

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Gutachten „Fragen der Standortauswahl“

des Öko-Institut e. V.

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 67</p>

Gutachten: Fragen der Standortauswahl

Im Auftrag des Deutschen Bundestags für die
Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe

Darmstadt,
03.06.2016

Autorinnen und Autoren

Dipl.-Geol. Stefan Alt
Dipl.-Ing. Beate Kallenbach-Herbert
Dipl.-Ing. Julia Neles

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Schicklerstraße 5-7
10179 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

info@oeko.de
www.oeko.de

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	7
1. Veranlassung	9
2. Arbeitsweise und Dokumentation	9
3. Nicht weiter zu verfolgende Optionen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle	10
3.1. Entsorgung im Weltraum	10
3.2. Entsorgung im antarktischen oder grönländischen Inlandeis	11
3.3. Entsorgung in den Ozeanen	12
3.3.1. Verdünnungsprinzip	12
3.3.2. Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens	13
3.3.3. Entsorgung in Subduktionszonen	13
3.4. Dauerlagerung an oder nahe der Erdoberfläche ohne Endlagerintention	14
4. Mögliche Alternativen zur Endlagerung?	15
4.1. Endlagerung in tiefen Bohrlöchern	16
4.1.1. Technisches und sicherheitliches Konzept	16
4.1.2. Stand der Technik und Entwicklungsbedarf	17
4.1.3. Betriebs- und Langzeitsicherheit	19
4.1.4. Rückholung und Bergung	19
4.1.5. Empfehlung	20
4.2. Langzeitzwischenlagerung	21
4.2.1. Technische Einflussgrößen	21
4.2.2. Nichttechnische Einflussgrößen und generationenübergreifender Kompetenzerhalt	23
4.2.3. Empfehlung	25
4.3. Transmutation	25
4.3.1. Technologisches Gesamtsystem und technischer Entwicklungsstand	26
4.3.2. Zeitrahmen und Kosten	27
4.3.3. Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland	27
4.3.4. Sicherheit und Proliferationsrisiken	28
4.3.5. Gesellschaftliche und soziale Randbedingungen für die praktische Umsetzung	29
4.3.6. Empfehlung	29
5. Zentrale Einschlussfunktion für radioaktive Abfälle - geologische und/oder technische Barrieren?	29

5.1.	Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG-Konzept)	30
5.2.	Konzept der langzeitsicheren technischen Barrieren (Behälterkonzept)	31
5.3.	Stellung von ewG-Konzept und Behälterkonzept im Standortauswahlverfahren	32
6.	Endlagermonitoring	33
7.	Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System	35
7.1.	Einführung	35
7.2.	Ebene des Individuums	36
7.3.	Ebene der Institutionen	36
7.4.	Intraorganisationales System und Beziehungen	37
8.	Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien	38
8.1.	Ziel	39
8.2.	Begriffsbestimmungen	40
8.3.	Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien	41
8.3.1.	Großräumige Vertikalbewegungen	41
8.3.2.	Aktive Störungszonen	41
8.3.3.	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	41
8.3.4.	Seismische Aktivität	42
8.3.5.	Vulkanische Aktivität	42
8.3.6.	Grundwasseralter	42
8.4.	Geowissenschaftliche Mindestanforderungen	42
8.4.1.	Gebirgsdurchlässigkeit	42
8.4.2.	Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	43
8.4.3.	Minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	43
8.4.4.	Maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs	46
8.4.5.	Fläche des Endlagers	46
8.4.6.	Erkenntnisse zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich des Nachweiszeitraums	46
8.5.	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	47
8.5.1.	Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises	48
8.5.1.1.	Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau	48
8.5.1.2.	Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich	51
8.5.1.3.	Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit	60

8.5.1.4.	Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	62
8.5.2.	Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens	63
8.5.2.1.	Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	63
8.5.2.2.	Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich	67
8.5.3.	Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften	71
8.5.3.1.	Anforderung 7: Gute Gasverträglichkeit	71
8.5.3.2.	Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit	72
8.5.3.3.	Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden	77
8.5.3.4.	Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse	79
8.5.3.5.	Anforderung 11: Günstige Bedingungen für den Bau von Verschlussbauwerken	80
8.5.3.6.	Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges	80
9.	Geowissenschaftliche Daten: Informationsbestand und Umgang mit Gebieten mit nicht ausreichender geowissenschaftlicher Datenlage	83
9.1.	Vorhandene Datengrundlagen und -qualität	84
9.2.	Umgang mit Gebieten mit nicht ausreichender geowissenschaftlicher Datenlage, Beteiligung des Nationalen Begleitgremiums	85
10.	Planungswissenschaftliche Kriterien	88
10.1.	Hintergrund und Zielsetzung	88
10.2.	Begriffsbestimmungen	90
10.3.	Grundlage für die inhaltliche Definition planungswissenschaftlicher Kriterien	91
10.3.1.	Exemplarische Kriteriensätze	91
10.3.1.1.	Kriteriensatz des AkEnd	91
10.3.1.2.	Kriteriensatz im Schweizerischen Sachplan geologische Tiefenlager	93
10.3.2.	Differenzierung nach obertägigen und untertägigen Planungsaspekten	95
10.3.3.	Identifizierung relevanter Kriterienkategorien	96
10.4.	Prozedurale Aspekte der Anwendung planungswissenschaftlicher Kriterien	97
10.4.1.	Übergeordnete Aspekte	97
10.4.2.	Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 1	98
10.4.3.	Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 2	99
10.4.4.	Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 3	99
10.5.	Vorschlag für einen Kriteriensatz	100
10.5.1.	Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien - obertägig	100

