wesentlich auf einem solchen Bergwerk mit der Zielsetzung, möglichst genau und lokal Kenntnisse u. a. zum internen Aufbau des Salzstocks und zu felsmechanischen Verhältnissen zu erhalten. Zunächst war ein Erkundungsbergwerk mit einer horizontalen Ausdehnung vorgesehen, die der des geplanten späteren Endlagerbergwerks entspricht [9]. Tatsächlich wurde mit dem so genannten Erkundungsbereich 1 jedoch nur einer der vorgesehenen Einlagerungsbereiche überfahren. Mit fortschreitender Erkundung und Entwicklung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte setzte sich die Auffassung durch, dass sich auch mittels der Ergebnisse aus der Erkundung von über Tage und der aus dem Erkundungsbereich 1 sowie weiterer damals noch ausstehender umfassender geophysikalischer Untersuchungen eine Eignungsaussage ableiten ließe, die spätere Auffahrung des Endlagerbergwerks jedoch mit einer umfassenden Erkundung zur Charakterisierung des Internbaus des Salzstocks einhergehen müsse [10] [11] [12].

Die in Zusammenhang mit der Gorleben-Erkundung erzeugte Erwartungshaltung wirkte über Jahrzehnte fort: Im Abschlussbericht des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) ([13] S. 4) wird eine „untertägige Erkundung“ mindestens zweier Standorte vorgeschlagen, ohne dass dies näher begründet wird – der Begriff „Erkundungsbergwerk“ wird hierbei nicht verwendet. Auch werden keine Einzelheiten zu Zielen oder Methoden dieser „untertägigen Erkundungen“ genannt. Erkennbar ist jedoch, dass der AkEnd dem schrittweisen Vorgehen bei der Auswahl von „mindestens zwei“ Standorten für die untertägige Erkundung eine große Bedeutung im Hinblick auf Partizipationsprozesse (Erarbeitung und Ermittlung von „Beteiligungsbereitschaft“) zugemessen hat.

Das Standortauswahlgesetz in seiner Fassung von 2013 [14] sieht eine untertägige bzw. „vertiefte“ Erkundung vor, ebenfalls ohne nähere Begründung oder Ausführung, was darunter konkret zu verstehen ist. Die Endlagerkommission fordert im Glossar ihres Abschlussberichts ([3] S. 664) (und nur dort) die Errichtung eines Erkundungsbergwerks, um dort „geowissenschaftliche und geotechnische Untersuchungen“ durchzuführen. „Der Vergleich der Ergebnisse der untertägigen Erkundung soll zeigen, welcher Standort die bestmögliche Sicherheit für die dauerhafte Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gewährleistet.“ „Mithilfe der Erkundungsbergwerke werden weitere Daten und Erkenntnisse über die Standorte gewonnen.“ Eine Begründung der Notwendigkeit für Erkundungsbergwerke oder eine Spezifizierung der Art der Untersuchungen, Daten und Erkenntnisse finden sich nicht. In der aktuellen Fassung des Standortauswahlgesetzes von 2017 wird dann für die Phase III des Standortauswahlprozesses eine untertägige Erkundung ohne nähere Spezifizierung gefordert. In der Gesetzesbegründung [15] wird festgestellt, dass „Auffahrung, Betrieb und Offenhaltung von Erkundungsbergwerken [...] an jedem Endlagerstandort zur Sicherstellung seiner Eignung vorzunehmen sind.“

Die naturwissenschaftlich-technische Evidenz zur Notwendigkeit eines Erkundungsbergwerks im deutschen Standortauswahlprozess ist begrenzt. Es ist aber zu erkennen, dass die Ausweisung einer begrenzten Anzahl von Standorten (meist: „mindestens zwei“) für den engsten Kandidatenkreis für AkEnd, Endlagerkommission und Gesetzgeber eine besondere Bedeutung im Partizipationsprozess hatte. Dieser Sachverhalt liegt jenseits von Beratungsauftrag und Expertise der ESK, er sollte bei eventuellen Änderungen des Verfahrens berücksichtigt werden.

Auch wenn der Beratungsauftrag des BMUKN primär die Frage nach dem Erfordernis von Bergwerken für die Erkundung potenzieller Endlagerstandorte zum Inhalt hat, sind eine ganze Reihe von Aspekten des Standortauswahlverfahrens mit zu berücksichtigen. Diese umfassen die Prozesse der zweiten (§§ 16 und 17 StandAG) und dritten Phase (§§ 18 bis 20 StandAG) des Standortauswahlverfahrens, also den Weg von den für die übertägige Erkundung identifizierten Standortregionen zur Standortentscheidung. Darüber hinaus sind jedoch auch bereits die Erkundungsprogramme für die Standortregionen nach §§ 14 und 15 StandAG betroffen, da diese das weitere Vorgehen vorzeichnen. Nachfolgend werden ausschließlich diejenigen naturwissenschaftlich-technischen Sachverhalte betrachtet, die für diesen Weg unter Wahrung der Verfahrensprinzipien entscheidend sind. Für eine solche Standortentscheidung ist aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht Folgendes erforderlich:

- Die Auswahl von Standortregionen sowie die Ermittlung von Standorten innerhalb dieser Standortregionen muss unter Anwendung der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) nach §§ 22 bis 24 StandAG und der einschlägigen Anlagen 1 bis 11 sowie aufgrund vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach EndlSiUntV mit dem Ziel der schließlichen Ermittlung eines Standorts mit bestmöglicher Sicherheit für eine Million Jahre (§ 1 Abs. 2 S. 2 StandAG) erfolgen. Die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sollen diesen Prozess durch „die Bewertung inwieweit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle unter Ausnutzung der geologischen Standortgegebenheiten erwartet werden kann“ (§ 27 Abs. 1 S. 1 StandAG) einerseits direkt unterstützen, andererseits aber auch aufzeigen „welche Relevanz die einzelnen [geowissenschaftlichen] Abwägungskriterien [...] für die Beurteilung des jeweiligen Endlagersystems haben“ (§ 7 Abs. 4 EndlSiUntV).

- „Der Standortvorschlag muss erwarten lassen, dass die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden durch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers nach § 9b Abs. 1a des Atomgesetzes gewährleistet ist [...]“ (§ 19 StandAG). Daher ist mit den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen insbesondere „zu bewerten, inwiefern für den jeweiligen Untersuchungsraum in Verbindung mit dem ihm zugeordneten vorläufigen Sicherheitskonzept zu erwarten ist, dass die Anforderungen an den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung erfüllt werden können“ (§ 10 EndlSiUntV).

Zentral für die Beantwortung der im Beratungsauftrag gestellten Fragen ist daher das Potenzial der nach dem Stand der Technik verfügbaren Erkundungsmethoden (von der Erdoberfläche bzw. unter Nutzung von Erkundungsbergwerken), eine Bewertung nach den Kriterien der §§ 22 bis 24 StandAG zu ermöglichen sowie diejenigen geowissenschaftlichen Charakteristika zu ermitteln, die für das Funktionieren des jeweiligen Sicherheitskonzepts (§ 10 EndlSiAnfV, § 6 EndlSiUntV) entscheidend sind.

3 Beratungshergang

Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe ZEITBEDARF IM STANDORTAUSWAHLVERFAHREN (AG ZEIT) des ESK-Ausschusses ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) hat sich intensiv mit dem Beratungsauftrag des BMUKN befasst und diesbezüglich eine Reihe von Anhörungen deutscher und ausländischer Organisationen durchgeführt, deren Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die vorliegende Stellungnahme ausgewertet wurden. Die jeweils durch Mitglieder der AG ZEIT erstellten und mit den Angehörten abgestimmten Protokolle dieser Anhörungen sind als Anhänge zu dieser Stellungnahme beigefügt. Bei der Anhörung nicht deutschsprachiger Organisationen wurden die jeweiligen Protokolle in englischer Sprache erstellt.

Im Rahmen der ersten Anhörung waren am 15.05.2025 die BGE, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra), Schweiz, sowie die Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), Frankreich eingeladen.

Zur zweiten Anhörung am 04.06.2025 waren die Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (Svensk Kärnbränslehantering AB; SKB) sowie die in den USA ansässigen Sandia National Laboratories (SNL) und das United States Department of Energy (DOE) eingeladen.

Im Rahmen der dritten Anhörung am 12.06.2025 wurden die in Kanada ansässige Nuclear Waste Management Organization (NWMO) und im Rahmen der vierten Anhörung am 26.06.2025 die im Salzgestein tätigen Bergbauunternehmen K+S AG sowie DEEP.KBB GmbH eingeladen.

Die Anhörungen wurden mit der Vorstellung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im Zeitraum von 2005 bis 2025 zur Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten in Endlagersystemen durch die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH (GRS), die BGR sowie die BGE TECHNOLOGY GmbH (BGE TEC) am 16.07.2025 abgeschlossen.

Der Entwurf der Stellungnahme wurde in der 15. sowie 16. Sitzung der AG ZEIT am 09.10.2025 bzw. 17.10.2025 diskutiert und fertiggestellt. Der ESK-Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle hat den

Stellungnahmeentwurf in seiner 110. Sitzung am 29.10.2025 als Beschlussvorlage für die ESK verabschiedet. In ihrer 126. Sitzung am 04.12.2025 hat die ESK den Entwurf abschließend beraten und verabschiedet.

4 Ergebnisse der Anhörungen durch die AG ZEIT

Die BGE (Anhang 1) erläuterte, dass Ungewissheiten in der Datenqualität und -quantität zu Untersuchungsräumen im Gegensatz zur geologischen Komplexität und zur Charakterisierbarkeit von Wirtsgesteinseigenschaften für die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) nicht entscheidungsrelevant seien. Es sei jedoch zu prüfen, ob sie relevant für den abschließenden Vergleich nach Anwendung der geoWK zur Ermittlung der Standortregionen werden könnten. Die BGE äußerte die Erwartung, dass „gut charakterisierbare Gebiete, über die Sicherheitsaussagen mit hoher Zuverlässigkeit getroffen werden können, als Standortregionen ermittelt werden“.

Durch die BGE wurden die Rolle und der Wert von Untertagelabors (engl. Underground Research Laboratories, URL) im Allgemeinen hervorgehoben. Hingewiesen wurde beispielsweise auf Erkenntnisgewinne u. a. zum Prozessverständnis und zu generellen sicherheitskonzeptionellen Fragestellungen. Aus Sicht der BGE sollte ab Phase II des Standortauswahlverfahrens geprüft werden, ob weitere URLs für spezifische Fragestellungen erforderlich sind. Von einer Analyse der Möglichkeiten und Grenzen unterschiedlicher Erkundungsverfahren ausgehend und angesichts des hohen zeitlichen Aufwands für Erkundungsbergwerke hat die BGE den Vorschlag [6] gemacht, die Phasen II und III des Standortauswahlverfahrens zusammenzulegen (ohne zwingende Errichtung von Erkundungsbergwerken).

Auch die BGR (Anhang 2) schätzt den Wert von URLs sowie von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (FuE-Arbeiten) an Kavernenstandorten und Bergwerken im Steinsalz als sehr hoch ein, z. B. um die Machbarkeit eines Endlagers zu demonstrieren und für die Öffentlichkeit begreifbar zu machen. Die BGR wies darüber hinaus auf ihr virtuelles URL im Steinsalz (digitaler Zwilling) hin.

Zur Charakterisierung eines potenziellen Standorts stehen eine Reihe von Erkundungsmethoden zur Verfügung, die die BGR in der Geowissenschaftlichen Methodendatenbank GeM-DB¹ zusammengestellt hat. Für die Standortauswahl empfiehlt sie gestufte und adaptive Erkundungsprogramme, Standard-Arbeitsprozesse und eine Verschränkung der Erkundung mit den Sicherheitsuntersuchungen, jedoch nicht primär die Auffahrung von Erkundungsbergwerken.

Die BGR erläuterte die große Vielfalt der Geometrie von Steinsalzformationen (flache Lagerung, Kissen, Sattel, Salzstöcke). Auch für steilstehende Strukturen mit komplexem Internbau wären Erkundungsbergwerke für eine hinreichende Erkundung nicht in jedem Fall erforderlich. Insbesondere wurde auf das Potenzial einer strukturellen Erkundung mittels Bohrloch-Georadar hingewiesen, vgl. hierzu auch die BGR-Ergebnisse zur Charakterisierung des Internbaus steilstehender Steinsalzstrukturen [16]. Auch flach lagernde Formationen können geologisch komplex und sehr herausfordernd hinsichtlich ihrer Erkundung sein. Weiterhin wurde auf sicherheitstechnische Vorteile steilstehender Steinsalzformationen mit großer Mächtigkeit im Vergleich zu

¹

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Standortauswahl/Uebertaegige_Erkundungen/2022_12_31_methoden_DB_kurzbericht.html

flach lagernden hingewiesen, da sie einen hohen Schutz des ewG durch die große Mächtigkeit des ihn überlagernden Gesteinskörpers bieten. Ungewissheiten müssten standortspezifisch diskutiert werden und Entscheidungen demnach standortspezifisch, nicht wirtsgesteinstypspezifisch, erfolgen.

Bei Standorten mit kristallinem Wirtsgestein sieht die BGR hohe Ungewissheiten, z. B. zur Erkundbarkeit wasserführender Klüfte, die im Vergleich mit anderen potenziellen Standorten bzw. -regionen berücksichtigt werden müssen.

Die Nagra hat die Bedeutung der Erkundung sowohl von über Tage als auch der Untersuchungen mittels des URL Mont Terri eingeordnet (Anhang 3). Die Schweiz verfolgt eine ähnliche Strategie wie Deutschland bei der Standortauswahl („weiße Karte“ als Startpunkt und schrittweise kriterienbasierte Einengung gemäß dem Primat der Sicherheit). Bereits in der ersten Phase der Auswahl schieden Standorte mit Steinsalz und Kristallin aus dem Verfahren aus, weil sie entweder in tektonisch zergliederten Großregionen liegen (Salz und Anhydrit) oder wegen überlagernden Sedimenten nicht ausreichend erkundbar sind (Kristallin).

Die in der letzten Phase verbliebenen Standorte für die Tiefenlagerung hochradioaktiver Abfälle in Tongesteinen wurden von über Tage mit 2D- und 3D-Seismik sowie mit Hilfe von Kernbohrungen untersucht. Wichtige Aspekte für die Standortauswahl waren die Mächtigkeit der Tonschichten, ihre vertikale und laterale Homogenität, das Alter und die Zusammensetzung des Tiefengrundwassers sowie das untertägige Platzangebot. Das Platzangebot wird von regionalen Störungen begrenzt, die mit Hilfe von 3D-Seismik umgangen werden. Kleinere Störungen sind durch das Selbstabdichtungsvermögen von Tongesteinen mit Tongehalten von über 40 % nicht sicherheitsrelevant. Dies konnte mittels Tiefbohrungen bestätigt werden, bei denen dieser Aspekt gezielt untersucht wurde. Das im Wirtsgestein Opalinuston liegende URL Mont Terri spielte eine wichtige Rolle für das Verständnis von Tongesteinen und ihren Besonderheiten. Für den Standortvergleich spielten die Erkenntnisse aus dem URL Mont Terri keine Rolle.

Die flachliegenden Tongesteinsabfolgen der Nordschweiz konnten verlässlich und umfassend mit Bohrungen und Seismik erkundet werden. Für die Wahl des bestgeeigneten Tiefenlagerstandorts war eine Erkundung der infrage kommenden Gebiete von unter Tage nicht erforderlich [17]. Der Sicherheitsnachweis des gewählten Standorts [18] verlässt sich ebenfalls ausschließlich auf Daten aus der Erkundung von über Tage.

Die Standortauswahl und Sicherheitsbewertung für ein geologisches Tiefenlager in Frankreich (Anhang 4) stützt sich auf über drei Jahrzehnte systematischer Untersuchungen. Zentrale geologische Anforderungen an das Wirtsgestein (Granit, Tongestein, Steinsalz, Schiefer) sind langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse, geringe Durchlässigkeit und Rückhaltung der Radionuklide.

In Frankreich erfolgte zunächst eine Festlegung auf eine Standortregion im Tongestein, in der dann das URL Bure errichtet wurde. Die genaue Festlegung des Endlagerstandorts erfolgte in mehreren Stufen: zunächst Bohrungen und seismische Messungen zur großräumigen Erkundung einer einzigen, etwa 200 km² großen „zone de transposition“, anschließend Validierung und Detailuntersuchungen im URL. Dieses war entscheidend für die genaue Standortlokalisierung und die Entwicklung der Endlagerauslegung und der geotechnischen Barrieren.

Die Variabilität der geologischen Eigenschaften der Tongesteinsformation sowie die mit ihrer Beschreibung verbundenen Ungewissheiten wurden durch umfangreiche geomechanische, geochemische und hydrologische

Analysen sowie durch deterministische und probabilistische Sicherheitsanalysen berücksichtigt. Dabei zeigte sich eine hohe laterale Kontinuität des Tongesteins mit einer geringen und damit nicht sicherheitsrelevanten Variabilität. Die Entscheidungsfindung wurde zwischen 2005 und 2024 unter Einbindung wissenschaftlicher Expertise schrittweise von der regionalen bis zur standortspezifischen Ebene in mit den Aufsichtsbehörden abgestimmten öffentlichen Dossiers dokumentiert und durch internationale Peer-Reviews begleitet sowie mit Stakeholdern diskutiert.

Die schwedische Endlagerorganisation SKB (Anhang 5) entschied sich aufgrund der geologischen Gegebenheiten in Schweden frühzeitig für das Konzept KBS-3. Dies entspricht in der Terminologie der BGE dem Konzept eines „Endlagersystems vom Typ 2“, das bei kristallinem Wirtsgestein technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren für den sicheren Einschluss des radioaktiven Inventars vorsieht. Der auf Freiwilligkeit infrage kommender Standortregionen und -gemeinden basierende Standortauswahlprozess führte schließlich zu einem Vergleich zweier Standorte, Forsmark in der Gemeinde Östhammar und Laxemar in der Gemeinde Oskarshamn, nach primär sicherheitstechnischen sowie weiteren Gesichtspunkten (bspw. Umweltaspekte). Basis waren u. a. luftgestützte Untersuchungen und Erkundungen von über Tage (u. a. Seismik, Monitoring von tektonischen Bewegungen sowie Tiefenwasserströmung und -chemie) sowie mehrere hundert Meter tiefe (z. T. gekerkerte) Bohrungen auf der Basis umfangreicher Untersuchungsprogramme. Diese Untersuchungen wurden für das Erstellen von (die Standorte beschreibenden) Modellen („site descriptive models“, SDM) verwendet. SDM entsprechen den Geosynthesen der deutschen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und dienen als Grundlage für Sicherheitsanalysen. Parallel zu den Erkundungsprogrammen stand SKB in einem intensiven Austausch mit der örtlichen Bevölkerung. Forsmark wurde als der sicherheitstechnisch bessere Standort ausgewählt. SKB ist der Überzeugung, dass Erkundungen von über Tage in Verbindung mit den Ergebnissen des generischen URL Äspö² eine hinreichende Basis für die Standortentscheidung darstellen und schätzt die verbleibenden Ungewissheiten und die daraus resultierenden Risiken als vertretbar ein.

Sicherheitstechnisch hoch relevant sind die räumliche Verteilung von Klüften und die Strömungsbedingungen. Auch bei Anwendung entsprechender Strategien zur Vermeidung diesbezüglich ungünstiger Positionen für Einlagerungsbohrlöcher ist von einer gewissen (vertretbaren) Versagensrate der Behälter auszugehen, die im Rahmen des Sicherheitsnachweises berücksichtigt wird. Gleiches gilt für die angestrebte Vermeidung von Einlagerungspositionen mit dem Risiko einer Behälterschädigung durch Scherbewegungen entlang von Klüften. Es ist im Vergleich mit dem deutschen Verfahren zu beachten, dass man in der Sicherheitsbewertung in Schweden kein Einschlusskriterium analog zu § 4 Abs. 5 der EndlSiAnfV kennt.

Das in den USA ansässige SNL (Anhang 6) hob die Bedeutung der Erkundung von über Tage für die Standortauswahl für das Endlager „Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)“ in einer flach lagernden Steinsalzformation in New Mexico (USA) hervor. Die Auswahl des Endlagerstandorts wurde ohne Untersuchungen in einem Erkundungsbergwerk getroffen. Beim Auffahren und beim fortschreitenden Ausbau des Endlagers wurden und werden in bestimmten Räumen des Bergwerks Untersuchungen durchgeführt, um den Kenntnisstand zum Wirtsgestein zu validieren und detaillierte Kenntnisse zu standortspezifischen

² So genannte generische URLs werden in endlagerrelevanten geologischen Formationen, jedoch NICHT an Endlagerstandorten errichtet – die in den URLs gewonnen Erkenntnisse müssen daher auf Endlagerprojekte übertragen und die Übertragbarkeit wissenschaftlich begründet werden. Dagegen können standortspezifische URLs direkt an potenziellen Endlagerstandorten errichtet und ggf. später Teil des Endlagerbergwerks werden.

Eigenschaften der Steinsalzformation (z. B. Permeabilität) unter Endlagerbedingungen zu gewinnen. Diese Untersuchungen von unter Tage sind von Relevanz zum einen für den Genehmigungsprozess des Endlagers, der während der Betriebsphase kontinuierlich fortgeführt wird, und zum anderen für die Verbesserung des generischen Verständnisses von Steinsalz als Wirtsgestein, nicht jedoch für die Auswahl des Standorts an sich. SNL betonte, dass zur Standortauswahl ausschließlich Untersuchungen von über Tage dienen, d. h. geophysikalische Untersuchungen und Bohrungen ausgehend von der Landoberfläche, aus denen auf die Lage und Mächtigkeit des salinen Wirtsgesteins, seine mineralogische Zusammensetzung und die Zusammensetzung von Salzlösungen sowie an das Wirtsgestein angrenzende geologische Formationen mit ungesättigten Porenwässern und geologische Störungen und damit assoziierten Gesteinen geschlossen wurde.

Die kanadische NWMO (Anhang 7) erläuterte, dass der Standortauswahlprozess in Kanada auf Freiwilligkeit der infrage kommenden Standortregionen basierte. Er führte schließlich zu zwei potenziellen Standorten – einer in kristallinem Gestein, der andere in Sedimentgestein. Beide wurden mittels geophysikalischer Methoden aus der Luft sowie mittels seismischer Untersuchungen und z. T. gekernten Bohrungen sowie dem Monitoring von Grundwasser und seismischen Ereignissen untersucht und als sicherheitstechnisch geeignet bewertet. Die aus den verbleibenden Ungewissheiten resultierenden Risiken wurden von der NWMO als vertretbar eingestuft. Die Entscheidung für den Standort im kristallinen Gestein erfolgte mit Blick auf die Freiwilligkeit der Standortgemeinde. Am Standort soll später im Rahmen der Vorbereitung des Genehmigungsantrags ein standortspezifisches URL, eine sogenannte Underground Demonstration Facility (UDF), errichtet werden.

Die Exploration von Kali- und Steinsalzlagerstätten erfolgt bei der K+S AG (Anhang 8) sowohl von über Tage mittels Bohrungen und geophysikalischen Methoden, als auch von unter Tage durch Bohrungen und Radarmessungen. Allerdings sieht die K+S AG den Hauptschwerpunkt ihrer Projekte (Steinsalz- und Kalibergbau sowie Deponierung chemotoxischer Abfälle) eindeutig bei der Erkundung von unter Tage, weil die K+S AG eine Erweiterung bestehender Bergwerke aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt. In diesen Bestandsbergwerken ist es offenkundig einfacher, Detailwissen zur Lagerstätte durch Bohrungen und Georadar von unter Tage zu erlangen.

In Bezug auf den Kavernenbau sieht die DEEP.KBB GmbH (Anhang 9) keine Notwendigkeit eines Erkundungsbergwerks und erläuterte, dass sich diapirische Steinsalzlagerstätten mittels Tiefbohrungen von über Tage in Kombination mit dem sehr guten Kenntnisstand zu den relevanten Zechsteinsalzformationen in Deutschland sowie mit verschiedenen Methoden zur Beschreibung von stofflicher Beschaffenheit, Geometrie und Raumlage der Strukturelemente in der für den Kavernenbau erforderlichen räumlichen Auflösung sehr gut erkunden lassen.

Laut Anhörung des Konsortiums BGR, BGE TEC, GRS (Anhang 10) waren die zentralen Ziele der vorgestellten FuE-Vorhaben die Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten für Endlager in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein und die Entwicklung einer Methodik zur Ableitung der jeweiligen Sicherheitsnachweise. Es wurden generische Endlager betrachtet, die sich an die geologischen Gegebenheiten in Deutschland anlehnten.

Der Detaillierungsgrad der Kenntnisse und die Erfahrungen in Deutschland bzgl. einer Methodenentwicklung für Sicherheits- und Nachweiskonzepte nehmen in der Reihenfolge von Steinsalz (steil), Tongestein, Steinsalz (flach) zu Kristallingestein hin ab. In der Diskussion wurde angemerkt, dass ein Kluftnetzwerk im

Kristallingestein in der Phase II des durch das StandAG geregelten Standortauswahlverfahrens auch mit Bohrungen nur schlecht zu erkunden wäre. Grund hierfür sei, dass Bohrungen nicht helfen würden, einen ewG zu finden, sondern nur, ihn auszuschließen. Aber selbst nach Auffahrung eines Erkundungsbergwerks blieben die Risiken groß, da das Vorhandensein von sicherheitsrelevanten Klüften in einigem Abstand zum Erkundungsbergwerk nicht ausgeschlossen werden könne. Ein Erkundungsbergwerk in Steinsalz (steil) könnte hingegen letzte Ungewissheiten zum Internbau der Salzstöcke ausräumen, in Tongestein und Steinsalz (flach) seien Erkundungsbergwerke eventuell nicht erforderlich. Es werde aber auch für möglich gehalten, größere homogene Bereiche im steilstehenden Steinsalz mittels Bohrungen zu identifizieren. Auf der anderen Seite könne nicht festgestellt werden, dass Bohrungen im flachliegenden Steinsalz in allen Fällen ausreichen, um homogene Bereiche auszuweisen (z. B. bei Anwesenheit von Inhomogenitäten wie Tonbänken).

5 Wirtsgesteinsspezifische und wirtsgesteinsunabhängige Aspekte

Im StandAG werden als mögliche Wirtsgesteine für die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle „Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein“ genannt (§ 1 Abs. 3). In § 23 werden Mindestanforderungen formuliert, die sich in großen Teilen auf einen ewG beziehen. Für das kristalline Wirtsgestein ist „ein alternatives Konzept zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich möglich, das deutlich höhere Anforderungen an die Langzeitintegrität des Behälters stellt.“ Dieses soll „wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren“³ beruhen. Entsprechend wird in der EndlSiAnfV unterschieden, ob ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder technische und geotechnische Barrieren als für den Einschluss der Radionuklide „wesentliche Barrieren“ („Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht“, § 2 EndlSiAnfV) fungieren. Für beide Fälle werden Anforderungen an die Qualität des Einschlusses und an die Integrität und Robustheit der wesentlichen Barrieren gestellt (vgl. §§ 2 Nr. 5, 4 und 5 bzw. 6 EndlSiAnfV), wobei bei einem Konzept mit technischen und geotechnischen Barrieren als wesentlichen Barrieren gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV davon auszugehen ist, dass diese ihre Funktion grundsätzlich erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint. In der Terminologie der BGE wird ein Sicherheitskonzept im Kristallingestein ohne ewG als Kristallin Typ 2 bezeichnet (im Unterschied zu einem Kristallinkonzept vom Typ 1, das einen ewG vorsieht). In den im vorigen Kapitel beschriebenen Forschungsvorhaben zum Kristallingestein (Anhang 10) ist in den Fällen eines Kristallinkonzepts vom Typ 2 von „einschlusswirksamen Bereichen“ (ewB) die Rede, die Abfallgebinde, Behälter und Puffer (z. B. Bentonit) umfassen.

Nachfolgend werden für die einzelnen Wirtsgesteine und Sicherheitskonzepte jeweils die zentralen geologischen Eigenschaften sowie Möglichkeiten und Grenzen ihrer Erkundung und ggf. die Rolle von Erkundungsbergwerken in diesem Zusammenhang dargelegt und daraus entsprechende Schlussfolgerungen für den weiteren Standortauswahlprozess hergeleitet.

³ Die ESK versteht das im StandAG hierfür verwendete Wort „oder“ als „einschließendes oder“. So ist z. B. für das Funktionieren des schwedischen Konzepts KBS-3 vom Zusammenwirken von Behälter (Technik) und Bentonitbarriere (Geotechnik) entscheidend.

Konzepte mit einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Steinsalz (flache und steile Lagerung)

Sicherheitskonzepte im Steinsalz basieren auf der Barrierewirkung eines praktisch undurchlässigen Salzkörpers als Wirtsgestein. Strecken und Schächte werden mit Verschlussbauwerken verschlossen, aufgefahrene Hohlräume mit Salzgrus verfüllt. Aufgrund der durch das Fließen des Salzes unter Gebirgsdruck bedingten Hohlraumkonvergenz kompaktiert der Salzgrus, sodass er schließlich eine Barrierewirkung entfalten kann, die mit der des Wirtsgesteins vergleichbar ist. Damit kann ein sicherer Einschluss der Abfälle auch jenseits der Zeiträume erreicht werden, für die die Funktionalität der Verschlussbauwerke nachgewiesen werden kann. Deshalb kann ein ewG ausgewiesen werden. Hierfür entscheidend sind der innere Aufbau der Steinsalzformation und die Ausdehnung geeigneter Homogenbereiche mit allenfalls vernachlässigbaren Fluidvorkommen sowie die gebirgsmechanische Situation, insbesondere das Konvergenzverhalten. Salzaufstieg, Erosion und Subrosion dürfen nicht zu einem Verlust der Barrierewirkung im Bewertungszeitraum von einer Million Jahre führen.

Die durch die ESK durchgeführten Anhörungen ergaben wichtige Erkenntnisse sowohl zum Potenzial innovativer Erkundungsmethoden (z. B. Bohrloch-Georadar) als auch zur Geologie von Steinsalzformationen. U. a. wurde durch die ausführliche Erkundung des Salzstocks Gorleben eine Vielzahl neuer Erkenntnisse über den Internbau von Salzformationen des Zechsteins gewonnen, die heutzutage die Interpretation von Erkundungsdaten, die von über Tage gewonnen werden, deutlich erleichtern [11]. Die Aufteilung in flachlagernde und steilstehende Steinsalzformationen muss aufgrund der unterschiedlichen Komplexität aller Steinsalz-Formationstypen und vieler Zwischenformen (z. B. Sattel, Salzkissen) differenzierter betrachtet werden als im Positionspapier der ESK zu Phase I [5]. Dort wurde davon ausgegangen, dass für steilstehende Steinsalzformationen prinzipiell ein höherer Erkundungsaufwand besteht als für flachliegende Steinsalzformationen. In Bezug auf den inneren Aufbau, das Vorkommen geeigneter Homogenbereiche (s. o.) und deren Charakterisierbarkeit mittels unterschiedlicher Erkundungsmöglichkeiten sind standortspezifische Betrachtungen erforderlich: Die Anhörungen haben gezeigt, dass beispielsweise an bestimmten Standorten zentralhomogene Zonen steilstehender Steinsalzstrukturen, die infolge von Salzaufstieg und -tektonik entstehen können, höhere Mächtigkeiten und größere Volumina und damit einen positiven Einfluss auf die sicherheitsgerichtete Bewertung eines potenziellen ewGs im Vergleich zu flachlagernden Formationen aufweisen können.

Dass steilstehende Steinsalzformationen in vielen Fällen ohne Erkundungsbergwerk gut charakterisierbar sind, zeigen die zahlreichen erfolgreich erschlossenen und betriebenen Kavernenspeicher. Auch für diese Anwendung werden große, homogene Gesteinsbereiche benötigt. Die Standortuntersuchungen für Kavernenspeicher erfolgen nur von über Tage mittels Bohrungen und entsprechenden detaillierten Bohrkernanalysen sowie bohrlochgeophysikalischen und Bohrlochradarmessungen in homogenen Steinsalzbereichen (Anhang 9). Für die Anwendung auf die Standortauswahl muss jedoch standortspezifisch überprüft werden, ob eine Exploration ohne Erkundungsbergwerk als Entscheidungsgrundlage ausreichend ist.

Für die wirtschaftliche Nutzung von flachlagernden Steinsalzformationen bevorzugt z. B. die K+S AG (Anhang 8) in Bestandsbergwerken eine Erkundung von unter Tage mit Bohrungen und Georadar, während für den Kavernenbau Bohrungen von über Tage und geophysikalische Messungen sowie

Bohrlochradarmessungen ausreichen (Anhang 9). Auch beim Endlager WIPP in einer flachlagernden Steinsalzformation in New Mexico (USA) erfolgte die Standortauswahl durch Erkundung von über Tage ohne URL (Anhang 6). Fazieswechsel und strukturelle Überprägungen können auch bei flachlagernden Steinsalzvorkommen zu reduzierten Mächtigkeiten und Volumina führen. Auch hier gilt daher ebenso wie für steilstehende Steinsalzformationen, dass über die Notwendigkeit eines Erkundungsbergwerks im Standortauswahlverfahren standortspezifisch zu entscheiden ist.

Tongestein

Tongesteine werden für die geologische Tiefenlagerung in Betracht gezogen, weil sie sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und sehr gute Rückhalteeigenschaften für Radionuklide haben. Bei geeigneter mineralogischer Zusammensetzung der Tongesteine besteht das Potenzial zur Selbstheilung von Klüften aufgrund ihrer Quellfähigkeit. Insbesondere marin abgelagerte Tone können über Entfernungen von dutzenden Kilometern sehr gleichbleibende Eigenschaften haben. Es ist zu erwarten, dass die für die Erkundung vorgeschlagenen Standortregionen im Tongestein über lateral ausgedehnte, mächtige, homogene, subhorizontale Tongesteinpakete verfügen. Diese ausgeprägte Homogenität mariner Tongesteine erlaubt die Charakterisierung der für die Standortauswahl relevanten Eigenschaften (Lage und Ausdehnung geeigneter Formationen unter Berücksichtigung von Störungen sowie mineralogische, hydraulische, hydrogeochemische und felsmechanische Eigenschaften) mit vergleichsweise wenigen und einfachen Mitteln (Bohrungen und Seismik). Wegen der guten generellen Eignung von Tongesteinen und ihrer guten Charakterisierbarkeit kann ein ewG ausgewiesen werden, sodass sich die Sicherheitskonzepte von Endlagern in Tongesteinen umfänglich auf die Barrierewirkung dieser Gesteinsformation abstützen können. Die mechanischen Eigenschaften von Tongesteinen verlangen oft einen Ausbau mit großen Mengen von Beton.

Unter anderem Frankreich und die Schweiz haben Standorte für Endlager in Tongesteinsformationen erkundet und entwickeln entsprechende Endlagerkonzepte weiter. Die regionale Charakterisierung wurde jeweils mit 2D-Seismik und Bohrungen von über Tage durchgeführt. Später wurden jeweils 3D-Seismiken durchgeführt und weitere Bohrungen niedergebracht.

In der Schweiz war ein Vergleich von mehreren Standorten vor dem Standortvorschlag erforderlich. Hierbei flossen ausschließlich Daten aus Erkundungen von über Tage ein. Das URL Mont Terri, das sich nicht in einer Standortregion befindet, spielte für die Standortauswahl nur eine untergeordnete Rolle. Im Wesentlichen ist es ein Labor zur Entwicklung von Methoden zur Untersuchung von Skaleneffekten und zur Demonstration von Endlagertechnologien.

In Frankreich war das URL Bure ebenfalls nicht maßgebend für die Standortauswahl. Allerdings half es bei der genauen Festlegung des Standorts innerhalb der vorher bestimmten „zone de transposition“: Das URL wurde in einer vorab festgelegten Region errichtet. Die genaue Standortlokalisierung orientierte sich dann u. a. an der Übertragung der Erkenntnisse aus dem URL. Auch hier dient das URL im Wesentlichen zur Überprüfung und Weiterentwicklung von Konzepten und Technologien, um das Endlager zu realisieren.