10.5.1.1.	Wohngebiete und Mischgebiete	100
10.5.2.	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – ober- und untertägig	100
10.5.2.1.	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 1	101
10.5.2.2.	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 2	101
10.5.2.3.	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 3	102
11.	Sozioökonomische Potentialanalyse	104
12.	Anforderungen an eine Einlagerung weiterer radioaktiver Abfälle	107
12.1.	Priorität: Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle	107
12.2.	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur potenziellen Endlagerung am gleichen Standort	108
12.3.	Ausschluss von Querbeeinflussungen der sicheren Endlagerung: Anforderungen an den Standort und an die Konditionierung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle	109
12.4.	Transparentes Verfahren: Berücksichtigung und Kommunikation der möglichen Einlagerung weiterer radioaktiver Abfälle von Beginn an	110
12.5.	Empfehlung	111
13.	Anforderungen an Behälter zur Endlagerung	112
13.1.	Schutzziele	112
13.2.	Anforderungen in der Betriebsphase des Endlagers	113
13.3.	Anforderungen an das Langzeitverhalten der Behälter im Endlager	113
13.4.	Anforderungen der Rückholbarkeit und der Bergbarkeit	114
13.5.	Stand der Technik	115
13.6.	Terminierung und Umsetzung der Behälterentwicklung	116
14.	Anforderungen an Forschung und Technologieentwicklung	117
15.	Literaturverzeichnis	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 8-1:	Transport durch Grundwasser: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien	49
Tabelle 8-2:	Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp TONSTEIN	50
Tabelle 8-3:	Platzhalter - Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp SALZ	50
Tabelle 8-4:	Platzhalter - Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp KRISTALLIN	50
Tabelle 8-5:	Günstige Konfiguration der Gesteinskörper: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien	57
Tabelle 8-6:	Günstige Konfiguration der Gesteinskörper: Ersatzweise anwendbare Indikatoren bei fehlenden Informationen zur Abstandsgeschwindigkeit	59
Tabelle 8-7:	Gute räumliche Charakterisierbarkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien	61
Tabelle 8-8:	Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien	62
Tabelle 8-9:	Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums	67
Tabelle 8-10:	Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums	70
Tabelle 8-11:	Gute Gasverträglichkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums	72
Tabelle 8-12:	Gute Temperaturverträglichkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums	73
Tabelle 8-13:	Hohes Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums	78
Tabelle 10-1:	Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien, gemäß (AkEnd (2002) Tabelle 4.8)	91
Tabelle 10-2:	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien, gemäß (AkEnd 2002 Tabelle 4.9)	92
Tabelle 10-3:	Raumplanerische Aspekte: Sachbereiche und Indikatoren, gemäß BFE (2008), Anhang II	93
Tabelle 10-4:	Kriterien für obertägige Planungsaspekte - Gewichtungsgruppe 1	101
Tabelle 10-5:	Kriterien für obertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 2	101
Tabelle 10-6:	Kriterien für untertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 2	102
Tabelle 10-7:	Kriterien für obertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 3	102

Tabelle 10-8:	Kriterien für untertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 3	103
Tabelle 11-1:	Untersuchungsgegenstände für den standardisierten Teil der sozioökonomischen Potenzialanalyse	105

1. Veranlassung

Die „Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ (im Folgenden: Endlagerkommission) befasst sich in ihrer Arbeitsgruppe 3 „Gesellschaftliche und technisch-wissenschaftliche Entscheidungskriterien sowie Kriterien für Fehlerkorrekturen“ (im Folgenden: AG 3) mit der Aufgabe der Kriterienentwicklung im Prozess der Standortauswahl für ein Endlager für insbesondere hoch radioaktive Abfälle. Mit diesem Auftrag bereitet die AG 3 zentrale Inhalte der Diskussionen der Endlagerkommission und des von der Kommission zu erstellenden Berichts vor. Im Bericht der Endlagerkommission sind die Themen der AG 3 inhaltlich in den Kapiteln "5 Entsorgungsoptionen und ihre Bewertung" und "6 Prozesswege und Entscheidungskriterien" verortet.

Das Öko-Institut e.V. hat den Auftrag erhalten, die AG 3 durch gutachtliche Expertise zu Fragen der Standortauswahl in der Endphase ihrer Arbeit zu unterstützen. Zentrale Aufgaben hierbei waren

- Erschließung und Darstellung der Argumentation und der Diskussionsergebnisse der AG 3, ausgehend von den dort erstellten Unterlagen
- ergänzende Literaturrecherchen
- Erstellung von Berichten zu ausgewählten Themen sowie
- Auswertung der Öffentlichkeitsarbeit der Kommission, soweit sie die Themenstellungen der AG 3 betreffen.