Die grundsätzliche Eignung von Tongesteinen für die Endlagerung – sofern sie homogen und mächtig genug sind und ausreichend hohe Tongehalte haben – ist heutzutage unumstritten. Ihre einfache Erkundbarkeit von über Tage und der durch sehr langsame Diffusionsprozesse dominierte Transport von Radionukliden ermöglichen eine Charakterisierung aller für eine Standortentscheidung sowie den dafür erforderlichen

Sicherheitsnachweis relevanten Aspekte ohne ein Erkundungsbergwerk. Insbesondere erlaubt die gute Visualisierung von Störungen durch seismische Messungen und das Selbstabdichtungsvermögen von Tongesteinen, dass das Platzangebot für einen auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich von der Oberfläche aus gut erkundet werden kann. Dadurch können die Einlagerungsbereiche so platziert werden, dass die Wahrscheinlichkeit für advective Fließprozesse, die eine abweichende Entwicklung zu den eigentlich erwarteten diffusiven Fließprozessen darstellen würden, minimiert werden können.

Kristallin Typ 1

Das Sicherheitskonzept Kristallin Typ 1 sieht einen essenziellen Beitrag der Geologie zum Einschluss der Abfallstoffe über eine Million Jahre vor. Dafür muss der ewG, der das Lager umgibt, eine hinreichend geringe Gebirgsdurchlässigkeit über den geforderten Nachweiszeitraum aufweisen (§ 23 Abs. 5 StandAG). Die Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinen wird – bei sehr geringen Gesteinsdurchlässigkeiten – von der Anzahl, Durchlässigkeit und Verbundenheit der potenziell wasserführenden Klüfte kontrolliert. Für die Sicherheitsuntersuchung, die einer Standortauswahl zugrunde liegen muss, sind daher einerseits die verlässliche Charakterisierung der bestehenden, potenziell wasserführenden, Klüfte und andererseits die zuverlässige Prognose ihrer Entwicklung über den Nachweiszeitraum erforderlich.

Die Anhörungen haben gezeigt, dass es zwar durchaus möglich ist, in kristallinen Gesteinskörpern aus Bohrungen von über Tage statistische Angaben zur Verteilung von Klüften zu erheben. Jedoch können hydraulisch bedeutende Klüfte außerhalb der physisch erschlossenen Bereiche nicht hinreichend sicher ausgeschlossen werden. Im kristallinen Wirtsgestein gibt es keine Methode, die Gebirgsdurchlässigkeit und die räumliche Lage von Klüften und ihre für die Endlagerung relevanten Eigenschaften vor der Auffahrung in Erfahrung zu bringen. Dies bedeutet, dass ein Erkundungsbergwerk, das die geplanten Lagerbereiche nicht vollumfänglich auffährt, für die vollständige hydrogeologische Charakterisierung nicht ausreichend sein wird. Dies zeigt das Vorgehen der SKB, die für die Auswahl geeigneter Einlagerungsbereiche auf die Berücksichtigung der beim Auffahren von Strecken und Bohren von Einlagerungsbohrlöchern visuell erfassten Klüfte setzt.

Zwar sind Endlagerstandorte im kristallinen Wirtsgestein mit einem Sicherheitskonzept, das sich auf einen ewG abstützt, theoretisch vorstellbar. Aber weder die Erkundung von über Tage noch die Erkundung durch ein Bergwerk können die immanent schlechte Charakterisierbarkeit im Sinne von § 24 Abs. 3 und Anlage 3 StandAG überwinden.

Es lässt sich somit keine Strategie entwerfen, die es ermöglichen würde, ein mit anderen Wirtsgesteinsinformationen vergleichbares und belastbares Sicherheitskonzept, das mit den Anforderungen des StandAG konform wäre, für Kristallin Typ 1 zu entwickeln. Diese Aussage gilt auch bei intensiver Erkundung mittels Bergwerk, denn auch ein Erkundungsbergwerk wird deutlich kleiner sein als die Fläche des aufzufahrenden Endlagers. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Erkundungsbergwerk auf ein Endlager lässt sich wegen der großen Heterogenität von Kluftnetzwerken und ihrer Eigenschaften nicht gewährleisten.

Konzept ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Kristallin Typ 2

Gemäß § 23 StandAG ist – ausschließlich für kristallines Wirtsgestein – ein Sicherheitskonzept ohne ewG zulässig, das „wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren“ beruht (§ 23 Abs. 4). Spätestens mit der Begründung zum Standortvorschlag muss dann „der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können.“

Alle der ESK bekannten ausländischen Endlagerprojekte im Kristallingestein verwenden ein solches Konzept, da die jeweiligen Endlagerorganisationen wegen des Vorkommens von Klüften nicht davon ausgehen, dass eine hinreichende Barrierewirkung des Kristallingesteins selbst nachgewiesen werden kann. Das am weitesten entwickelte Konzept ist das in Schweden und Finnland verwendete Konzept KBS-3. Dieses nutzt Gusseisenbehälter mit einem fünf Zentimeter dicken Kupfermantel, die von einem Puffer aus Bentonit umgeben sind [19]. Andere Konzepte verwenden Ummantelungen aus rostfreiem Stahl (Tschechien) oder dünne Kupferbeschichtungen, die mittels Galvanisierung bzw. Kaltgasspritzen aufgebracht werden (Kanada). Allen Konzepten gemeinsam ist die Anforderung eines langzeitstabilen physischen Einschlusses durch die Behälter und damit der Integrität des Systems aus technischen und geotechnischen Barrieren. Damit ergibt sich als wichtigste Anforderung an die geologische Umgebung, insbesondere das Wirtsgestein, dass dieses die wesentlichen Barrieren (Behälter und der sie umgebende Bentonit) vor möglichen Schädigungen weitestgehend schützt. Solche Schädigungen können insbesondere aufgrund geomechanischer Einflüsse oder als Materialalteration (beispielsweise Korrosion) aufgrund ungünstiger hydrogeochemischer Verhältnisse (wie z. B. während Eiszeiten) erfolgen. Entscheidend für ein solches Schädigungspotenzial sind die Verteilung von Störungen und Klüften sowie das Potenzial für Kluftbildungen, da durch Kluftnetzwerke sowohl die mechanische Stabilität, als auch das potenzielle Angebot an Fluiden bestimmt werden. Weitere wichtige Eigenschaften sind das generelle Spannungsregime sowie das Strömungsverhalten und die chemische Zusammensetzung von Fluiden. Vor allem bei den zu erwartenden Eiszeiten können sich diese Eigenschaften wesentlich ändern. Kluftnetzwerke und hydrogeochemische Verhältnisse sind darüber hinaus auch entscheidend für eine mögliche Nuklidmigration, falls einzelne Behälter versagen. Die Erfahrung ausländischer Projekte zeigt, dass die Charakterisierung wichtiger Störungen, die statistische Beschreibung der Kluftnetzwerke sowie die hydrogeochemische Charakterisierung der in ihnen anzutreffenden Fluide gut mittels Erkundung von über Tage (d. h. ohne Erkundungsbergwerke) und der Übertragung von Erkenntnissen aus generischen URL möglich ist. Dagegen gelingt eine Detektion einzelner Klüfte nur direkt vor Ort unmittelbar während der Errichtung des Endlagers – selbst ein Erkundungsbergwerk ist hierfür nicht ausreichend. Im schwedischen Endlagerprojekt wurde eine Strategie zum Umgang mit während des Auffahrens des Endlagerbergwerks angetroffenen Klüften durch entsprechende Platzierung der Einlagerungsbohrlöcher und eine damit einhergehende Minimierung der Wahrscheinlichkeit einer Schädigung der Behälter durch Scherung entwickelt. Allerdings kann selbst mit dieser Strategie eine Schädigung der Behälter durch Scherung nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Generell schätzt die ESK aufgrund der Ergebnisse der Anhörungen ein, dass das Versagen einzelner Behälter in einem System Kristallin Typ 2 nicht ausgeschlossen werden kann. So werden in der Sicherheitsbewertung der SKB zwei Szenarien berücksichtigt, die zu einem solchen Ausfall führen können: die oben erwähnte Scherung sowie eine Erosion des Bentonitpuffers mit anschließender Lochfraßkorrosion der Kupferhülle des Behälters aufgrund ungünstiger hydrogeochemischer Verhältnisse. Statistisch gesehen wird ein solches

Versagen für jedes der beiden Szenarien für jeweils weniger als einen der 6.000 einzulagernden Behälter erwartet. Fehler, z. B. bei der Behälterherstellung oder Einbringung des Bentonitpuffers, wurden in der Analyse berücksichtigt [19]. In der schwedischen Sicherheitsbewertung führt der Risikobeitrag dieser Ausfälle nicht zu einer Verletzung von Grenzwerten. Für die im deutschen Verfahren durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gelten jedoch weitere Anforderungen: In diesen ist über den Nachweis der vernachlässigbaren Dosis hinaus auch der sichere Einschluss gemäß der quantitativen Kriterien des § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV (Freisetzung aus den wesentlichen Barrieren von jährlich maximal 10^{-9} und insgesamt maximal 10^{-4} sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide) nachzuweisen. Insbesondere diese Kriterien der EndlSiAnfV weisen auf signifikante Robustheitsnachteile eines Kristallin Typ 2 Systems gegenüber Endlagerkonzepten mit ewG hin, bei denen das Wirtsgestein die wesentliche Barrierefunktion auch bei Ausfall technischer und geotechnischer Barrieren übernimmt. Die Robustheit des Endlagersystems ist Gegenstand der umfassenden Bewertung gemäß § 10 EndlSiUntV.

Wirtsgesteinsunabhängige und wirtsgesteinsübergreifende Aspekte

Dem Beratungsauftrag des BMUKN folgend, werden nachfolgend wirtsgesteinsunabhängige Aspekte und darüber hinaus verfahrensrelevante wirtsgesteinsübergreifende Aspekte diskutiert.

Angesichts der Erfahrungen in- und ausländischer Endlagerprogramme und insbesondere der Ergebnisse der Anhörungen kommt die ESK zu dem Schluss, dass eine Überprüfung der im StandAG vorgegebenen Kriterien, die Durchführung vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen⁴ und sicherheitstechnische Vergleiche gut aufgrund der Ergebnisse von Erkundungen von über Tage – also ohne die Nutzung von Erkundungsbergwerken – möglich sind und dies in ausländischen Endlagerprogrammen gängige Praxis ist. Die Ergebnisse der Anhörungen zeigen, dass dies insbesondere für sicherheitstechnische Vergleiche von Standorten mit gleichem Wirtsgesteinstyp gilt. Zudem ist für die ESK nicht zu erkennen, wie Erkundungsbergwerke wirtsgesteinsübergreifende Vergleiche erleichtern sollten.

Die wirtsgesteins- bzw. konzeptspezifischen Aspekte zeigen, dass im Standortauswahlverfahren standort- bzw. regionsspezifisch zwischen drei möglichen Fällen unterschieden werden kann:

1 Ein Erkundungsbergwerk ist zur hinreichenden Standortcharakterisierung nicht erforderlich.

Dies wird voraussichtlich für Standorte bzw. -regionen im Tongestein sowie für Kristallingestein mit einem Konzept vom Typ 2 (d. h. ohne ewG) gelten. Ob dies auch auf Steinsalz zutrifft, ist standortspezifisch aufgrund der Ergebnisse von Erkundungen von über Tage zu prüfen.

⁴ Dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend werden in nationalen Endlagerprogrammen regelmäßig an Haltepunkten Sicherheitsanalysen bzw. „safety cases“ erstellt, die eine wichtige Grundlage für Entscheidungen zum weiteren Vorgehen (einschließlich von Standortauswahlprozessen) bilden. Geowissenschaftliche Grundlagen hierfür sind regelmäßig die Ergebnisse aus generischen URLs und von Standorterkundungen von über Tage. Lediglich im finnischen und im französischen Programm wurden die Ergebnisse eines standortspezifischen bzw. eines standortnahen URL genutzt. In beiden Fällen wurden jedoch die Entscheidungen für einen Standort bzw. eine Standortregion VOR der Errichtung dieser URL getroffen. Das schwedische bzw. das Schweizer Endlagerprogramm zeigen, dass die Erstellung von „safety cases“ in ähnlichen Wirtsgesteinen (Kristallingestein bzw. Tongestein) auch ohne die Nutzung standortspezifischer URLs gut möglich ist.

2 Die Errichtung eines Erkundungsbergwerks ist für eine hinreichende Charakterisierung des Wirtsgesteins am potenziellen Endlagerstandort erforderlich.

Dies könnte z. B. für einige erfolgversprechende Standortregionen bzw. Standorte im Steinsalz zur Ausweisung hinreichend großer Homogenbereiche gelten was ebenfalls aufgrund der Ergebnisse von Erkundungen von über Tage zu prüfen wäre. Voraussichtlich gibt es jedoch andere Standortregionen bzw. Standorte im Steinsalz, die auch ohne Errichtung eines Bergwerks hinreichend charakterisiert werden können. Dies wäre mit Blick auf die Anwendung des Kriteriums zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (vgl. § 24 Abs. 3 i.V. m. Anlage 3 StandAG) als vorteilhaft zu werten.

3 Für die hinreichende Charakterisierung des Wirtsgesteins reicht ein Erkundungsbergwerk nicht aus.

Die ESK geht davon aus, dass ein Erkundungsbergwerk deutlich kleiner sein sollte als das spätere Endlagerbergwerk. Eine hinreichende Charakterisierung und Eignung des Wirtsgesteins am potenziellen Endlagerstandort lässt sich jedoch insbesondere infolge der Ungewissheiten bzgl. der Einschlusswirkung des Endlagersystems nur mittels einer Erkundung durch ein Bergwerk nachweisen, das genauso groß wie das Endlagerbergwerk sein müsste. Dies gilt für Sicherheitskonzepte im Kristallingestein vom Typ 1 (mit ewG). Vor Abschluss der Auffahrung dieses Bergwerks und der damit einhergehenden Erkundung bliebe ein signifikantes Risiko bestehen, dass sich der Standort als ungeeignet herausstellt.

Es gibt einen wesentlichen Unterschied zwischen Fall 2 und Fall 3: Während im Fall 2 die geologische Situation in jedem Fall sicherheitstechnisch erfolgversprechend ist und sich vor allem die Frage der ausreichenden Ausdehnung der potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereiche stellt, ist im Fall 3 vor allem die hydrogeologische Situation ungewiss und es stellt sich die Frage, ob der Standort überhaupt als Endlager infrage kommen kann.

Generell gilt, dass eine gute Charakterisierbarkeit mit einer hohen Verlässlichkeit der Aussagen für eine sicherheitsgerichtete Standortauswahl einhergeht. Einfache Geometrien und einfach oder mindestens verlässlich zu bestimmende Eigenschaften, die lediglich eine geringe Variabilität aufweisen, führen in der Regel zu einer guten Charakterisierbarkeit. Bei guter Charakterisierbarkeit sind

- wenige Erkundungsmaßnahmen erforderlich, um große Gebiete zu charakterisieren (räumliche Übertragbarkeit),
- der Gesamtaufwand für eine ausreichende Erkundung vergleichsweise gering,
- nur etablierte Erkundungsmaßnahmen von über Tage erforderlich und
- sicherheitsrelevante Aussagen direkt aus den Messungen ableitbar (Unmittelbarkeit).

Eine gute Charakterisierbarkeit schafft früh im Verfahren eine verlässliche Datenbasis für einen sicherheitsgerichteten Vergleich verschiedener Standorte und verlässliche Bedingungen für den sicheren Bau und Betrieb des Endlagers. Der Abschlussbericht des AkEnd aus dem Jahr 2002 ([13] S. 99) setzt eine „gute räumliche Charakterisierbarkeit“ mit der „Forderung nach hoher Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung, großer Planungssicherheit für das Endlagerbergwerk und geringem Erkundungsaufwand“ gleich.

Nach Auffassung der ESK und in Einklang mit Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ist die gute, zuverlässige und möglichst einfache Charakterisierbarkeit eines potenziellen Standorts ein Vorteil in der Standortauswahl.

Eine schlechte Charakterisierbarkeit ist gemäß § 24 Abs. 3 StandAG ein klarer Nachteil einer Standortregion oder eines Standortes im Vergleich zu anderen besser charakterisierbaren Standortregionen oder Standorten. Dies ist nicht gleichzusetzen mit dem Fehlen der „für die Bewertung der Erfüllung einer Mindestanforderung notwendige[n] Daten für ein Gebiet“, die auch „erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können“ (§ 23 Abs. 3 S. 1 StandAG), da es sich bei einer schlechten Charakterisierbarkeit um eine intrinsische Eigenschaft einer Standortregion bzw. eines Standortes handelt und nicht um einen Parameter, der lediglich auf Grund (noch) nicht vorliegender Daten (noch) nicht hinreichend gut bestimmt werden kann⁵.

6 Beratungsergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

a) Beratungsergebnisse

Die ESK ist auf der Basis ihrer eigenen Expertise sowie aufgrund umfangreicher Anhörungen in- und ausländischer Organisationen zu folgenden Ergebnissen gekommen:

- Bergwerke oder andere untertägige Einrichtungen wie URLs sind essentiell zur Forschung und Entwicklung in Zusammenhang mit der Endlagerung (hoch)radioaktiver Abfälle. Sie dienen der Erforschung sicherheitsrelevanter Eigenschaften und Prozesse, der Erprobung von Technologien für Endlagererrichtung, -betrieb und -verschluss, der Aus- und Weiterbildung und der Kommunikation mit Interessierten. Sie sind Ort internationaler Zusammenarbeit, an der auch deutsche Organisationen wesentlich beteiligt sind.

So genannte generische URLs werden in endlagerrelevanten geologischen Formationen, jedoch NICHT an Endlagerstandorten errichtet – die in den URLs gewonnen Erkenntnisse müssen daher auf Endlagerprojekte übertragen und die Übertragbarkeit wissenschaftlich begründet werden. Dagegen können standortspezifische URLs direkt an potenziellen Endlagerstandorten errichtet und ggf. später Teil des Endlagerbergwerks werden [20] [21] [22].

Ein Erkundungsbergwerk im deutschen Verfahren wäre demnach ein standortspezifisches URL, das mit dem Ziel der Standortauswahl errichtet und betrieben wird.

- Kein der ESK bekanntes ausländisches Endlagerprogramm hat für seine Standortauswahl ein solches Erkundungsbergwerk benötigt. Die standortspezifischen URLs an den Standorten WIPP (USA, Steinsalz in flacher Lagerung) und ONKALO (Finnland, Kristallin Typ 2 [23]) wurden erst errichtet, nachdem die jeweilige Standortentscheidung getroffen worden war. Das am Standort Bure (Departements Meuse und Haute Marne in Frankreich) im Tongestein errichtete URL wurde in einer vorab festgelegten Region errichtet. Die genaue Standortlokalisierung orientierte sich dann u. a. an der Übertragung der Erkenntnisse aus dem URL. In China (Beishan) und Russland (Yeniseisky) wurden standortnahe (ähnlich wie in Frankreich) bzw. standortspezifische URL errichtet. Die vorläufigen Standortentscheidungen wurden jedoch ohne Rückgriff auf die Ergebnisse von Untersuchungen in den URL getroffen. Die URL dienen der besseren Charakterisierung der Wirtsformationen, dem

⁵ Siehe hierzu Wollenteit, Rechtsgutachten zum „vergleichenden Verfahren“ gemäß Standortauswahlgesetz, 26.06.2025, S. 16f

wissenschaftlichen Verständnis der dominierenden Prozesse und der Entwicklung von Endlager-technologie [24] [25] [26] [27].

- Alle der ESK bekannten Endlagerprogramme nutzen jedoch das aufzufahrende Endlagerbergwerk selbst zur eingehenden Erkundung. Dabei werden die Ziele verfolgt, die Eignung des Standorts zu bestätigen sowie die Endlagerauslegung weiterzuentwickeln und ggf. den geologischen Gegebenheiten anzupassen. Dies entspricht in der Terminologie der Endlagerkommission der „bergtechnischen Erschließung“ nach der Festlegung des Endlagerstandorts ([3] S. 245, 252).
- Im Vergleich zu Standortauswahlverfahren in anderen Ländern weist das deutsche Verfahren drei Besonderheiten auf:
 - 1 Im Gegensatz zu den fortgeschrittenen ausländischen Programmen werden die Optionen betrachtet, ein Endlager in steilstehenden Steinsalzformationen zu errichten oder im kristallinen Wirtsgestein einen ewG auszuweisen.
 - 2 Das vergleichende Auswahlverfahren verfolgt das explizite Ziel, den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit zu ermitteln.
 - 3 Das Regelwerk gibt eine Begrenzung des Massen- und Stoffmengenaustrags aus den wesentlichen Barrieren vor (vgl. § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV).

Sicherheitsgerichtete Standortvergleiche (Punkt 2, s. o.) wurden auch im schwedischen und im Schweizer Verfahren vorgenommen:

In Schweden musste aufgrund geologischer Gegebenheiten entschieden werden, mit einem Sicherheitskonzept Kristallin Typ 2 zu arbeiten. Am Ende eines auf Freiwilligkeit basierenden Auswahlprozesses wurde von zwei verbliebenen Standorten derjenige gewählt, der als sicherheitstechnisch überlegen eingeschätzt wurde. Die Entscheidung erfolgte aufgrund von Erkundungen von über Tage (Bohrungen, Geophysik), jedoch ohne Erkundungsbergwerke. Die so eingegangenen Verfahrensrisiken wurden von SKB als sehr gut vertretbar eingeschätzt.

Kristallinformationen schieden frühzeitig aus dem Schweizer Verfahren aus. Die Kristallinvorkommen in den Alpen wurden als Teil der komplex aufgebauten und in Hebung befindlichen tektonischen Großregion Alpen ausgeschlossen. Die Kristallinvorkommen in der Nordschweiz unter mesozoischer Bedeckung wurden wegen unzureichender Charakterisierbarkeit ausgeschlossen. Der nunmehr vorgeschlagene, im Tongestein gelegene Standort Nördlich Lägern wird von der Nagra, basierend auf Erkundungen von über Tage (Bohrung, Geophysik), als derjenige unter den zur Auswahl stehenden mit den besten sicherheitsrelevanten Eigenschaften eingeschätzt.

Für eine Endlagerung im Steinsalz ergibt sich die Schlussfolgerung, dass im Laufe des Verfahrens standortspezifisch entschieden werden muss, ob jeweils ein Erkundungsbergwerk erforderlich ist. Sofern dies der Fall ist, wäre dies ein schwer zu kompensierender Nachteil hinsichtlich der Charakterisierbarkeit (s. o.) im Vergleich zu anderen Standorten.

An vielen Orten in Deutschland sind weiträumige, flachlagernde und ausreichend mächtige Tongesteinformationen anzutreffen. Es ist zu erwarten, dass für die nach der Phase I des Standortauswahlverfahrens verbleibenden Tongesteinvorkommen keine Notwendigkeit für ein Erkundungsbergwerk besteht.

Die Erfahrungen insbesondere aus dem schwedischen und dem finnischen Endlagerprogramm zeigen, dass für ein Endlager im Kristallingestein vom Typ 2 geeignete Standorte ausgewählt und sicherheitstechnisch gut charakterisiert und verglichen werden können, ohne dass hierzu ein Erkundungsbergwerk notwendig wäre. Das sicherheitsrelevante Kluftnetzwerk kann mittels Erkundung von über Tage statistisch charakterisiert, jedoch nicht im Einzelnen kartiert werden. Dies könnte auch mit einem Erkundungsbergwerk nur gelingen, wenn dieses mit dem späteren Endlagerbergwerk praktisch identisch wäre. Für ein Sicherheitskonzept Kristallin Typ 1 besteht daher ein hohes Risiko, dass sich erst während der Auffahrung des Endlagerbergwerks zeigt, dass ein solches System nicht anforderungsgemäß umsetzbar ist.

Für ein den schwedischen und finnischen Endlagersystemen entsprechendes Sicherheitskonzept Kristallin Typ 2 sind die relativ unterbestimmten Kluftnetzwerke weniger sicherheitsrelevant, da hier die technischen und geotechnischen Barrieren die wesentlichen Barrieren sind, die den sicheren Einschluss der Radionuklide gemäß § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV gewährleisten müssen. Allerdings zeigen die Erfahrungen der nordischen Länder, dass nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik auch bei Behältern aus Kupfer über eine Million Jahre in wenigen Fällen ein Versagen nicht ausgeschlossen werden kann. Während dies für einen Sicherheitsnachweis nach dem schwedischen Regelwerk zulässig ist, würde das deutsche Kriterium des sicheren Einschlusses gemäß § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV verletzt werden. Insbesondere geht die ESK davon aus, dass die IRF (instant release fraction) des abgebrannten Kernbrennstoffs im Falle des Behälterversagens innerhalb eines Jahres freigesetzt werden wird und damit die Sicherheitsanforderungen an das Endlager für hochradioaktive Abfälle schon bei Versagen eines einzelnen Behälters nicht erfüllt werden würden.

b) Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die ESK kommt im Ergebnis der durchgeführten Anhörungen und der darauf aufbauenden naturwissenschaftlich-technischen Überlegungen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Erkundungsbergwerke sind im Allgemeinen für die Standortauswahl nicht erforderlich: Zur Gewährleistung einer Standortauswahl in einem vergleichenden und transparenten Verfahren, die den Anforderungen des StandAG im Hinblick auf die Identifizierung des Standorts mit der insgesamt bestmöglichen Sicherheit genügt sowie zur nachfolgenden Endlagerauslegung sind standortspezifische Erkundungsprogramme erforderlich. Diese vertiefen die ortsspezifischen Kenntnisse in Bezug auf Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geoWK (§§ 22 bis 24 StandAG) sowie zur Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen schrittweise. Die Erkundungsprogramme sollten auf Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen basieren und eine zeitlich-räumliche Komponente enthalten, d. h. sich mit fortschreitendem Erkenntnisgewinn von der Standortregion hin zum Standort fokussieren.
- Sofern im Verlauf des Verfahrens erkannt wird, dass für die hinreichende Erkundung im Rahmen der Standortauswahl zur vergleichenden Bewertung von Standortregionen bzw. Standorten ein Erkundungsbergwerk erforderlich ist, ist dies im Sinne der Anlage 3 StandAG (zu § 24 Abs. 3 StandAG

zur räumlichen Charakterisierbarkeit) als klarer Nachteil zu werten. Eine schlechte Charakterisierbarkeit und die damit einhergehenden Ungewissheiten, die im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG i. V. m. § 11 EndlSiUntV zu bewerten sind, resultieren in einem unsicheren Ausgang, ob überhaupt ein Standort gefunden werden kann, der den Anforderungen des StandAG genügt. Die damit einhergehenden Verfahrensrisiken (Ungewissheit des Ergebnisses, höherer Zeitbedarf) sind nur dann zu vertreten, wenn dieser evidente Nachteil durch eindeutig ausgewiesene Vorteile aufgewogen wird.

- Die ESK empfiehlt, Erkundungsbergwerke nicht als obligatorischen Teil der Standortauswahl vorzuschreiben, vielmehr sollte situativ entschieden werden, ob sie in Einzelfällen benötigt werden oder nicht: Die ESK geht davon aus, dass die geologische Situation in Deutschland genügend gut charakterisierbare Standortregionen bietet, die hinsichtlich anderer sicherheitstechnischer Aspekte mindestens gleichwertig sind und hinsichtlich ihrer Charakterisierbarkeit in fast allen Fällen bei der Auswahl vorzuziehen wären. Lediglich wenn dies wider Erwarten nicht der Fall sein sollte und falls ein verfahrensrelevanter Erkenntnisgewinn für eine unter anderen Gesichtspunkten sehr erfolgversprechende Standortregion durch Erkundungsbergwerke zu erwarten wäre, müsste auf diese zurückgegriffen werden. Letzteres wäre wohl allenfalls für bestimmte Steinsalzformationen zu erwarten. Mit Blick auf das kristalline Wirtsgestein wäre die Ausweisung einschlusswirksamer Gebirgsbereiche (Endlagersystem vom Typ 1) erst nach Auffahren aller Bereiche des Endlagerbergwerks möglich. Bis zu diesem Zeitpunkt bestünden signifikante Ungewissheiten bezüglich des tatsächlich anzutreffenden Kluftnetzwerks. Die ESK geht deshalb davon aus, dass es im Standortauswahlverfahren nicht möglich sein wird, einen Standort für ein Endlagersystem vom Typ 1 im Kristallingestein auszuweisen.
- Eine gute Charakterisierbarkeit erlaubt es, einen Standort allein auf der Basis einer Erkundung von über Tage hinreichend für eine Sicherheitsuntersuchung und vergleichende Bewertung zu charakterisieren und robuste Sicherheitsaussagen zu generieren, also mit der Möglichkeit, auf ein Erkundungsbergwerk zu verzichten. Ist für die räumliche Charakterisierung des Wirtsgesteins an einem potenziellen Endlagerstandort dagegen ein Erkundungsbergwerk erforderlich, so wäre dieser aus Sicht der ESK hinsichtlich der räumlichen Charakterisierbarkeit als „ungünstig“ zu bewerten (Anlage 3 zu § 24 Abs. 3 StandAG). Eine schlechte Charakterisierbarkeit und die damit einhergehenden Ungewissheiten, die im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 27 StandAG i. V. m. § 11 EndlSiUntV zu bewerten sind, resultieren in einem unsicheren Ausgang, ob überhaupt ein Standort gefunden werden kann, der den Anforderungen des StandAG genügt. Eine hinsichtlich der räumlichen Charakterisierbarkeit ungünstige Situation ist insbesondere bzgl. der sicherheitsrelevanten Eigenschaften für ein Endlagersystem vom Typ 1 im Kristallingestein zu erwarten. Für Endlagersysteme im Steinsalz ist eine diesbezügliche Einschätzung standortabhängig zu treffen.
- Mit Blick auf die oben empfohlene zeitlich-räumliche Komponente der Erkundungsprogramme schätzt die ESK darüber hinaus ein, dass die derzeitige Unterscheidung von über- und untertägiger Erkundung aus naturwissenschaftlich-technischer Sicht nicht zwingend ist. Eine stufenweise Verfeinerung der Erkundung für die vergleichende Bewertung der betrachteten Standortregionen bzw. Standorte zur Identifizierung der besten potenziellen Endlagerstandorte kann sich für unterschiedliche Wirtsgesteinstypen auch unterschiedlich gestalten.

- Aufgrund der Bedeutung von URL für Forschung und Entwicklung zur Endlagerung (hoch)radioaktiver Abfälle empfiehlt die ESK, die laufenden Kooperationen in diesen fortzuführen, ggf. zu intensivieren und mit Blick auf die Standortauswahl ein diesbezügliches systematisches Programm zu entwickeln, das auch die Nutzung deutscher Bergwerke im Salz umfasst.

7 Literatur

- [1] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE): Zeitliche Betrachtung des Standortauswahlverfahrens aus Sicht der BGE, Rahmenterminplanung für Schritt 2 der Phase I bis zum Vorschlag der Standortregionen und zeitliche Abschätzungen für Phase II und III, 16.12.2022

- [2] Öko-Institut e.V.: Unterstützung des BASE bei der Prozessanalyse des Standortauswahlverfahrens (PaSta), 07.08.2024

- [3] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht (BT-Drs. 18/9100), 05.07.2016
<https://dserver.bundestag.de/btd/18/091/1809100.pdf>

- [4] Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschätzung des Zeitbedarfs bis zur Inbetriebnahme des Endlagers (K-Drs./AG3-119), 03.04.2016
https://www.bundestag.de/resource/blob/417248/0c9ff031c240c724590e0e22d7330da1/drs_119.pdf

- [5] Positionspapier der Entsorgungskommission vom 24./25.10.2024:
Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle:
Beschleunigungspotenziale und strategische Vorgehensweise bei der Identifikation von Standortregionen (Phase I der Standortauswahl)

- [6] Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE): Diskussionsvorschlag zur zeitlichen Optimierung des Standortauswahlverfahrens - Vom Standortregionenvorschlag bis zur Standortfestlegung, 30.01.2025

- [7] Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE):
Beschleunigungspotenziale im Standortauswahlverfahren, März 2025

- [8] Berliner Wissenschafts-Verlag: Das „lernende“ Standortauswahlverfahren für ein Endlager radioaktiver Abfälle (https://library.oapen.org/bitstream/id/def277cb-226e-4135-bc8f-ddfc7d7ed0f8/external_content.pdf)

- [9] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standorterkundung Gorleben vom Mai 1983. Bericht ET-2/90: Salzgitter, April 1990

- [10] Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Peine, April 2008
<https://www.bge-technology.de/mediathek/forschungsberichte/>

- [11] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben (Description of the Gorleben site). Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Hannover, 2008
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Description_Gorleben_Part3_Geological-surface-underground-exploration-salt-formation_en.pdf?__blob=publicationFile&v=1

- [12] Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 2. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS – 276, Oktober 2011
<https://www.grs.de/de/aktuelles/publikationen/grs-276-vsg-sichtung-und-bewertung-der-standortdaten-gorleben-ap2>

- [13] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (Abschlussbericht), Dezember 2002
<https://www.bundestag.de/blob/281906/c1fb3860506631de51b9f1f689b7664c/empfehlung-akend-pdf-data.pdf>

- [14] Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 23. Juli 2013

- [15] Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398; S. 68
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; 07.03.2017

- [16] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Wirtsgesteinsanteilen mit Barrierefunktion und der Internbauvariabilität in Salzstrukturen (Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung) – Abschlussbericht, 12.03.2024

- [17] Nagra: Technischer Bericht NTB 24-17, Geosynthesis of Northern Switzerland

- [18] Nagra: Technischer Bericht NTB 24-10, Post-Closure Safety Report

- [19] Svensk Kärnbränslehantering AB: SKB TR-21-01, Post-closure safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, 2022

- [20] Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Committee: Going underground for testing, characterisation and demonstration, 2001
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_17646/going-underground-for-testing-characterisation-and-demonstration?details=true

- [21] Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Committee: Underground Research Laboratories (URLs) and geological disposal of radioactive waste, 2013
https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_50186/underground-research-laboratories-urls-and-geological-disposal-of-radioactive-waste?details=true

- [22] Nuclear Energy Agency, Radioactive Waste Management Committee: Radioactive Waste Management 2023: Sixth international conference on geological repositories (ICGR-6): Advancing geological repositories from concept to operation; Conference Synthesis; Helsinki, Finland 2022
https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2023-09/6c1_-7655_icgr_6.pdf

- [23] STUK-B 329: Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management, 8th Finnish National Report as referred to in Article 32 of the Convention; 2024
<https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-08/finland-national-report-8rm.pdf>

- [24] Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering: The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests; Volume 10, Issue 3, June 2018
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775518300246?via%3Dihub#sec1>
- [25] The People's Republic of China Sixth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; Prepared for the Eighth Review Meeting, Beijing, China, 2024
<https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-08/china-national-report-8rm.pdf>
- [26] Investigating the geological environment at the Yeniseisky site: Tasks for the current stage of the disposal project; 2019
<https://doi.org/10.25283/2587-9707-2019-2-76-91> (russisches Original)
<http://eng.radwaste-journal.ru/docs/journals/7/investigatingtheigeologicalienvironmentiatitheiyeniseiskyi site.pdf> (Übersetzung)
- [27] The Seventh National Report of the Russian Federation on compliance with the obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management; prepared for the Eighth Review Meeting of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Moscow 2024
https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-08/russian_federation-national-report-8rm-english.pdf

Abkürzungsverzeichnis

AG ZEIT: Ad-hoc-Arbeitsgruppe ZEITBEDARF IM STANDORTAUSWAHLVERFAHREN (AG ZEIT) des ESK-Ausschusses ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL)

AkEnd: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte

ANDRA: Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Frankreich

BASE: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung

BGE: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE-Tech: BGE TECHNOLOGY GmbH

BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

BMUKN: Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit

DOE: United States Department of Energy

EndlSiAnfV: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung)

EndlSiUntV: Verordnung über Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung)

ewB: einschlusswirksamer Bereich

ewG: einschlusswirksamer Gebirgsbereich

FuE: Forschung und Entwicklung

GeM-DB: Geowissenschaftliche Methodendatenbank

geoWK: geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

GRS: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH

HAA: hochaktive Abfälle

IRF: instant release fraction

Nagra: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Schweiz

NEA: Nuclear Energy Agency

NWMO: Nuclear Waste Management Organization, Kanada

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development

SDM: site descriptive model

SKB: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company

SNL: Sandia National Laboratories, USA

StandAG: Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz)

URL: Underground research laboratories

Anhang 1 - Protokoll zur Anhörung der BGE durch die AG ZEIT

Einleitung

Die BGE erläutert in ihrer Präsentation zunächst die Grundprinzipien und die Ziele der verschiedenen Erkundungsphasen des Standortauswahlverfahrens. Dabei geht sie auf die Datenverfügbarkeit, die daraus resultierenden Herausforderungen und die Strategie der BGE zum Umgang mit den Herausforderungen ein.