2. Arbeitsweise und Dokumentation

Im Rahmen des o.a. Auftrags hat das Öko-Institut im Zeitraum Dezember 2015 bis Anfang Juni 2016 an sämtlichen Sitzungen der AG 3 teilgenommen. Aus den hierbei von der Arbeitsgruppe erörterten Einzelsachverhalten wurden in enger und regelmäßiger Abstimmung mit den Vorsitzenden der Arbeitsgruppe ausgewählte Fragestellungen durch das Öko-Institut bearbeitet. Dabei wurde neben den vorliegenden Gutachten und anderen Drittunterlagen die jeweilige Argumentation und die Beiträge der AG 3 Mitglieder erschlossen und für die weitere Befassung in der Arbeitsgruppe aufbereitet. Weiterhin hat das Öko-Institut zur Vorbereitung der Fachtagung "Kriterien für die Standortauswahl" am 29. und 30.01.2016 und zu ihrer Auswertung beigetragen sowie an der Vorbereitung der Konsultationsveranstaltung "Endlagerbericht im Entwurf" mitgewirkt, soweit dies die Kernbotschaften der AG 3 betraf.

Das vorliegende Gutachten dokumentiert die seitens Öko-Institut unmittelbar für die Beratungen der AG 3 bearbeiteten Fragen im Zusammenhang mit der Standortauswahl. Die einzelnen Kapitel repräsentieren dabei die Vorlagen des Öko-Instituts an die AG 3. Sie sind nicht mit der Endbefassung der AG 3 oder der Kommission identisch. Vielmehr hat die AG 3 die hierbei sukzessive entstandenen Ausarbeitungen des Öko-Instituts bei ihren Beratungen und zur Erstellung von Teilen des Kommissionsberichts herangezogen.

Über die hier dargestellten Fragestellungen hinaus hat das Öko-Institut im Rahmen der laufenden Begutachtung an der Iteration und Weiterentwicklung der von AG 3 zu erarbeitenden Teile des Kommissionsberichts unterstützend mitgewirkt, was hier nicht im Einzelnen wieder gegeben werden kann.

3. Nicht weiter zu verfolgende Optionen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle

Die Kommission hat sich hinsichtlich der als eher unrealistisch eingestuften Entsorgungsoptionen anhand einer Literaturrecherche der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)¹ über den internationalen Wissensstand informiert und ist nach Diskussion der verfügbaren Informationen zu einer differenzierten, im Tenor ablehnenden Sichtweise bezüglich der im folgenden beschriebenen Optionen gelangt. Angesichts des derzeitigen und absehbaren Wissensstandes und unter Angabe klarer Argumente werden die im Folgenden genannten Entsorgungsoptionen von der Kommission nicht weiter verfolgt und auch nicht für eine zukünftige Beobachtung oder aktive Verfolgung empfohlen.

3.1. Entsorgung im Weltraum²

Die Option der Endlagerung radioaktiver Abfälle im Weltraum wurde besonders in den 1970er und 1980er Jahren untersucht. Federführend waren Wissenschaftler der National Aeronautics and Space Administration (NASA) und der Boeing Aerospace Corporation in den USA. Der Transport in den Weltraum wurde meistens als komplementäre Alternative zur Endlagerung auf der Erde betrachtet und sollte vornehmlich für kleinere Abfallmengen aus separierten langlebigen Nukliden angewendet werden. Für große Abfallmengen kommt die Verbringung in den Weltraum allein aus Kostengründen nicht in Frage.

Die untersuchten Konzepte variieren von der Verbringung der Abfälle in die Sonne über den Transport aus dem Sonnensystem heraus bis hin zur Lagerung auf dem Mond oder in einem hohen Erdorbit. Die Umlaufbahnen im inneren Sonnensystem (Erde, Mond) wie auch die Verbrennung in der Sonne wurden schlechter bewertet als z. B. die Verbringung in eine Sonnenumlaufbahn, auf die Mondoberfläche oder ganz aus dem Sonnensystem heraus. Die Verbrennung in der Sonne würde die gefährlichen Substanzen zwar sicher zerstören, wäre aber extrem kostspielig. Erd- und Mondumlaufbahnen wären für die Langzeitlagerung nicht stabil genug.

Beim Transport in den Weltraum sind zentrale Probleme in Bezug auf die Sicherheit zu lösen. Rettungsfunktionen müssen vorgesehen werden, die bei Fehlstarts oder anderen Fehlfunktionen während der Versendung zum Einsatz kommen können. Eine Verteilung der radioaktiven Abfälle in der Atmosphäre oder am Boden in der Folge von Havarien muss vermieden werden. Die Abfallstoffe könnten in Form von Cermet, einem hitzebeständigen Material aus Keramik und gesintertem Metall, transportiert werden, um die Ausbreitung von Radionukliden im Fall eines Unfalls zu minimieren. Von Möglichkeiten einer "Fehlerkorrektur" kann man hier wohl nicht sprechen.