Untertagelabors bieten die Möglichkeit, die geo- und geotechnischen Eigenschaften von potenziellen Wirtsgesteinen direkt zu untersuchen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse, u. a. zum Prozessverständnis und zu generellen sicherheitskonzeptionellen Fragestellungen, können auf geologisch vergleichbare Gebiete mit guter Datenlage übertragen werden. Die BGE beteiligt sich an verschiedenen internationalen Projekten. Aus Sicht der BGE sollte ab Phase II des Standortauswahlverfahrens geprüft werden, ob weitere Untertagelabors für spezifische Fragestellungen erforderlich sind.

Ermittlung von Standortregionen

Die BGE erläutert die Vorgehensweise zur Ermittlung der Standortregionen. Die Einengung von Teilgebieten auf Standortregionen erfolgt in einem vergleichenden Verfahren im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU); dabei werden sicherheitsgerichtete Bewertungen auf Grundlage definierter Kriterien der Teilgebiete vorgenommen. Die bergtechnische Erschließung erfolgt erst nach der Festlegung des Standorts.

Anforderungen an die Langzeitsicherheit

Die BGE erläutert die übergeordneten Sicherheitsprinzipien und -anforderungen, die sich aus den Anforderungen des StandAG und den relevanten Verordnungen ableiten. Der sichere Einschluss wird durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen gewährleistet. Auf Basis des vorläufigen Sicherheitskonzepts hat die BGE rvSU-Kriterien entwickelt, die den vier Hauptgruppen bzw. Sicherheitsfunktionen zugeordnet sind:

- (1) Einschlusseigenschaften des Wirtsgesteins,
- (2) Langfristige Stabilität und Integrität (Erhalt der Barrierenwirkung),
- (3) Räumliche Charakterisierbarkeit und Zuverlässigkeit der Sicherheitsaussage und
- (4) Betriebssicherheit und technische Realisierbarkeit.

Jedes Teilgebiet wird anhand der rvSU-Kriterien in vier Prüfschritten (Kriterienkatalog) bewertet, wobei der Detaillierungsgrad in der Analyse, der Bearbeitung und der Bewertung mit den Prüfschritten zunimmt. Die Einengung der Gebiete erfolgt im Wesentlichen bereits in den Schritten 1 und 2. Für jedes Wirtsgestein kommt ein eigener (wirtsgesteinsspezifischer) Kriterienkatalog zur Anwendung. Ziel der Prozedur ist, Gebiete mit der besten Eignung (Gebiete der Kategorie A) zu identifizieren. Die BGE sieht vor, die auf diese Weise identifizierten Gebiete der Kategorie A nach erneuter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in einem wirtsgesteinsübergreifenden Vergleich zu bewerten.

Der methodische Ansatz zur zielgerichteten Einengung der Teilgebiete zu wenigen Standortregionen scheint nach aktuellem Kenntnisstand wirksam zu sein. Die BGE erwartet, dass aufgrund des methodischen Ansatzes gut charakterisierbare Gebiete als Standortregionen ermittelt werden, für die Sicherheitsaussagen mit hoher Zuverlässigkeit getroffen werden können.

Umgang mit Ungewissheiten

Die BGE führt aus, dass Ungewissheiten bezüglich der geologischen Komplexität/räumlichen Charakterisierbarkeit als bewertungsrelevant in den rvSU angesehen werden. Die Komplexität wird anhand mehrerer Kriterien bewertet. Die Ergebnisse der Bewertungen der Kriterien tragen maßgeblich zum Einengungsprozess bei. Die Fragestellung „Kann durch die Erkundungsmaßnahmen eine Ungewissheit reduziert und damit die Zuverlässigkeit der Aussagen erhöht werden?“ ist ebenfalls bewertungsrelevant; die entsprechende Bewertung erfolgt anhand von Kriterien zur geophysikalischen Charakterisierbarkeit. Die Ungewissheiten bezüglich Datenquantität und -qualität werden als nicht bewertungsrelevant angesehen. Die BGE prüft zurzeit, ob diese Einschätzung ggf. zu ändern ist, z. B. im Rahmen des abschließenden Vergleichs.

Erkundungsprogramme für die Standortregionen in Phase II

Die BGE erläutert ihre Überlegungen zur Vorgehensweise bei der Erstellung der Erkundungsprogramme für die Standortregionen. Hierzu wird u. a. angemerkt, dass die Methodik zur übertägigen Erkundung (Seismik, Potenzialverfahren, Bohrungen/Bohrlochuntersuchungen) von den ermittelten Erkundungsbedarfen abhängen wird. Stärken und Schwächen der verschiedenen Erkundungsmethoden werden anhand einer tabellarischen Zusammenstellung erläutert.

Diskussionsvorschlag der BGE zur zeitlichen Optimierung des Standortauswahlverfahrens

Frühere zeitliche Betrachtungen der BGE aus dem Jahr 2022 zu den Erkundungsvarianten „Untertägige Erkundung mittels Bergwerken“ (ein Bergwerk pro Standort) bzw. „Untertägige Erkundung mittels Bohrungen“ (vier und mehr Bohrungen pro Standort) haben ein Beschleunigungspotenzial in der Größenordnung von acht bis 16 Jahren für die bohrtechnische Erkundungsvariante aufgezeigt. Die BGE hat seither weitere Überlegungen zur Optimierung des Verfahrens unter Einbeziehung weiterer Risikofaktoren, die 2022 nicht berücksichtigt wurden, angestellt.

Aus Sicht der BGE wird eine vollständige Erkundung von Standorten aufgrund fehlender Nutzungs- und Betretungsrechte mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht möglich sein; zumindest werden sie zu massiven Verzögerungen führen. Die BGE sieht daher die Notwendigkeit einer gesetzlichen Regelung im Sinne einer Duldungspflicht, z. B. durch Anpassung des § 9f AtG in Anlehnung an die Regelung in § 44 EnWG, damit die Erkundungsmaßnahmen in Phase II umgesetzt werden können.

Weiterhin empfiehlt die BGE die Vorbereitung der Genehmigungsstrukturen für die Erkundungen in Phase II; z. B. könnte geprüft werden, ob die zentrale Koordination für die Zulassung übertägiger Erkundungsmaßnahmen auf eine Bundesbehörde übertragen werden kann. Die BGE betont, dass die Probleme bezüglich der Genehmigungsaspekte und der fehlenden Nutzungs- und Betretungsrechten dringend gelöst werden müssen, da hier erhebliche Verzögerungspotenziale bestehen.

Ein weiterer Vorschlag der BGE zur Optimierung des Standortauswahlverfahrens bezieht sich auf die gestufte Erkundung und ggf. Zusammenlegung der Phasen II und III des Verfahrens. Die BGE stellt dazu eine mögliche Vorgehensweise vor; diese sieht in der ersten Stufe orientierende Erkundungen – und nach Prüfung und Freigabe durch das BASE – in der zweiten Stufe Detailerkundungen vor, die bis zum Standortvorschlag sukzessive vertieft werden. Die BGE schätzt, dass unter der Voraussetzung von zukünftig geänderten günstigen Rahmenbedingungen der Standortvorschlag im Zeitraum von 2046 bis 2052 (abhängig von den zu untersuchenden Standortregionen: 6 bzw. 10) vorgelegt werden könnte. Nach derzeitigem Kenntnisstand geht die BGE davon aus, dass für den Standortvorschlag die Auffahrung von Bergwerken nicht erforderlich ist.

Diskussion

In der Diskussion hebt die BGE hervor, dass die räumliche Charakterisierbarkeit von Gebieten – samt der Möglichkeit Sicherheitsaussagen zu Einschlusseigenschaften und Integrität der Barriere zuverlässig vorherzusagen – voraussichtlich eines der wichtigsten Argumente für den wirtsgesteinsübergreifenden Vergleich sein wird.

In diesem Zusammenhang wird die Frage nach der Methodik des wirtsgesteinsübergreifenden Vergleichs aufgeworfen und wie die BGE die Vergleichbarkeit herstellen will, z. B. über eine entsprechende Auslegung der Erkundungsprogramme, um eine jeweils vergleichbare, verlässliche Datenbasis zu schaffen. Die BGE führt hierzu aus, dass sie sich aktuell mit Fragenstellungen zu den erforderlichen Sicherheitsaussagen in den verschiedenen Wirtsgesteinen und zur Erkundbarkeit der dafür relevanten Eigenschaften befasst. Dabei geht sie auch der Frage nach, ob und wie der Erkenntnisstand durch Erkundungsmaßnahmen verändert werden kann. Eine umfassende Methodik für den wirtsgesteinsübergreifenden Vergleich hat sie noch nicht entwickelt. Die BGE stellt auch fest, dass die Problematik hinsichtlich der Herstellung vergleichbarer Datengrundlagen nicht einfach durch die Herstellung vergleichbarer Datendichten gelöst werden kann.

Zur Frage von Bohrlocherkundungen führt die BGE aus, dass sie zurzeit die Potenziale der bohrtechnischen Erkundung eruiert. Konkrete Planungen dazu werden für 2027 bzw. nach Festlegung der Standortregionen anvisiert.

In der Diskussion zu den Nachteilen eines Erkundungsbergwerks am Endlagerstandort weist die BGE auf rechtliche Aspekte hin, d. h. die Option oder sogar Forderungen, Anlagen des Erkundungsbergwerks gemäß den Anforderungen des Atomrechts zu errichten und die daraus zu erwartenden zeitlichen Verzögerungen.

Abschließend werden in der Diskussion die Datenquantität und Datenqualität als Quelle für Ungewissheiten thematisiert. BGE führt dazu aus, dass sie beide Aspekte in den rvSU erfasst und in einer Weise mitführt, dass die jeweiligen Beiträge für jedes Gebiet dargestellt werden können. Die Datenquantität und -qualität fließen – neben der geologischen Komplexität – in die Bewertung des Parameters „Grad der Gewissheit“ ein. Dieser Parameter wird genutzt, um die Belastbarkeit der Datengrundlage mit Blick auf die getroffene Bewertungsentscheidung abzuschätzen. Dieser Parameter wird im Rahmen der rvSU nicht zur Bewertung von Gebieten verwendet.

Anhang 2 - Protokoll zur Anhörung der BGR durch die AG ZEIT

In der (dem Fragenkatalog der AG ZEIT in der Struktur folgenden) Präsentation wurden die Haupteigenschaften, Stärken und Grenzen einzelner Erkundungsmethoden (Fragen 7 und 8) tabellarisch dargestellt. Ggf. – etwa für Georadar – wurden auch die Unterschiede für die Anwendung von über bzw. unter Tage (inkl. Bohrlochradar) dargelegt. Insbesondere wurde auf die Herausforderungen der Erkundung steilstehender Salzstrukturen eingegangen. Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Methoden seien stark von der Komplexität der jeweiligen Struktur abhängig, Georadar sowie untertägige Aufschlusskartierungen seien für sehr komplexe Strukturen unverzichtbar. Jedoch seien auch flachliegende Salzformationen nicht in jedem Fall einfach strukturiert und ggf. sei die Charakterisierung entsprechend herausfordernd.

Insbesondere wurde auf die Zusammenstellung von Erkundungsmethoden in der Geowissenschaftlichen Methodendatenbank GEM-DB hingewiesen:

(https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Standortauswahl/Uebertaegige_Erkundungen/2022_12_31_methoden_DB_kurzbericht.html). Darüber hinaus wurden Perspektiven der Verknüpfung von der jeweils aktuellen Erkundungslage mit den laufenden Sicherheitsuntersuchungen mittels digitaler Zwillinge verwiesen.

Die Vertreter der BGR gaben auch eine Einschätzung zum Positionspapier der AG ZEIT vom 24.10.2024 ab. In vielen Punkten stimmten sie den Aussagen des Positionspapiers zu. Dies gilt insbesondere zu den Aussagen zu kristallinen Wirtsgesteinen (kein Selbstheilungsvermögen, keine Redundanz von Barrieren bei Endlagersystemen vom Typ 2, Herausforderung des Auffindens und der Erkundung von Standorten, die ein System vom Typ 1 ermöglichen). Auch bei einem Konzept vom Typ 1 mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen ergäben sich erhöhte Anforderungen an die geotechnischen Barrieren. Insgesamt sehen die Vertreter der BGR bei Standorten mit kristallinem Wirtsgestein hohe Ungewissheiten, die im Vergleich berücksichtigt werden müssen.

Die Erstellung einer wirtsgesteinsübergreifenden Rangfolge wie im Positionspapier vorgeschlagen wäre möglich, es stelle sich aber die Frage, wie gut diese dann mit Daten belegbar sei. Auch die BGR sähe die Notwendigkeit, wenige Standortregionen für die übertägige Erkundung vorzuschlagen (auch angesichts begrenzter Ressourcen für die Erkundung), Verfahrensrisiken und den notwendigen Erkundungsaufwand zu minimieren.

Die BGR-Vertreter verwiesen jedoch auf die Notwendigkeit, sowohl steilstehende als auch flach gelagerte Salzformationen sowie Zwischenformen differenzierter zu betrachten. Dies gälte zum einen wegen der unterschiedlichen Komplexität aller Salz-Formationstypen und der einhergehenden Implikationen für die Erkundung (s. o.). Darüber hinaus sollten aber auch vorteilhafte Eigenschaften wie etwa ein Sicherheitsgewinn durch große Mächtigkeiten nicht vernachlässigt werden. In diesem Zusammenhang wurde nochmals auf die Möglichkeiten einer Erkundung durch Bohrloch-Georadar hingewiesen, Erkundungsbergwerke seien auch für steilstehende Salzformationen nicht in jedem Fall notwendig. Insgesamt sollte eine ganzheitliche Beurteilung von Salzformationen erfolgen und die Berücksichtigung von zu komplexen Strukturen vermieden werden. In diesem Zusammenhang wurde auf die BGR-Ergebnisse zur Charakterisierung des Internbaus steilstehender Salzstrukturen verwiesen:

(https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Aktuelles/2024_06_21_bgr_studie_methodenentwicklung_bewertung_salzstrukturen.html).

Darüber hinaus wurde seitens der BGR darauf verwiesen, dass Steinsalz – unabhängig von seiner Lagerungsform – unter natürlichen Bedingungen dicht sei. Salzstrukturen können aufgrund erhöhter Mächtigkeiten oder größerer Volumina einen positiven Einfluss auf die sicherheitsgerichtete Bewertung von potenziellen ewG haben (im Sinne eines von der ESK genannten „Sicherheitsgewinns“). Insbesondere zentralhomogene Zonen steilstehender Salzstrukturen, wie sie infolge von Salzaufstieg und -tektonik entstehen, können gegenüber stratiform gelagerten Formationen potenziell vorteilhafter sein: Durch Mobilisation werden ursprünglich vorhandene ton- oder anhydritreiche Zwischenlagen im Verlauf des Diapirismus weitgehend zerfaltet/zerschert und aus dem Zentralbereich verdrängt. Das resultierende Halitgestein ist im Diapirkern oft weitgehend homogenisiert und weitgehend frei von durchgängigen Schichtgrenzen, wie sie in stratiformer Lagerung (z. B. Ton- oder Anhydritlagen) typisch sind. Dies kann zu einer Reduktion mechanischer und hydraulischer Anisotropien entlang von Schichtflächen bzw. potenziell flächenhaften Schwächezonen führen, was die geomechanische Stabilität und hydraulische Isolation im Hinblick auf Langzeitsicherheitsanforderungen positiv beeinflussen kann.

In der abschließenden Diskussion wurde grundsätzliches Einverständnis mit den derzeitigen Überlegungen von BGE und BASE zur Zusammenlegung der Phasen II und III des Standortauswahlverfahrens geäußert. Es wurde darauf hingewiesen, dass auch ein Verzicht auf die Erkundung mittels Bergwerken im Standortauswahlverfahren zunächst nicht zwangsläufig zu einer Verkürzung der Zwischenlagerzeiten führe, da die Notwendigkeit einer späteren bergtechnischen Erschließung bestehen bleibe. Ergänzend wurde darauf hingewiesen, dass sich der bautechnische und zeitliche Aufwand der bergtechnischen Erschließung je nach Wirtsgestein – etwa hinsichtlich Ausbau- oder Flächenbedarf – deutlich unterscheiden kann.

Auch in der Diskussion wurde noch einmal auf die Thematik der Erkundung von Salzformationen eingegangen. Es wurde auf die Möglichkeiten von Georadar von invasiven, auch abgelenkten, Bohrungen hingewiesen. Abhängig von der Komplexität der Struktur wäre die Herbeiführung von Entscheidungen im Verfahren aufgrund dieser Methoden (also ohne Erkundungsbergwerk) ggf. möglich – für eine Vielzahl von Salzstrukturen gälte dies allerdings nicht. Für das prinzipielle Potenzial steiler Salzformationen wurden norddeutsche Kavernenspeicher angeführt, die ohne untertägige Erkundung, allein auf Basis detaillierter Bohrkernanalysen und Georadar-Messungen in homogenen Steinsalzbereichen, sicher geplant und realisiert werden konnten. Ungewissheiten müssten standortspezifisch diskutiert werden und Entscheidungen also standortspezifisch, nicht Wirtsgesteinstyp-spezifisch, erfolgen. Insgesamt seien ein höherer Erkundungsaufwand gegen Vorteile wie z. B. Selbstheilung, geringerer Fußabdruck des Endlagers (und damit geringeres zu erkundendes Volumen) in einem sicherheitsgerichteten Vergleich abzuwägen. Insbesondere Salzkissen böten hier ggf. einen gangbaren Mittelweg.