Die National Academy of Sciences der USA (NAS) hat festgestellt, dass die Option der Endlagerung im Weltraum nicht sicher und praktikabel sei und wohl auch nie sein werde. Sie gilt allgemein als Hochrisikotechnologie. Zusätzlich würden die Kosten um einen Faktor 10 über denen der geologischen Endlagerung liegen. Die Wahrscheinlichkeit eines Raketenfehlstarts liegt im Bereich von 1 bis 10 Prozent. Deutschland könnte aufgrund seiner ungünstigen geographischen Lage diese Abfälle nur mit sehr hohem Aufwand vom eigenen Hoheitsgebiet aus in den Weltraum bringen. Für die Endlagerung im Weltraum wären Transporte der Abfälle zu einem Weltraumbahnhof in der Nähe des Äquators deutlich günstiger. Dies würde jedoch in Widerspruch

¹ BGR (2015), Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75.

² siehe im Folgenden BGR (2015) Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75, Kapitel 1.

zum §1 des StandAG und zum Nationalen Entsorgungsplan der Bundesregierung stehen, in dem es heißt: „Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen erfolgt grundsätzlich in nationaler Verantwortung. Die Endlagerung soll im Inland erfolgen“³.

Ein völkerrechtlicher Hinderungsgrund ist schließlich Artikel IX des sogenannten *Weltraumvertrages*⁴, in dem sich die Unterzeichner verpflichten, dass bei Forschungsaktivitäten eine schädliche Kontamination des Weltraumes einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper vermieden werden soll. Dieses am 10.10.1967 in Kraft getretene Übereinkommen ist für die Bundesrepublik Deutschland seit dem 10.02.1971 rechtsverbindlich.

Empfehlung:

Eine Entsorgung radioaktiver Abfälle im Weltraum ist mit einem hohen Risiko massiver Radionuklidfreisetzung in der Biosphäre behaftet. Dies allein genügt, um eine Verfolgung dieser Option abzulehnen. Die ungelösten technischen und sicherheitlichen Fragen, die selbst im Erfolgsfall erwartbar immensen Kosten und völkerrechtliche Implikationen stützen und bestärken diese Ansicht.

3.2. Entsorgung im antarktischen oder grönländischen Inlandeis ⁵

Bereits 1957 wurde von der National Academy of Sciences der USA (NAS) eine Lagerung in Eis und Permafrost in Betracht gezogen. Das Konzept wurde in verschiedenen Studien entwickelt und anschließend vom US Department of Energy (DoE) bewertet. Vorgeschlagen wurden Zonen in der Antarktis und Grönland, die beide von mächtigen Eiskappen bedeckt sind. Grönland wurde, obwohl es für Schiffstransporte besser erreichbar ist und die Umweltbedingungen weniger extrem sind, aufgrund der Zugehörigkeit zu Dänemark und des Vorhandenseins von Siedlungsbereichen nicht näher betrachtet. Auch in Deutschland wurde Ende der 1950er Jahre über die Entsorgung in den polaren Eiskappen nachgedacht, der Ansatz aber Anfang 1960 endgültig vom damaligen Bundesministerium für Atomfragen verworfen.

Aufgrund der erwartbar hohen Transport- und Konditionierungskosten kämen vornehmlich hoch radioaktive Abfälle in Betracht. Sie sollten entweder von einem 50-100 m tiefen Bohrloch im Eis aus durch ihre Wärmeentwicklung selbstständig bis zur Gesteinsoberfläche unterhalb des Eises absinken, oder müssten durch Verankerungen an der Oberfläche in einer bestimmten Position gehalten werden. Es liegen hierzu auch patentierte Konzepte vor. Dabei wurde angenommen, dass die Antarktis seit 200 Millionen Jahren auch während wärmerer Klimaperioden ununterbrochen vereist war. Zweifel an der sicheren Vorhersagbarkeit der für eine sichere Endlagerung notwendigen klimatischen Bedingungen wurden allerdings schon in den 70er Jahren geäußert und in der Zwischenzeit ja auch bestätigt. Gegenwärtig wird die Idee der Lagerung in Eis und Permafrost wegen der anhaltenden globalen Erwärmung mit abschmelzenden Eismassen und der sehr empfindlichen arktischen und antarktischen Ökologie stark in Zweifel gezogen. Frühere Annahmen zur Ausdehnung von Eisflächen, die über mehr als 10.000 Jahre existieren können, sind nach heutigem Erkenntnisstand nicht haltbar. Es bestehen nach wie vor Wissenslücken z.B.

³ BMUB (2015): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), Stand August 2015, S. 5

⁴ "Vertrag über die Grundsätze zur Regelung der Tätigkeiten von Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums einschließlich des Mondes und anderer Himmelskörper" vom 10. Oktober 1967, ratifiziert für die Bundesrepublik Deutschland am 10. Februar 1971.

⁵ siehe im Folgenden BGR (2015) Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75, Kapitel 2.

zur Gletscherdynamik oder zu den (sicherheits-) technischen Voraussetzungen. Beispielsweise ist die Wirkung einer starken Hitzequelle im Eis oder an seiner Basis nur schwer abschätzbar.

Nach Artikel 5 des am 23.06.1961 in Kraft getretenen Antarktisvertrags und seinen zahlreichen Folgeverträgen ist die Lagerung radioaktiver Abfälle in der Antarktis bislang völkerrechtlich ausgeschlossen. Hinzu kommt, dass eine Einlagerung in Eis außerhalb der Grenzen Deutschlands erfolgen müsste, entsprechende Transporte erforderlich machen würde und in Widerspruch zum §1 des Stand AG stünde.

Empfehlung:

Die Verbringung hoch radioaktiver Abfälle in arktische oder antarktische Inlandeisregionen ist keine im Hinblick auf den langen Nachweiszeitraum hinreichend sichere Form der Endlagerung und daher abzulehnen.

3.3. Entsorgung in den Ozeanen⁶

Ozeane als mögliche Orte einer Entsorgung des radioaktiven Abfalls wurden bereits in der Frühzeit der Erforschung der Kernenergie in Betracht gezogen, und zwar (a) in Bezug auf die Verdünnungswirkung in den riesigen Wassermengen, (b) mit Blick auf große Sedimentschichten am Grund der Ozeane, und (c) zur Verbringung der Abfälle in Subduktionszonen. Diese drei Optionen werden im Folgenden einzeln kurz diskutiert, gefolgt von der Darstellung der alle drei gleichermaßen betreffenden rechtlichen Lage.

3.3.1. Verdünnungsprinzip

Die erste Meeresversenkung radioaktiver Abfälle wurde von den USA bereits 1946 durchgeführt. Im Rahmen von Regelungen durch die Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) wurden noch bis in die 1980er Jahre von einigen kernenergienutzenden OECD-Staaten vornehmlich schwach radioaktive Abfälle im Meer entsorgt. In Containern oder Fässern verpackte Abfälle wurden zumeist im Nordatlantik und nordöstlichen bzw. westlichen Pazifik versenkt. Die Abwurfzonen befanden sich weit entfernt von Küsten und aktiven Plattenrändern in Wassertiefen zwischen 2000 und 4000 m. Das Gefährdungsrisiko des Verfahrens wurde noch 1985 in einem Bericht der Nuclear Energy Agency der OECD (NEA) für einige Abfallarten als relativ gering eingestuft, in der Annahme, dass die Schadstoffe mit ihrer Aktivität schnell in einer sehr großen Wassermenge verdünnt und weiträumig verteilt werden, wodurch die geforderten Grenzwerte eingehalten werden könnten.

Ein Moratorium der Unterzeichnerstaaten der *London Dumping Convention*⁷ beendete diese Praxis, und seit 1994 ist die Versenkung schwach radioaktiver Abfälle untersagt. Gegen das Verdünnungsprinzip spricht zum einen, dass es schwierig ist, eine gänzlich unschädliche Konzentration anzugeben. Zum anderen könnte die Verdünnung durch verschiedene Anreicherungseffekte in Sedimenten oder der Nahrungskette aufgehoben werden, was dann wegen der praktisch irreversiblen Methode kaum korrigierbar wäre.

⁶ siehe im Folgenden BGR (2015) Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75, Kapitel 3.

⁷ London Dumping Convention: Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter, (LC72)

3.3.2. Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens

Als mögliche Methoden für die Lagerung in Sedimentschichten unterhalb des Meeresbodens wurden in der Fachwelt bisher zwei Verfahren näher betrachtet. Bei dem einen werden speziell angefertigte stromlinienförmige und mehrere Tonnen schwere Abfallbehälter von Bord eines Schiffes abgeworfen, die sich bis zu 30 Meter tief in unverfestigte weiche Sedimente am Meeresboden bohren sollen. Dies wurde in den 1980er Jahren erfolgreich in der atlantischen Tiefsee getestet

Bei einem anderen (nicht in der Praxis getesteten) Verfahren sollen die Abfälle in Bohrlöchern von einigen hundert Metern Tiefe in verfestigten oder unverfestigten Sedimenten gelagert werden, die abschließend mit Beton zu versiegeln wären. Als Ergebnis von Untersuchungen der Nuclear Energy Agency (NEA) der OECD liegen eine Reihe von Abschlussberichten zur Machbarkeit der Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen in Tiefseesedimenten vor.

Für diese Versenkung in marinen Sedimentschichten sprechen aus technischer Sicht die relativ geringe Störfallwahrscheinlichkeit und die günstigen Eigenschaften von Tiefseesedimenten mit hohem Rückhaltevermögen. Kritisch sind allerdings lange Transportwege, eine höhere Unfallwahrscheinlichkeit auf See, das Risiko von Havarien und von Korrosionsleckagen an Metallcontainern im Salzwassermilieu, die praktisch nicht vorhandene Möglichkeit der Fehlerkorrektur bzw. Rückholung sowie Risiken für das eingesetzte Personal während des Transportes und der Einlagerung. Weiterhin gibt es große Wissenslücken bezüglich der Tiefseebedingungen, in denen die Last der Entsorgung auf die internationale Gemeinschaft abgeschoben wird, Störfälle nicht beherrschbar sind und hoher technischer Entwicklungsaufwand betrieben werden muss, um die Machbarkeit zu gewährleisten. Auch nach Einschätzung des AkEnd⁸ stehen für die Erschließung derartiger Endlagerstandorte und die nachfolgende Einlagerung keine erprobten Techniken zur Verfügung.