Diskutiert wurde weiterhin die Frage der Verritzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Erkundungsmaßnahmen (durch intrusive Bohrungen oder – in größerem Umfang – durch ein Erkundungsbergwerk) und die Selbstheilung solcher Verritzungen, die insbesondere für Bohrungen im Steinsalz gewährleistet, dass die Verritzungen nicht sicherheitsrelevant sind. Daher erscheinen auch mehrere intrusive Bohrungen im Salz durchaus zielführend.

Zur Frage der Anzahl für eine Charakterisierung von steilstehenden Salzformationen wurde ausgeführt, dass im Falle des Salzstocks Gorleben-Rambow schon vier Tiefbohrungen wichtige Erkenntnisse zum Standort erbracht hätten. Im Falle von tonigen Gesteinsabfolgen wurde auf das Projekt SEPIA (Sequenzstratigraphie des Aalenium in Süddeutschland,

https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG-Stratigraphie/Projekte/Laufend/sepia_aalenium.html) verwiesen: Hier konnten aufgrund von drei gut platzierten Bohrungen – zwei davon am Beckenrand – und aufgrund von Vorkenntnissen homogene Tonbereiche gut ausgewiesen werden.

Zu den Möglichkeiten von Georadar wurde auf dessen besondere Stärken bei der Erkundung von Salzformationen hingewiesen. Im Tongestein funktioniert Georadar gar nicht, im kristallinen Wirtsgestein in eingeschränktem Maße (geringere Reichweiten).

Ein weiterer Diskussionsgegenstand war die Frage, ob hinreichend große Homogenbereiche im Steinsalz verlässlich von der Oberfläche aus gefunden werden können oder ob hier auch Glück im Spiel sei.

Seitens der BGR wurde empfohlen, die Strategie-Erfahrungen bei der Durchführung von Erkundungsmaßnahmen (Standard-Workflows) der Nagra zu nutzen, z. B. in Zusammenhang mit Isotopenbestimmungen.

Anhang 3 - Protokoll zur Anhörung der Nagra durch die AG ZEIT

Geologische Anforderungen für die Langzeitsicherheit:

Die Langzeitsicherheit des geplanten geologischen Tiefenlagers in der Nordschweiz beruht wesentlich auf der natürlichen Barrierewirkung des Wirtgesteins. Zentrale Kriterien sind eine hohe Homogenität, geringe hydraulische Durchlässigkeit, diffusionsdominierte Transportpfade und geochemische Stabilität. Wesentliche Eigenschaften des Standortes beinhalten subhorizontale Schichtung, geringe tektonische Überprägung, niedrige hydraulische Gradienten und die langfristige geologische Stabilität (z. B. Erosionsresistenz, Abstand zu Störungen, Selbstabdichtungspotenzial).

Methoden zur Standortcharakterisierung:

a) Oberflächenbasierte Untersuchungsmethoden

Zu den Hauptinformationsquellen zählen 3D-Seismik, Tiefbohrungen, quartäre Untersuchungen, Langzeitmonitoring, internationale Erfahrungen und Untertagelabors (URLs). 3D-Seismik liefert hochauflösende Informationen über die Struktur, Mächtigkeit und Fazies der Gesteinseinheiten im Untergrund. Ihre Grenzen liegen in der fehlenden direkten Messung physikalischer Eigenschaften und in der limitierten Auflösung (z. B. subseismische Störungen). Tiefbohrungen ermöglichen die direkte Ermittlung petrophysikalischer, geotechnischer und hydrogeologischer Parameter, sind jedoch nur punktuell (1D) und bei lateral heterogenen Bedingungen eingeschränkt aussagekräftig.

b) Rolle von URLs

Ein standortspezifisches URL wurde im Rahmen der Standortwahl nicht für erforderlich gehalten. Stattdessen diente das generische Felslabor Mont Terri als Referenz. Es lieferte Erkenntnisse zur Methodenentwicklung, zum Prozessverständnis, zur Technologiedemonstration sowie zur Akzeptanzförderung. Die dort erarbeiteten Konzepte müssen am gewählten Standort durch Bohrungen von der Oberfläche und zu einem späteren Zeitpunkt durch ergänzende untertägige Untersuchungen bestätigt werden.

Vorgehen bei der Standortwahl:

Das Standortauswahlverfahren umfasste:

- 1 Analyse bestehender Daten → Eingrenzung geeigneter Regionen und Wirtsgesteine.
- 2 Drittdatenanalyse und 2D-Seismik → Auswahl von Opalinuston als Wirtsgestein; Reduktion auf drei Regionen.
- 3 Planung und Durchführung von 3D-Seismik → Identifikation von störungsarmen Zonen und Fazieswechseln.

4 Tiefbohrungen → Validierung der Eigenschaften des Rückhaltebereichs; Entscheidung über weitere Bohrungen je nach Erkenntnislage.

Beispiel: In der Region Jura Ost führten 2D-Daten zur Definition des Untersuchungsgebiets. Die 3D-Seismik ermöglichte eine gezielte Bohrplanung. Die ersten Bohrungen lieferten ausreichende Daten zur Bewertung, wodurch weitere Bohrungen eingespart werden konnten.

Umgang mit Variabilität und Unsicherheiten:

Der Opalinuston zeigt durch seine Ablagerungsgeschichte eine geringe laterale und vertikale Variabilität, verbunden mit hohem Tonmineralgehalt und Selbstabdichtungspotenzial. Dies minimiert die Bedeutung subseismischer Störungen als bevorzugte Transportpfade. Die verbleibende Unsicherheit wird mittels Transportmodellen bewertet, um deren Relevanz für die Sicherheit zu prüfen.

Empfehlungen für ein effizientes Standortauswahlverfahren:

- Klare Definition der Ziele und sicherheitsrelevanten Parameter.
- Fokus auf entscheidungsrelevante Daten.
- Flexibilität durch Beantragung mehrerer Bohrstellen.
- Schnelle Auswertung der Schlüsselparameter zur zeitnahen Entscheidungsfindung.
- Initialer Einsatz mehrerer Bohrgeräte, spätere Reduktion zur Datennachführung.
- Transparente Kommunikation mit den Aufsichtsbehörden.

Diskussion:

Frage: Sie verstehen Tiefbohrungen als obertägige Erkundungsmethode? Antwort: Ja.

Frage: War die 2D-Seismik für die Festlegung der Bohrstandorte ausreichend?

Antwort: Ja, das war ausreichend für die ersten Bohrstandorte, allerdings haben wir aufgrund der Entwicklung der Datenlage (3D-Seismik, erste Tiefbohrungen) dann in einzelnen Standortgebieten weitere Bohrgesuche eingegeben.

Frage: War Mont Terri für die Festlegung des Standorts unbedingt notwendig. Antwort: Mont Terri war für den Standortentscheid nicht besonders relevant. Es spielt eine Rolle für die Entwicklung von technischen Lösungen und Methoden. Relevant waren auch internationale Erkenntnisse und die Erkenntnisse, die aus der Analyse von bestehenden Bohrungen gewonnen wurden.

Frage: Haben Sie ein Kriterium zum Massenausstrag für Radionuklide bei der Standortwahl verwendet?

Antwort: Nein, solch eine Anforderung gab es nicht. Es wurde jedoch mittels Dosisberechnungen gezeigt, dass alle drei Standortgebiete die Anforderungen an die maximal zulässige Individualdosis erfüllen.

Frage: Die Eigenschaften der Gesteine bzgl. Transport sind etwa gleich. Ist es richtig, dass am Ende die Gesamt-Mächtigkeiten der Tonformationen die wesentliche Rolle gespielt haben? Antwort: Ja, die Mächtigkeit spielte für den Standortvergleich eine wichtige Rolle. Bei dem Vergleich der Mächtigkeiten wurden die Rahmengesteine mitberücksichtigt.

Frage: Aus der Vergangenheit ist mir großer Aufwand in der Schweiz für die Berechnung der ^{14}C Dosis bekannt. ^{14}C spielt doch kaum eine Rolle, oder? Antwort: ^{14}C ist nach 50.000 Jahren zerfallen, aber bereits in den ersten 20.000 Jahren steigt der Gasdruck an. Daher betrachten wir, ob ^{14}C in der Gasphase ggf. über die Zugänge oder in alternativen Fällen über Störungen einen relevanten Dosisbeitrag bringen kann. Das ist aber nicht der Fall.

Frage: Würden Sie sagen, dass die Schweiz genügend Daten im Feld gesammelt hat? Wer hat in der Schweiz entschieden, wann die Exploration nach der Sammlung einer genügenden Menge von Daten eingestellt werden kann? Antwort: Den ersten Teil der Frage wird die Aufsicht bei der Begutachtung entscheiden. Während der Exploration haben wir als Schweizer Implementer die Datenlage eng verfolgt und jeweils überlegt, ob unsere zentralen Argumente für Sicherheit und Standortwahl ausreichend gestützt werden können. Darauf basierend haben wir entschieden, wann wir nicht mehr weiter bohren.

Anhang 4 - Protokoll zur Anhörung der ANDRA durch die AG ZEIT

ANDRA responded to all our questions with a detailed presentation. The presentation has been communicated before with the direction of ANDRA.

- 1 Which geological features of a site are crucial in order to make your safety concept work? Why? Are there any (qualitative or quantitative) criteria for evaluating these features?

Answer:

There are very few quantitative criteria for host rock defined in the basic safety rules RFS III.2.f.; Rock considered are granite, clay, shales and salt. In post-closure, the individual effective doses must not exceed 0.25 mSv/y. Post-closure safety functions need to be assured: confinement and isolation, prevent water circulation in disposal facility.

Derived criteria (BSR 1991/Guide 2008) for geology in site selection are stability formulated as demonstration for 1st 10000 yr and effects of natural events acceptable in safety perspective, low permeability and low hydraulic head (no quantitative criteria) for host rock, minimum depth of host rock > 200 m to limit erosion effects (due to glaciation) + “trivial” human intrusion and earthquake impacts, need to investigate mechanical, thermal and geochemical properties.

Specific to clay: need to localize/describe heterogeneities and discontinuities, description of local surface hydrology.

For all formations: need to develop a local and regional hydrological plan, relation between aquifers, geometry and hydrodynamics of discontinuities that may interconnect stratigraphic levels.

- 2 Which site investigation methods did or do you apply to investigate the above-mentioned features?

Answer:

From surface in five successive main drilling campaigns (40 boreholes, incl. 4 directional in clay host rock and surrounding formations) + 4 successive 2D/3D seismic campaigns for basic feasibility in 2005 then precise site location in 2009/2010. By URL in later stage of program, reinforced mainly, once the larger site region (transposition zone, ca. 250 km²) “ZT” was defined in Dossier 2005 to support the basic feasibility demonstration, site selection is finished in France since 15 yr with the precise location of DGR (ZIRA, ca. 30 km²) in 2009/2010.

- 2.i What are their strengths, what are their limitations (especially in view of the features and criteria mentioned above)?

Answer:

Drilling (in situ measurements and core sample measurements, in particular on well conserved (liquid N₂,...) host clay core samples) + 2D/3D seismic campaigns coupled with 3D modelling of geological media, in particular clay host rock: depth, thickness, faults, micro-fissures, and slope of formations, geology,

stratigraphy, hydrogeology (regional and local hydrogeological plan with characteristics of aquifers and their relations, hydraulic properties), mineralogic variability of clay host rock, geomechanics, geothermal potential, diffusion (HTO, Anions), porosity (for anions and cations and neutrals), permeability, gas transport, geochemistry (retention radionuclides, gradients of natural tracers (Cl) of clay host rock, in situ stress field, high res. 3D seismic at URL location then at localisation of underground facility of DGR (ZIRA).

URL: complementary to methods from surface. in-situ analysis (real conditions) to validate host rock characteristics, DGR effect on host rock (chemically, thermal + mechanical damaged zones), very important for the development of DGR concept and barrier design.

2ii What is the relative importance for site selection of investigation methods from above ground like drilling and geophysical methods compared to detailed characterization by a site-specific URL?

Answer:

scale effects, verify and consolidate information obtained from surface in a step by step approach
the large zone (transposition zone, ZT) of 200 km² was mainly selected from above ground (comment: correspond in Germany mainly to "Standortregion"),

URL very important for localisation of DGR within the transposition zone of 200 km² (BG: correspond in Germany to site location inside selected Standortregion after final decision of selection).

close interaction between from surface-methods/URL

handshake, verification and consolidation of observations, demonstration, technology development.

participation in international URL projects

very important.

3 Please describe briefly the siting decisions you undertook or will undertake in your programme in relation to the site characterisation information available for informing these decisions.

Answer:

All results of site characterisation are made available over 3 decades in large public large documents for the French nuclear safety authority and for public dialogue/consultation in 2013 and 2021, international peer review (NEA...) in 2003, 2011 and 2018, the basic feasibility demonstration (dossier in 2005), the dossier sustaining the choice of the DGR location in 2009, the safety option report in 2016 (to prepare the submission of the licensing application for construction), the request for declaration of public utility in 2020 and the licencing application for construction in 2022.

From 1991 until 2005-2006 key information came mainly from above ground (including info from oil industry) coupled with 1st observations in URL, thereafter, the localisation of DGR inside the transposition zone was mainly supported by URL coupled with a 3D seismic on the ZIRA and a new drilling campaign at scale of ZT.

- 4 What is the position and experience of your organisation about the use of site-specific URLs (i. e. mined facilities to investigate the features of a candidate site for disposal from underground)? For which (if any) programme or siting decisions are they needed? Why?

Answer:

The URL was hardly available (just build but relevant 1st observations to verify and consolidate the results obtained from surface investigations) for defining the transposition zone (ZT) in 2005.

For detailed localisation of DGR thereafter and development of repository architecture and technology (drifts, seals, disposal cells, EDZ characteristics, until full scale...) the URL provided a significant support.

- 5 How did you address spatial variability, heterogeneity and resulting uncertainties?

Answer:

Spatial variability and heterogeneity, more particularly for the host rock, have been systematically studied, as well as their consequences on the confinement properties at all scales, considering, moreover, the uncertainties of all kinds on these properties to support safety assessment, concept design and acquisition/investigation program.

The investigation studies showed a great lateral continuity of the clay host rock, a lateral variation of its depth and thickness and a vertical variability of its mineralogy. However, this vertical mineralogical variability did not reveal significant effects on the confinement properties (permeability, diffusion, retention) due to a still significant clay content. Only mainly mechanical and thermal properties are affected.

Throughout the siting process, Performance Assessment/Safety Assessment studies (incl. deterministic and probabilistic sensitivity analysis) were carried out, from early stage to guide the acquisition/investigation program, to the basic feasibility demonstration of a DGR then to the choice of the DGR location (site).

- 6 Do you have any particular recommendations to ensure an efficient, expeditious but also thorough site selection and characterisation?

Answer:

To rely on the huge knowledge data base acquired on a technical level (strategy, methods, equipment, modelling, relevant/key parameters) since more than 30 years, in safety perspective.

To develop a step-by-step process, from large scale (regional, sector or ZT) to scale of site (ZIRA).

To develop a close dialogue with regulator to support the program of investigation and characterisation, and the definition of criteria for site selection, in safety perspective.

To strongly involve the scientific community, in order to guarantee the excellence of the scientific knowledge acquired during the investigations.

To develop an open dialogue with local stakeholders (but also at national level), throughout the siting process from early stage to final site selection, not only in the context of the safety demonstration but also to take into consideration other criteria in the choice of the site (socio-economic, environmental, transport...).

Anhang 5 - Protokoll zur Anhörung der SKB durch die AG ZEIT

It was presented SKB's site selection, investigation and characterisation approach. In the following, only issues of particular importance for ESK's work and information given orally.

From the very beginning of SKB's siting process for a SNF repository, granitic rock has been the only realistic candidate for hosting such a repository. The KBS-3 concept (copper canister with cast iron insert surrounded by a bentonite buffer) was developed early in the process and underwent only minor modifications later on. In the near future, some further modifications especially concerning the cast iron insert might occur. The whole site selection process took place on the basis that a site suitable for this particular concept was to be identified; the criteria were developed accordingly (cf. in particular SKB's Technical Report TR-00-12) and based on safety assessments for this concept.

Given that most parts of Sweden in principle appeared suitable (cf. the areas identified in the regional studies in the 1990ies) and that the willingness of a municipality to host a repository is a decisive factor when selecting a site, an approach based on voluntariness was taken. The feasibility studies of eight voluntary municipalities did not involve any drilling. SKB argued that the geoscientific and other premises for further siting studies were good in all but one of the municipalities. In the end, five of the remaining municipalities withdrew from the process due to insufficient local support. For two of them a local referendum was the basis for doing so. Apparently, the already existing nuclear industry in the Östhammar and Oskarshamn municipalities was a factor which fostered the willingness to remain in the process and for being in favour of hosting a repository (nuclear power plants in both municipalities, SFR LILW repository in Östhammar, CLAB SNF storage in Oskarshamn).

While Östhammar with the Forsmark site finally has been selected on the basis that it is more appropriate in terms of safety and technical feasibility, it is noteworthy that this selection was based on holistic argumentation but not on a prescribed "algorithm" for coming to such a conclusion.

With respect to the Swedish licensing process, it is important that it has to be carried out for two facilities (repository and encapsulation plant, the latter to be built as an extension of the CLAB storage in Oskarshamn), and that two areas of law (nuclear and environmental) are applicable. Also, in contrast to the nuclear authority SSM (which will be involved in the whole process) the Land and Environment Court was involved only in the first licensing step. This might explain that the Court was more insistent in addressing a couple of issues concerning the canister integrity (2018-2019) in this first step, while SSM took the position that such issues could be sufficiently addressed later in the process.