3.3.3. Entsorgung in Subduktionszonen

Die Überlegung, radioaktive Abfälle in Subduktionszonen⁹) zu entsorgen, verdankt sich vor allem dem Argument, dass die Abfälle durch den Prozess des Abtauchens einer tektonischen Platte in den Erdmantel von der Biosphäre isoliert werden könnten. Das „Abtauchen“ erfolgt mit einer Rate von einigen Zentimetern pro Jahr relativ langsam. Dies reiche aber aus, um die Diffusionsgeschwindigkeit von Radionukliden zu übertreffen, so dass mit ihrer Freisetzung in die Ozeane hinein nicht zu rechnen sei.

Allerdings erhöht sich durch die tektonische Aktivität entlang der Grabenzonen auch die Wahrscheinlichkeit, dass die Sicherheit eines derartigen Endlagers schon frühzeitig und vor dem Eindringen in den Erdmantel beeinträchtigt werden könnte und Radionuklide freigesetzt würden. Diese Unsicherheit bei der Prognose der geologischen Abläufe und damit des Weges, den die Abfälle letztendlich nehmen, stellte ein Problem dar. Schließlich wären bei einem derartigen Verfahren Fehlerkorrektur und ggf. Rückholung der Abfälle kaum vorstellbar.

Die Versenkung von festen radioaktiven Abfällen auf oder in den Meeresgrund ist mittlerweile durch mehrere internationale Abkommen untersagt. Dies beruht auf Zweifeln hinsichtlich des letztendlichen Verbleibs des Abfälle und auf der Einsicht, dass einige wenige Länder nicht die von

⁸ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁹ Subduktionszonen sind „Abtauchzonen“, in denen Teile der Erdkruste aufgrund der geotektonischen Plattenbewegungen an „aktiven Plattenrändern“ in den Erdmantel abtauchen

allen geteilte marine Umwelt verunreinigen sollten. Die *London Dumping Convention* (s.o.) ist seit 1975 in Kraft. Durch die 1996 erfolgte Ergänzung durch das *London Protocol*¹⁰ ist nicht nur die Entsorgung auf, sondern auch im Meeresboden und im tieferen Meeresuntergrund ausgeschlossen. Die einzige Ausnahme wäre ein von Land aus erreichbarer Bereich unterhalb des Meeresbodens. Damit sind einer möglichen Endlagerung radioaktiver Abfälle in den Ozeanen in allen oben genannten Formen - auch unbeschadet der oben genannten Sicherheitsbedenken, mangelnder technischer Nachweise und geologischer Unsicherheiten - klare völkerrechtliche Riegel vorgeschoben.

Empfehlung:

Eine mit anderen Formen der Endlagerung vergleichbare Sicherheit für marine Entsorgungsstrategien wie die Verdünnung oder die praktisch irreversible Versenkung in Tiefseesedimenten oder Subduktionszonen ist nicht nachweisbar. Nach heutiger internationaler Meinung sind sie als Entsorgungsstrategie für hoch radioaktive Abfälle nicht akzeptabel. Es gibt keinen Grund, die diesbezüglich geltenden internationalen Verbote aufzukündigen, daher ist eine Weiterentwicklung mariner Entsorgungsstrategien für radioaktive Abfälle abzulehnen.

3.4. Dauerlagerung an oder nahe der Erdoberfläche ohne Endlagerintention¹¹

Die oberflächennahe Lagerung hochradioaktiver Abfälle ist derzeit zur Zwischenlagerung als Vorstufe zur späteren Endlagerung gängige Praxis. In einigen Ländern wird auch über eine oberflächennahe Langzeitlagerung nachgedacht, bis eine geeignete Endlagermethode zur Verfügung steht. An dieser Stelle soll es jedoch nur um Lagerungsoptionen gehen, die *keine* spätere Endlagerung in den Blick nehmen (daher „Dauerlagerung“).

Für eine Dauerlagerung der Abfälle auf unabsehbare Zeit in Form eines oberirdischen oder oberflächennahen und ständig zu kontrollierenden und kontrollierbaren Lagers sind nicht nur, wie bei Endlagerkonzepten, zeitlich begrenzte Kontroll- und Monitoringmaßnahmen eingeplant, sondern die Abfälle sollen *jederzeit* inspizier- und problemlos rückholbar sein. Die Aufrechterhaltung des Sicherheitskonzepts ist nur im Rahmen einer langfristigen gesellschaftlichen Kontrolle zu gewährleisten.

Vorteile des Verfahrens sind die permanente Zugänglichkeit der Abfälle, ihre Überwachbarkeit und die Möglichkeit sofortiger Intervention bei Störfällen.

Im Falle eines technischen Fortschrittes bei den Einlagerungsmethoden oder der Abfallbehandlung könnten die radioaktiven Substanzen entweder teilweise wieder nutzbar oder in ihrem Risikogehalt vermindert werden. Das Ziel, Abfälle zukünftigen fortschrittlicheren Methoden zuführen zu können, könnte zu einer höheren Akzeptanz in der Bevölkerung führen.

Der entscheidende Faktor hierbei ist jedoch die Langlebigkeit und Stabilität des Überwachungskonzepts einschließlich der beauftragten Institutionen. In dem in der Schweiz sogenannten *Hüte-Konzept* soll die Verantwortung zur Überwachung eines oberirdischen Lagers über Generationen weitergegeben werden. In einem an schwedische Verhältnisse angepassten Ansatz sollen die Abfälle in trockenen Gesteinsschichten knapp unter der Erdoberfläche eingelagert werden. Beide Ansätze wurden nicht weiterverfolgt.