The favourable features of a site are closely and directly related to the safety functions of the KBS-3 concept as addressed in the safety assessments (cf. SKB's Technical Report TR-21-01).

SKB abstained from making a site-specific URL part of their concept and process, since the existing Äspö URL is seen as representative for granitic rock in Sweden and since corresponding data from the selected Forsmark site will be obtained during excavation of the repository. The small-scale features, particularly the location and dimensions of smaller fractures, which are important for the repository layout and especially for the location of emplacement boreholes, can only be identified during repository construction and will be accounted for by allowing for flexibility when determining emplacement locations. Based on the data from

the surface-based site investigations, the site modelling and the safety assessment of the Forsmark site, the confidence in key safety-relevant site features was assessed as high and the risk of encountering severe safety detrimental features during excavation was deemed small and acceptable.

In the discussion ensuing the presentation, the following points were made:

When discussing the German confinement criterion (§ 4 Abs. 5 EndlSiAnfV, https://www.gesetze-im-internet.de/endlsianfv/_4.html) it was stressed that SKB also uses complementary safety indicators in their assessments, in accordance with regulations issued by SSM. Which alternative indicators to apply is however not prescribed.

The difference between “initial” and “complete” site investigations is mostly quantitative, the “complete” investigations are based on more drillings than the “initial” ones.

Despite working in a similar host rock and using the same technical concept as SKB, Finland’s POSIVA is working with a site-specific URL (ONKALO). With respect to these issues, it is noteworthy that Finland’s siting decision (choosing the Olkiluoto site for SNF disposal) had been taken before ONKALO’s construction had even begun. The decision and licensing process are different from the one in Sweden. Moreover, the time for construction of the repository in Finland was reduced through the co-location with the ONKALO facility. Also, opposition and objections to the repository project in Finland appears to have been less of an issue compared to the situation in Sweden.

In SKB’s assessments, calculated doses were dominated by canisters in emplacement boreholes with high flow rates. This is due to two reasons: (i) higher flow rates enhance bentonite erosion and ensuing canister failure by corrosion, and (ii) if this happens, the transport resistance through the rock to the surface experienced by released radionuclides decreases with increasing flow rate.

Despite the fact that SKB did not work with a site-specific URLs, the knowledge gained from generic URLs in crystalline rock (Stripa, Äspö, Grimsel) was essential for the programme. In terms of the THMC processes crucial for safety, granites have much in common, but nevertheless care is required when transferring particular results from site to site. This applies also when comparing the Fennoscandian shield with granites elsewhere: Features like hydrogeochemistry, flow behaviour, rock stresses or temperature will differ quantitatively, but the conceptual understanding will be similar.

The geological models for the two sites considered by SKB emerged early in the process and remained rather stable throughout the site investigations.

An important feature at Forsmark with respect to homogeneity is the existence of a tectonic lens of about 1 km x 1 km in which the repository can be placed. For a (hypothetical) bigger inventory, one may need to consider going beyond the boundaries of this lens which would require a more thorough update of the site descriptive model used as the basis for the assessments of site suitability and post-closure safety.

Forsmark is among the best sites SKB had seen in Sweden. This was indicated at an early stage of the site investigation and was confirmed as the site investigations proceeded.

Anhang 6 - Protokoll zur Anhörung der SNL durch die AG ZEIT

In the online hearing SNL presented the principal geologic features and safety functions of rock salt as a host rock for final disposal of radioactive waste in relation to how these can be examined with regard to site selection for a deep geological repository. The concepts and findings presented on the disposal in rock salt generally referred to repository in a bedded salt formation and served in particular to demonstrate the safety of the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in a Permian bedded rock salt formation in New Mexico, USA. Much of the knowledge gained on principal geologic features and safety functions can also be applied to salt domes and other steep salt formations.

The generic post-closure safety strategy derived for bedded rock salt formations is largely based on the properties of rock salt that are advantageous for the isolation of radioactive waste. Due to the geologic features of rock salt, such as very low content of free water (e.g. as intergranular fluid inclusions, disseminated clay, hydrous minerals) in a rock salt formation, the relatively low porosity as well as the low permeability of undisturbed rock salt, the sealed shafts of a repository are considered as only pathways for contaminated fluids to the biosphere. In this context, it should be mentioned that the concept for a shaft seal foresees a multi-barrier system consisting of various sealing materials.

Building on this, SNL explained which geologic features are critical to watch for during site characterization: (a) layering of rock salt formation; (b) geologic discontinuities such as breccia pipes or faults; (c) mineralogical composition and brine content of rock salt; (d) adjacent rock formations bearing water with lower salinity than salt brines; (e) human subsurface activities, e.g. related to mining, oil or natural gas production. These features can be evaluated from the land surface using geophysical investigations, such as seismic measurements, and geophysical, hydrological, mineralogical, and geochemical investigations of drill cores from deep exploratory boreholes. Studies from underground in a research laboratory are not necessary for site selection. Yet, they play an important role in testing near-field properties, such as extent and evolution of an Excavation Damaged Zone in a repository, static formation pressure and the continuity of geologic features in a 1 to 100 meters scale.

SNL pointed out that the site selection for the WIPP was based solely on findings from land surface investigations and that no underground research laboratory had been established in the region of interest prior to the site selection. However, during the licensing process for WIPP, experimental investigations are being carried out in certain rooms of the mine (e. g., “Room Q”) to verify the state of knowledge about the near-field properties of the host rock and to gain detailed knowledge about the properties of the specific rock salt under realistic repository conditions.

At the end of the discussion, SNL pointed out that research results from various underground research laboratories in rock salt or from WIPP investigation rooms are very helpful in improving our generic knowledge regarding rock salt as a host rock. However, an underground research laboratory in the selection area is not necessary for site selection.

Anhang 7 - Protokoll zur Anhörung der NWMO durch die AG ZEIT

NWMO's site selection, investigation and characterisation approach for a Spent Nuclear Fuel (SNF) repository in Canada was presented. In the following, only issues of particular importance for ESK's work and information given orally either during the presentation or in the ensuing discussion, but not explicitly provided in the presentation slides attached to these hearing minutes, are addressed.

The basis of Canada's SNF management strategy is the decision to dispose of the SNF in a Deep Geologic Repository (DGR), the site of which should be chosen in a community which is well informed and willing to host the facility. Consequently, the starting point of the site selection was eliciting indications of interest from communities. In principle, all communities in Canada were invited to join the process, but NWMO particularly communicated with communities from the "nuclear provinces" (Ontario, Quebec, New Brunswick and Saskatchewan) in which nuclear power plants or Uranium mining sites are situated.

In total, 22 communities came forward with indications of interest. The geographic pattern of the locations of these communities is characterised by the main highways (Ontario) and by the existence of mining areas (Saskatchewan). Some of the communities were "nuclear" communities (mining, refining, nuclear power). 21 of these communities passed the initial screening that they potentially hosted suitable areas.

At any point in time, the communities had the right to withdraw from the process. The number of communities and the areas considered were decreased on the basis of safety-related (i. e. geoscientific) arguments (abundance of at least one suitable geologic formation in a community), on the necessity that SNF transport to the site had to be feasible, and on the continued willingness of the communities. The aim was to identify a site providing sufficient safety, but not necessarily the "safest" site. It is noteworthy that, since different communities joined the process at different times, at each point in time the communities were at different stages of the process, there was no unified time schedule applicable to all communities.

Airborne characterisation techniques played a particular role in the further process. They enabled NWMO to get a geoscientific understanding of the large areas to be considered (often several thousand square kilometres per community) and to identify major features such as main faults. Although airborne techniques are not able to explicitly investigate features at repository depth, they had a high value since major fracture zones in the Canadian Shield are mostly vertical. The airborne investigations also helped targeting the drilling programme.

The (qualitative rather than quantitative) criteria applied in the process can be found in NWMO's 2010 report "Moving Forward Together: Process for Selecting a Site for Canada's Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel"⁶. Amenability to characterisation was amongst the factors to be accounted for. In addition to the five safety-relevant factors, a sixth factor relevant for the process was transport feasibility.

For all communities, desktop studies were carried out in the beginning. For a subset of communities, these were followed by field work. The objective was to narrow down both the number of communities and the areas of interest within each community. The site investigations were important not only from a geoscientific,

⁶ https://www.nwmo.ca/-/media/Reports---Reports/1545_processforselectingasiteforcan.ashx?rev=26367d5de1ee4b5ba6b05cbc6f2dcc21&sc_lang=en&hash=DA8BF9D14CE3E44A504F6DE7CE4BF14A

but also from a societal point of view, they provided ample opportunities for communication with the communities' population and for mutual learning. Thus, site characterisation was combined with building community awareness and support. The development of trust was essential to get support for the site investigations. The communities' costs of the process were covered by NWMO, but otherwise NWMO was careful concerning financial incentives.

In 2021, the process finally focussed on two communities in Ontario, one offering a site with crystalline, the other one with sedimentary potential host rock. Both were then extensively further investigated, using, inter alia, deep boreholes. For both, confidence and safety reports were prepared by NWMO. Both sites were considered technically safe. The site finally selected – the Revell Site in Western Ontario – is offering a crystalline host rock. The selection was based on community willingness.

From now on, a stepwise licensing process is foreseen. In its course, an Underground Demonstration Facility (UDF) which could be considered a site-specific URL will be constructed. Its role will include eliciting information needed for the final repository layout and demonstrating technical feasibility. In other words, the site investigation by means of the UDF will become part of the application process (after submission of the license to prepare site). While the location of the central service area will be determined in advance to the UDF construction, the underground layout (particularly locations and lengths of the emplacement rooms) will be finalized by confirmation of lineaments / fractures intersections to be found underground.

NWMO did not see the necessity of constructing a site-specific URL as part of the site selection. The confidence in safety is considered high enough to start the licensing process and the risks appear manageable without such a facility. Important contributions to confidence were provided by the R&D in various generic URLs all over the world, including the URL at Whiteshell (Manitoba). Given the knowledge (both on near-field processes and on geologic processes at a larger scale) gained from the work in URLs, from a confidence perspective there appears nowadays to be much less need for a site-specific URL than in the past.

The Whiteshell URL was constructed in a large batholith exposing very few fractures. Whiteshell is considered unique with respect to the lack of fracturing, which might have been a factor when selecting the site for a URL. This was, however, based on only preliminary broad geoscientific understanding. Another consideration was probably the wish to spread the benefit from research centres over the country.

The DGR concept at Revell will involve long-lived containers. Different from the KBS-3 concept, NWMO plans to work with electrodeposited and cold-spray copper coating on steel. The envisaged repository depth is about 750 m (deeper than in Sweden or Finland)⁷, but still to be finalized within 500-750 m. Important safety-relevant features of the site include the age, uniformity and seismic stability of the rock unit, the distance from big regional faults, the stable water regime at repository depth (no communication with surface waters), and the low sulphur content of the water. For the safety assessment, the base scenario did not assume container failure.

In an exchange about the various national approaches to siting, it was stated that the choice of an approach very much depends on the national context. In the case of Canada, the choice of the approach was a reaction

⁷ Repository depth at the sedimentary site (Saugeen Ojibway Nation-South Bruce Area) would have been 650 m.

to the failure of an earlier attempt in which, at an unsuccessful hearing, it turned out that a DGR, while being technically feasible, was lacking the necessary public support.⁸

A new process will be launched for siting a 2nd repository for intermediate-level and non-SNF high-level waste to be managed by NWMO building on the knowledge gained from the SNF DGR siting process. It will also be based on voluntariness and might become similar to the SNF siting but might involve different communities. The tailings from mining and other low-level waste are managed by actors other than NWMO.

⁸ „From a technical perspective, safety of the AECL concept has been on balance adequately demonstrated for a conceptual stage of development, but from a social perspective, it has not.“ https://www.ccnr.org/hlw_fearo_summary.html

Anhang 8 - Protokoll zur Anhörung der K+S AG durch die AG ZEIT

Der Vortragende stellt die K+S AG kurz vor: Sie ist ein produzierendes Unternehmen von Kali- und Steinsalz und betreibt derzeit acht Bergwerke in Deutschland, davon sieben Bergwerke in der flachen Lagerung und eines in steiler Lagerung.

Bei der Suche nach geeigneten Standorten unterscheidet man sogenannte Greenfield-Projekte und Brownfield-Projekte. Von Brownfield-Projekten spricht man, wenn man ein bestehendes Bergwerk erweitern will, dies wird aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt. Dagegen werde Greenfield gleichgesetzt mit einem völlig unbekannten Gebiet. Die Bewertung, ob ein Standort bauwürdig ist, orientiert sich am JORC-Standard des CRISCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards).

Zu den Methoden der Standorterkundung wird zunächst über die Exploration mit Klein- und Großbohranlagen berichtet und ergänzend die Exploration mittels geophysikalischer Methoden vorgestellt. Angewendet wird hier u. a. die Hubschrauber-Elektromagnetik, die am Beispiel des Plattendolomits erklärt wird. Mit der Methode ist es der K+S AG möglich, diffuse Aufstiege lokalisieren zu können. Eine weitere wichtige Anwendung für die K+S AG ist die Reflexionsseismik, die sie am Beispiel des Niederrheins zur Lokalisierung von Störungen vorstellt.

Die Erkundung unter Tage macht den größten Anteil der Erkundung aus, denn das Detailwissen über die Geologie kann man nur unter Tage generieren. Am Beispiel des Werks Werra stellt die K+S AG die Untertageerkundung vor. Die K+S AG ist mit entsprechender Ausrüstung in der Lage, bis zu 2,5 km unter Tage zu bohren. Beim Bohren werden aus Sicherheitsgründen Preventer eingesetzt. Als Tracer werden Uranin oder Zinksulfat eingesetzt, um herauszufinden ob das Salzlösungsvorkommen geologischen Ursprungs oder eine verloren gegangene Bohrspülung ist. Neben der Exploration mittels Bohrer erkundung setzt die K+S AG unter Tage auch Georadar ein.

Es gibt einerseits Lagerstätten der K+S AG, die relativ homogen sind, andererseits auch Lagerstätten, die verschiedene Risikofaktoren aufweisen. Die K+S AG hat daher eine Strategie bei der Vorfelderkundung erarbeitet, nach der bei einer geologischen Komplexität im Vorfeld relativ engmaschig durch Bohrungen und Radar erkundet werden muss. Der Aufwand bei der Erkundung ist auch deshalb erforderlich, weil Langzeitsicherheitsnachweise von bis zu 10.000 Jahren in die Zukunft gemacht werden müssen.

Am Beispiel der Eitratel-Störung erläutert die K+S AG nochmals, dass das notwendige Detailwissen für eine bergbauliche Tätigkeit nur unter Tage gewonnen werden kann.

Fragen von Mitgliedern der AG ZEIT an den Vortragenden:

Frage: Ist es nach den Erfahrungen der K+S AG möglich, Salz in horizontaler Lagerung zu lokalisieren und die durchschnittliche Mächtigkeit zu bestimmen und zwar ausschließlich durch Exploration über Tage (beispielsweise mit Seismik und einigen Bohrungen)?

Antwort: Nein, nach den Erfahrungen der K+S AG ist dies nicht möglich.

Frage: Wie wäre nach den Erfahrungen der K+S AG bei einer Erkundung von über Tage das Bohrraster anzulegen, wenn grob eingeschätzt werden soll, wie die Mächtigkeitsverteilung ist?

Antwort: Als Größenordnung für die Abstände zwischen den Bohrungen würde man hier mit 1,5 bis 2 km kalkulieren.

Frage: Gibt es einen Unterschied zwischen Georadar und Bohrlochradar (beide Begrifflichkeiten wurden im Vortrag genannt)?

Antwort: Nein es gibt keinen Unterschied, mit Georadar und Bohrlochradar wird jeweils dasselbe verstanden.

Frage: Ist es möglich, Georadar auch mit einer Bohrung von über Tage zu kombinieren?

Antwort: Nein, bei der Kombination Georadar mit einer Bohrung von über Tage habe man seitens der K+S AG keine guten Erfahrungen gemacht.

Frage: Würde sich der Erkundungsaufwand bei der K+S AG verändern, wenn der Sicherheitsnachweis nicht für 10.000, sondern für 1. Mio. Jahre geführt werden müsste?

Antwort: Nein, aufgrund der ohnehin unabsehbaren Dynamiken bei den geologischen Vorgängen mache dies keinen Unterschied.

Frage: Gab es bei der von der K+S AG betriebenen Untertage-Deponie Herfa-Neurode aufgrund der gelagerten Gefahrstoffe einen erhöhten Erkundungsaufwand?

Antwort: Ja der Erkundungsaufwand war tatsächlich erhöht.

Frage: Wie häufig wurden durch die K+S AG in der Vergangenheit Bergwerke aufgefahren, bei denen sich rückblickend herausgestellt hat, dass diese nicht rentabel sind?

Antwort: In der jüngeren Vergangenheit sei dies überhaupt nicht vorgekommen.

Anhang 9 - Protokoll zur Anhörung der DEEP.KBB GmbH durch die AG ZEIT

Der Vortragende stellt die DEEP.KBB GmbH kurz vor: Die DEEP.KBB GmbH ist eine unabhängige Ingenieurgesellschaft mit Spezialisierung auf Untertagespeichertechnik. Expertise ist die Planung, der Bau und der Betrieb von Untertagespeichern sowie die Sole- und Salzgewinnung. Die DEEP.KBB GmbH betreibt Projekte in etwa 30 Ländern weltweit.

Bei der geologischen Erkundung ist es das Ziel, Staßfurt-Steinsalz zu lokalisieren, denn dieses bietet in der Regel hohe Primärmächtigkeiten, einen geringen Feststoffgehalt (nichtwasserlösliche Feststoffe) und ist selektiv in Diapirstrukturen akkumuliert, so dass große Volumina homogenes bzw. homogenisierten Salz vorliegen.