¹⁰ London Protocol: "1996 protocol to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter, 1972 (as amended in 2006)"

¹¹ siehe im Folgenden BGR (2015) Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75, Kapitel 4.

Die Dauerlagerung widerspricht der aus den ethischen Prinzipien abgeleiteten Forderung, dass die Entsorgungslösung so auszugestalten ist, dass sie kein dauerhaftes aktives Tun für kommende Generationen auslöst, sondern ohne eine gegenläufige Entscheidung auf einen sicheren Endzustand für die Entsorgung zuläuft. Im Übrigen stellt die Verlässlichkeit der beauftragten Institutionen über eine extrem lange Zeitspanne den größten Unsicherheitsfaktor dar. Aus diesem Grund gehen die IAEA und andere Autoren davon aus, dass derartige Verfahren nur für kurzlebige Isotope überhaupt sinnvoll anwendbar sind.

Daher ist die baldige Endlagerung gegenüber Optionen mit Überwachung zu bevorzugen, da weder bezüglich der (Langzeit-)Sicherheit noch der ethischen Begründbarkeit Vorteile der Dauerlagerung erkennbar sind. Langzeitsicherheit kann nach Auffassung der Kommission nicht durch eine überwachte Dauerlagerung, sondern nur durch geologische Konzepte gewährleistet werden. Ein plausibler Nachweis der Funktion gesellschaftlich-institutioneller Schutzsysteme über den erforderlichen Zeitraum erscheint nicht möglich. Stabile gesellschaftliche Verhältnisse über Jahrtausende oder länger anzunehmen widerspricht der historischen Erfahrung, während viele geologische Konstellationen eine hohe zeitliche Stabilität haben, die als passive Schutzsysteme genutzt werden können.

Weitere Kritikpunkte neben der unsicheren Prognose hinsichtlich gesellschaftlicher und politischer Entwicklungen sind die Gefahr von Unfällen (z.B. durch mangelnde Wartung) und Angriffen durch Krieg oder Terrorismus, die Proliferationsgefahr, der große organisatorische und finanzielle Aufwand für zukünftige Generationen und klimatische Unwägbarkeiten.

Empfehlung:

Eine überwachte Dauerlagerung ist keine realistische Option für den nachweisbar sicheren, langzeitigen Umgang mit radioaktiven Abfällen. Eine aktive Verfolgung einer derartigen Strategie ist daher nicht empfehlenswert.

4. Mögliche Alternativen zur Endlagerung?

In der gesellschaftlichen und wissenschaftlichen Debatte werden Methoden der tiefen Bohrlochlagerung, der Transmutation oder einer Langzeitzwischenlagerung als mögliche Alternativen zur Endlagerung in einem Bergwerk genannt. Die Endlager-Kommission hat diese drei Methoden daher aufgegriffen, sich über den aktuellen Sachstand informiert, und ist im Ergebnis der Diskussion zu einer differenzierten Einschätzung der Methoden gekommen.

In erster Hinsicht sind dabei tiefe Bohrlöcher, Transmutation und Langzeitzwischenlagerung im Vergleich untereinander zunächst keine gleichwertigen Methoden für die Lösung der Endlagerproblematik. Die Einbringung hoch radioaktiver Abfälle in tiefe Bohrlöcher stellt, im Falle ihrer technischen Realisierbarkeit, de facto eine Endlagerung und damit eine Alternative zur Endlagerung in einem Bergwerk dar. Hingegen benötigen Transmutation und Langzeitzwischenlagerung im Falle einer Verfolgung dieser Methoden auch weiterhin eine nachgeschaltete Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle, gleich in welcher Form. Diese Methoden können die Endlagerung also zeitlich hinauszögern und ggf. ihre Randbedingungen ändern, sie aber letztlich nicht ersetzen.

Die Endlager-Kommission ist zu der Auffassung gelangt, dass aus heutiger Sicht keine der drei Methoden zu einer früheren Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle führen würde als die von der Kommission bevorzugte Endlagerung in einem Bergwerk unter Wahrung von Möglichkeiten zu Rückholung bzw. Bergung.

Eine weitere Verfolgung und regelmäßige Beobachtung der zukünftigen Entwicklung auf dem Gebiet der tiefen Bohrlochtechnik hält die Kommission grundsätzlich für sinnvoll. Von einer Entwicklung der Transmutationstechnologie erwartet die Kommission unter den in Deutschland herrschenden Randbedingungen keinen maßgeblichen Beitrag zur Lösung der Endlagerproblematik. Eine geplante Langzeitzwischenlagerung mit dem Ziel, die Entsorgungsfrage in einer unbestimmten Zukunft mit unbestimmten Methoden zu lösen, ist ebenfalls keine aktiv zu verfolgende Strategie. Die mit der heute absehbaren Zwischenlagerung auf längere Sicht ohnehin verbunden technischen und regulatorischen Fragestellungen sieht die Kommission im Themenfeld der notwendigen Zwischenlagerung verortet, so dass von Überlegungen zur Langzeitzwischenlagerung hier kein zusätzlicher Entwicklungsbeitrag zu erwarten ist.