Die Salzstock-Außenformen variieren zwischen mehreren Kilometern bis wenige zehner Kilometer, bei der internen Struktur / Hauptfaltenbau (Verbreitung der Staßfurt-Einheiten) treten Muster in der Größenordnung von mehreren hundert Metern und bei den Schlepp- und Fließfalten mehrere zehner Meter bis wenige hundert Meter auf. Der übliche Kavernendurchmesser liegt bei 50 bis 120 Meter. Die Sicherheitspfeiler zwischen den Hohlräumen betragen das 1- bis 3,5-fache des Kavernendurchmessers und der Abstand zu „Risikohorizonten“ (z. B. leicht lösliche Flöze, Hauptanhydrid) kann wenige zehner Meter betragen.

Bei steilstehender Lagerung erfolgt die Erkundung vor allem über Bohrungen, bei flacher Lagerung vor allem von der Oberfläche.

Die DEEP.KBB GmbH gibt eine Übersicht der unterschiedlichen Erkundungsmethoden und gibt Informationen jeweils zur räumlichen Auflösung und Reichweite.

Der Vortragende stellt Bohrlochmessungen und die Interpretation der gewonnenen Daten am Beispiel des Staßfurt-Leine-Grenzbereich in „Niederländischer Fazies“ vor. Bezüglich der Bromid-Analyse erläutert er anhand des gleichen Beispiels, dass der Bromid-Gehalt im Halit als stratigraphischer Proxy genutzt werden kann, um die Position einer Probe in einem Ablagerungszyklus zu bestimmen.

Die EMR-Messung (Bohrlochradar) ist bei der DEEP.KBB GmbH eine gängige Methode, die Eindringtiefe des Signals kann dabei mehrere hundert Meter betragen. Für die Messung wird ein unverrohrtes Bohrloch benötigt und die Bohrung muss zuvor mit einem nicht leitenden Bohrlochmedium befüllt werden. Das Fehlen eines Signals muss nicht zwingend heißen, dass sich dort keine reflektierende Struktur befindet.

Der soltechnische Aufschluss ergibt zusätzliche Erkenntnisse über die Struktur und Lithologie der Lagerstätte. Durch die Zusammenführung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Erkundungsmethoden ist die DEEP.KBB GmbH in der Lage, eine 3D-Modellierung des Standorts zu erstellen, die dann für die Kavernenplanung genutzt wird. Die Genauigkeit der Modellbildung ist umso größer, wenn eine gute Abdeckung mit Bohrdaten vorliegt. Mit Kartierungen für die Genauigkeit kann im 3D-Modell auch jeweils die Robustheit der Vorhersagen hinterlegt werden. Nach den Erfahrungen der DEEP.KBB GmbH erhöht sich der Kenntnisstand der Lagerstätte beim diapirischen Salz insbesondere nach der 2.-3. Bohrung am Standort deutlich und läuft anschließend asymptotisch gegen das Maximum. Beim Schichtensalz kann man dagegen schon mit Seismik und einer Explorationsbohrung relativ früh auf einen vergleichsweise guten Kenntnisstand kommen.

Fragen von Mitgliedern der AG ZEIT an den Vortragenden:

Frage: Wie eng ist das Bohrraster bei der Erkundung im diapirischen Salz gewählt?

Antwort: Der klassische Kavernenabstand wäre 300 bis 400 Meter, was dann gleichbedeutend mit der Datendichte ist.

Frage: Ist es Ihnen schonmal passiert, dass Sie den Hauptanhydrit oder die leicht löslichen Horizonte beim Kavernenbau übersehen haben?

Antwort: Nein, der DEEP.KBB GmbH ist dies noch nicht passiert. Im Bereich des Zechsteinsalzes übersieht die DEEP.KBB aufgrund des Kenntnisstands und der vorhandenen Expertise auch keine Horizonte mehr.

Frage: Wie viele Bohrungen sind nach den Erfahrungen der DEEP.KBB GmbH notwendig, um eine ausreichende Standortkenntnis zu erhalten?

Antwort: Es ist weniger eine Frage der Anzahl von Bohrungen, sondern es kommt vielmehr auf die räumliche Abdeckung der Bohrungen an. Zusätzlich spielt auch die geologische Struktur eine Rolle. So gibt es Strukturen, die einfach gebaut sind (mit einem weit gespannten Faltenbau), bei denen größere Abstände für Bohrungen ausreichen. Andererseits gibt es auch Strukturen, die komplexer sind und bei denen das Bohrungsraster entsprechend enger ausgelegt werden muss.

Frage: Die Darstellung des Salzaufstiegs war sehr beeindruckend. Können Sie Indikatoren nennen, bei deren Erfüllung man gute Chancen hat, die bestmögliche Homogenisierung der Struktur zu erkennen?

Antwort: Der stratigraphische Zusammenhang bleibt immer erhalten, so dass man die einzelnen Großeinheiten, die in sich homogenisiert sind (auch in unterschiedlichem Maße, das Staßfurt-Salz mehr als die jüngeren Einheiten), immer wieder finden wird. Man muss dann im Einzelfall schauen, wie die jüngeren Einheiten in das Staßfurt-Salz eingefaltet sind (z. B. die Flöze oder Anhydrit-Schollen).

Frage: Wir haben in der vorigen Präsentation gehört, dass Georadar in Kombination mit einer Bohrung von über Tage keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Wie ist dazu Ihre Einschätzung?

Antwort: Die Methode alleine bzw. das Ergebnis, das die Methode liefert, ist tatsächlich nicht ohne weiteres zu interpretieren, ergibt aber dann Sinn, wenn man die Messergebnisse in den Zusammenhang mit anderen Erkundungsergebnissen bringen kann. Das bedeutet, dass man bei Vorliegen der Standortkenntnis und bei Kenntnis des Normalprofils und seiner regionalen Ausprägung sowie der Kenntnis der tektonischen Vorgänge im Salz, die Ergebnisse durchaus eindeutig interpretieren kann.

Frage: Sind die Kavernen dicht, haben Sie Daten zu Leckraten Ihrer Kavernen?

Antwort: Man muss zunächst unterscheiden zwischen der technischen und der geologischen Dichtheit. Bei der technischen Dichtheit gibt es natürlich Fälle, wo diese nicht gegeben ist, z. B. bei der Verrohrung. Geologische Undichtigkeiten können zum Beispiel auftreten, wenn die Flözlager angesolt werden und dadurch zwei Kavernen im gleichen Flözlager stehen und dadurch über das Flöz hydraulisch verbunden sind. Auch wenn im Steinsalz die Pfeilmächtigkeit zwischen den Hohlräumen nicht eingehalten wird, kann unter dem gegebenen Druck das homogene Steinsalz über gewisse Distanzen permeabel werden. Bei richtig ausgelegten und richtig ausgesolten Kavernen im homogenen Steinsalz, mit den entsprechenden Sicherheitsabständen zu den Flözen etc., gibt es allerdings keine Undichtigkeiten.

Frage: Bei der Suche nach einem Endlagerstandort müssen wir auch Aussagen über das Gebirgsverhalten für die Bewertung der Langzeitsicherheit treffen. Würden Sie den Detaillierungsgrad bei der Erkundung durch die DEEP.KBB GmbH auch als ausreichend für unser Vorhaben ansehen?

Antwort: Das ist schwierig zu beantworten, da die Anforderungen an die Dimensionierung eines Endlagers der DEEP.KBB GmbH nicht im Detail bekannt sind. Die Anforderungen an Detailtiefe und die räumliche Auflösung sollten aber vergleichbar sein.

Anhang 10 - Protokoll zur Anhörung des Konsortiums BGR, BGE-Technology und GRS durch die AG ZEIT

Zwischen 2005 und 2025 hat das Konsortium von BGR, BGE-Technology und GRS eine große Zahl von Forschungsvorhaben durchgeführt, deren gemeinsames Ziel die methodische Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten für Endlager für hochradioaktive Abfälle in den Wirtsgesteinen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein war. Es wurden Endlager an generischen Standorten untersucht, die sich an geologische Situationen in Deutschland anlehnen, z. B. Kristallingesteinsformationen mit überlagerndem oder multiplen ewG, norddeutschen Tonformationen höherer, süddeutschen Tonformationen geringerer Mächtigkeit, etc.

Auf der Grundlage von geologischen Modellen wurden, beginnend 2005 mit den Projekten ISIBEL, dann ISIBEL II und der hier nicht betrachteten (weiteres Konsortium) vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) zunächst Konzepte der Endlagerung in Steinsalz (steile Lagerung) sowie mit KOSINA für flache Lagerung bewertet. Mit ERATO und dann 2012 mit AnSichT und bis 2022 mit AnSichT-II wurde die Endlagerung in Tongesteinsformationen an generischen Standorten, sowie mit den Projekten CHRISTA, CHRISTA II und III die Machbarkeit einer Sicherheitsbewertung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Kristallingestein an generischen Standorten mit zugehörigen Endlagerkonzepten (Überlagernder ewG, multiple ewG, Kristallin Typ 1 sowie Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren, Kristallin Typ 2) und Endlagermodellen einschließlich der Übertragbarkeit des skandinavischen Ansatzes auf die Situation in Deutschland untersucht.

Ab 2020 wurden sowohl in AnSichT-II wie in CHRISTA II die Anforderungen der EndlSiAnfV berücksichtigt, die die Randbedingungen der Bewertung von Endlagersystemen in Deutschland und insbesondere die Indikatoren zur Bewertung des Sicheren Einschlusses (§ 4) signifikant verändert hat (die Sicherheitsanforderungen von 2010 erforderten einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich, während die Sicherheitsanforderungen von 2020 im Kristallingestein auch einen Einschluss mit technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren erlauben (Kristallin Typ 2)). Im Projekt RESUS wurden dann als Grundlage für die rvSU der BGE, basierend auf den vorausgegangenen Forschungsvorhaben und zugehörigen geologischen Modellen Sicherheitsbetrachtungen an zehn generischen Endlagersystemen durchgeführt.

Außer in Salz (steil) sind die wirtsgesteinsspezifischen sicherheitsrelevanten Merkmale eines Endlagerkonzepts in Deutschland in viel geringerer Detailtiefe bekannt als in der VSG und wurden deshalb in den verschiedenen Projekten in einem iterativen Prozess in Kombination mit Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen im Rahmen der Integritätsanalyse der geologischen Barrieren abgeschätzt. Der Detaillierungsgrad der Annahmen und der Methodenentwicklung nimmt in der Reihenfolge von Steinsalz (steil), Tongestein, Steinsalz (flach), Kristallin (Typ 2), Kristallin (Typ 1) ab. Die Aussagen zu Ungewissheiten sind also keine generischen Aussagen zum jeweiligen Wirtsgesteinstyp, sondern beziehen sich auf den tatsächlich in die jeweiligen Projekte eingeflossenen Wissensstände. In den Wirtsgesteinen im Kristallin (Typ 1 und 2) und Salz in flacher Lagerung beruhen viele Annahmen zur Geologie auf Hypothesen, sodass die sicherheitsrelevanten Merkmale nur unzureichend bekannt sind. Ansätze mit geringem Detaillierungsgrad sind wohl nur schwer zu übertragen. Aufgrund des SKB-Konzepts in Schweden und der Kristallin-Studie der Nagra in der Schweiz liegen jedoch viele Informationen zur Methodik für Kristallin-Typ 2 vor, vorausgesetzt natürlich, dass ein Behälter zur Verfügung steht, der die Aufgabe der wesentlichen

Barriere übernehmen kann. Konzepte (Typ 1) mit ewG im Kristallin wurden vom Konsortium als nur wenig belastbar dargestellt.

Trotz hoher standortspezifischer Informationsdefizite und Erkundungsanforderungen betr. mechanischen Eigenschaften, Homogenität und Störungen wurden für Tongestein die Ungewissheiten für andere Merkmale gering bis mittel eingestuft.

Das Konsortium stellte fest, dass sich die Merkmale/Kriterien der Bewertungen der Wirtsgesteinsformationen weitestgehend auf die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (geoWK) des Standortauswahlgesetzes zurückführen lassen.

Hohe Anforderungen an die Erkundung einer Standortregion bestehen, wenn im Hinblick auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften Informationsdefizite vorliegen. Die Frage, inwiefern die Erkundung die relevanten Erkenntnislücken schließen kann, war nicht Gegenstand der Forschungsprojekte. Bedarfe an zusätzlicher Information betreffen in

- Tongestein: mechanische Eigenschaften, Homogenität, Störungen.
- Steinsalz: mineralogische Zusammensetzung, Störungen, Fluidvorkommen (Salz, flach), ggf. geol. Komplexität (Salz, steil).
- Kristallin (Typ 1): Barrierenmächtigkeit, Gebirgsdurchlässigkeit, Bildung Sekundärpermeabilitäten.
- Kristallin (Typ 2): hydrochemische und hydraulische Bedingungen.

Basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Projekte beantwortete das Konsortium die schriftlich zugestellten Fragen der AG Zeit sowie die Vor- und Nachteile und die Belastbarkeit der einzelnen Indikatoren für alle untersuchten Endlagerkonzepte.

Für jeden Gesteinstyp präsentierte das Konsortium in vergleichbarer Form die geologischen Merkmale, die entscheidend sind, damit ein Sicherheitskonzept funktioniert. So haben z. B. bei Tongestein Porosität und Permeabilität, Diffusionskoeffizienten und mineralogische Zusammensetzung, sowie die mechanischen Eigenschaften den wichtigsten Einfluss auf das Sicherheitskonzept, wobei der Grad der Ungewissheit bei den mechanischen Eigenschaften hoch ist. Bei den Projekten, die Salz in steiler Lagerung untersuchten sind Ungewissheiten wegen des Bezugs auf die Gorleben-Daten gering, wohingegen bei Salz in flacher Lagerung ein hoher Grad von Ungewissheiten bei den Merkmalen „Störungen“, „Fluidvorkommen“ und „mineralogische Zusammensetzung“ auftreten. Im Kristallingestein mit ewG sind die Ungewissheiten besonders hoch bei der Frage der Ausdehnung des ewG, der Gebirgsdurchlässigkeit und der Frage der Bildung von Sekundärpermeabilitäten. Im Kristallingestein ohne ewG sind es die hydrochemischen und hydraulischen Bedingungen.

In der Diskussion wird angemerkt, dass Kristallingestein in der Phase II des Standortauswahlverfahrens mit Bohrungen nur schwierig zu erkunden ist. Das Gleiche gilt eingeschränkt für Salz in steiler Lagerung.

Es ergab sich eine längere und immer wieder aufflammende Diskussion, ob man überhaupt in Phase II oder III einen möglichen mit anderen möglichen Standorten in anderen Formationen vergleichbaren Endlagerstandort mit multiplem ewG im Kristallingestein mit ausreichender Gewissheit identifizieren kann. Es ist klar, dass wegen des nur geringen und nicht ausreichenden Erkenntnisgewinns, Bohrungen von über Tage alleine nicht

helfen werden, ein Kluftnetzwerk und die es charakterisierenden hydrodynamischen Bedingungen mit ausreichender Sicherheit und Detaillierungsgrad belastbar zu erkunden. Bohrungen helfen nicht, einen ewG zu finden, sondern nur, ihn auszuschließen. Und selbst nach Auffahrung eines Erkundungsbergwerkes und dessen Untersuchung und trotz des gegenüber Bohrungen von über Tage unzweifelhaft größeren Erkenntnisgewinns bleiben die Risiken groß, das Vorhandensein von Klüften mit ungünstigen hydraulischen Eigenschaften nur mit unzureichender Belastbarkeit ausschließen zu können. Es bleibt „try and error“ und es ist wahrscheinlich unmöglich mit vertretbarem Aufwand auf ein gleiches Niveau von Vertrauen in die Eignung als Endlagerstandort kommen zu können wie bei den Erkundungen von Standortregionen in den anderen Wirtsgesteinstypen, denn die Anhörung hat deutlich gemacht, dass die räumliche Verteilung der Eigenschaften (Klüfte, Hydraulik) diskontinuierlich ist und dass selbst nach Errichtung von Erkundungsbergwerken nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen vorherrschen. Große Zweifel bleiben somit, ob bei einer potentiellen Standortregion im Kristallingestein ein ewG aufgezeigt werden kann. Klar ist auch, dass die geführte Diskussion sich vor allem auf einen möglichen Standort im Kristallingestein mit ewG bezieht. Sie gilt nicht für einen möglichen Standort im Kristallingestein, in dem der Behälter die wesentliche Barriere darstellt. Allerdings, aufgrund des generischen Charakters der durchgeführten Forschungsprogramme, lässt sich keine zusätzliche Erkenntnis zur Wahrscheinlichkeit des Versagens von Behältern für Endlagersystemtyp 2 gewinnen, da entsprechende Untersuchungen in den CHRISTA-Vorhaben wegen der fehlenden Szenarienanalyse nicht genügend belastbar sind. In den skandinavischen Programmen ist die Fehlerquote der Behälter klein, aber nicht null. Die Ungewissheiten zum Thema der Versagenswahrscheinlichkeit von Behältern sind so groß, dass ein Vergleich von Konzepten unmöglich erscheint.

Was mögliche Standorte in Tonformationen betrifft, wurde als Wissenslücke die mechanische Stabilität identifiziert. Hier stellen sich bautechnische Fragen zur Realisierung eines Betonausbaus und dessen mechanischen Eigenschaften.

Angeregt durch den Vortrag und die sich anschließende Diskussion wurde die Frage aufgeworfen, ohne sie zu beantworten, ob die geoWK noch dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Wertungsgruppen müssten vielleicht überprüft werden, z. B. bei den Sorptions- und Diffusionskoeffizienten. Im Projekt RESUS wurde gezeigt, dass die Gruppen manchmal nicht genügend diskriminierend sind. Andererseits sollte man an diesen gesetzlich definierten Kriterien in Phase I des Standortauswahlverfahrens festhalten, da sie die Basis der Kriterien der Bewertungen der Standortregionen durch die BGE darstellen. Eine Aktualisierung wäre erst für Phase II möglich. Auf Nachfrage wird erläutert, dass die Prüfung der geoWK im Hinblick auf eine Änderung der Wertungsgruppen und Zahlenwerte, relativ zügig durchgeführt werden könnte. Die Überprüfung wird als sinnvoll angesehen; als Beispiel werden die Bewertungsgruppen der Sorptions- und Diffusionskoeffizienten genannt.