Die spezifischen Schlussfolgerungen der Kommission zu den drei Themenbereichen sind in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben.

4.1. Endlagerung in tiefen Bohrlöchern

Die Kommission hat die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern als mögliche Alternative zur Endlagerung in einem Bergwerk identifiziert, die einer näheren Befassung bedarf, und hat sich anhand eines Gutachtens über den derzeitigen Sachstand informiert¹².

Die Lagerung hochradioaktiver Abfälle in bis zu 5.000 m tiefen Bohrlöchern ist eine Form der geologischen Tiefenlagerung, die aufgrund der Tiefe und der überlagernden Gesteinsschichten als sicherer Einschluss hoch radioaktiver Abfälle prinzipiell vorstellbar ist.

In Deutschland wurde sie bisher nicht näher als Entsorgungsalternative betrachtet. International stellen beispielsweise die USA und Schweden Überlegungen zu derartigen Konzepten an. Vertiefte Untersuchungen oder Demonstrationsvorhaben erfolgten bisher nicht.

4.1.1. Technisches und sicherheitliches Konzept

Die Endlagerung in tiefen Bohrlöchern soll eine weiträumige Isolation der Abfälle von der Biosphäre ermöglichen, sowie die Möglichkeit bieten, mehrere (redundante) unterschiedliche (diversitäre) geologische Barrieren für die Sicherheit des Endlagers nutzen zu können. Die Schädigung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist bei Bohrungen grundsätzlich geringer als bei Bergwerken, außerdem können die langen Verschlussstrecken der Bohrungen mit ebenfalls redundanten und diversitären Versiegelungen ausgestattet werden. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen¹³.

Der Anspruch an die tiefe Bohrlochlagerung als Form der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle muss nach heutigem Maßstab sinngemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010¹⁴ entsprechen, d.h. sie muss dauerhaft und langfristig nachsorgefrei einen sicheren Einschluss für eine Million Jahre, i. W. durch die geologischen Barrieren, gewährleisten. Dabei sollen Rückholung während des Betriebs und Bergung in einem Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss möglich sein. Hinsichtlich dieser Anforderungen wurde in dem beauftragten Gutachten ein Grundkonzept

¹² Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016): Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52.

¹³ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016): Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52, S 16.

¹⁴ BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010.

für tiefe Bohrlöcher entwickelt, anhand dessen der Stand der Technik und die mit dem Konzept verbundenen Sicherheitsaspekte diskutiert wurden.

Das Konzept sieht einen Einlagerungsbereich in 3.000 m bis 5.000 m Tiefe in vertikalen Bohrungen im kristallinen Grundgebirge vor. Andere geeignete Wirtsgesteinstypen sind in dieser Tiefenlage in Deutschland nicht zu erwarten. Der Einlagerungsort soll von mindestens zwei unabhängig wirkenden geologischen Barrieren (Salz / Ton) überlagert werden. Zwischen Einlagerungstiefe und den Salz- und Tonbarrieren soll eine Auffang- bzw. Fallenstruktur zur Speicherung der als Korrosionsprodukte zu erwartenden Gase vorliegen.

Der Mindestdurchmesser der Bohrungen orientiert sich am Durchmesser der Einlagerungskokillen (konzeptioneller Durchmesser 430 mm), die zusätzlich einen stabilisierenden Einlagerungsbehälter benötigen. Je tiefer die Bohrung desto mehr Behälter kann sie aufnehmen, umso stabiler müssen aber auch die Behälter aufgrund von Auflast und Druckbeaufschlagung im verschlossenen Bohrloch sein. Die erforderliche Stabilität des Behälters wird durch die Wandstärke erreicht, die wiederum den Durchmesser der Bohrung beeinflusst. Das von der Kommission in Auftrag gegebene Gutachten betrachtet dazu verschiedene Varianten mit dem Ergebnis, das für eine Einlagerungstiefe von 5.000 m aufgrund der Behälterdimensionierung ein Bohrlochdurchmesser von 900 mm für erforderlich gehalten¹⁵ wird. Für weniger tiefe Bohrungen sind geringere Durchmesser ausreichend.

Die Bohrung bedarf einer vollständigen Verrohrung. Im Einlagerungsbereich wird das Bohrloch mit Verrohrung und zusätzlicher Zementierung des Ringraums ausgebaut. Im Bereich der Barrieren aus Salzgestein und Tonschichten müsste die Verrohrung beim Verschluss des Bohrlochs rückgebaut werden, um Konvergenz und Selbstheilung der geologischen Barrieren nicht zu beeinträchtigen. Das Bohrloch wird für die Einlagerung mit einem Bohrlochbetriebsfluid gefüllt, das der Bohrlochstabilität dient und die Rückholbarkeit gewährleistet. Abdichtende Funktion beim Bohrlochverschluss haben Verfüllungen aus Salzgrus, Bentonit und Asphalt/Bitumenschichten oberhalb der eingelagerten Abfälle.

4.1.2. Stand der Technik und Entwicklungsbedarf

Untersuchungen zu tiefen Bohrlöchern als Entsorgungsoption werden derzeit hauptsächlich in den USA vorangetrieben. So plant das Department of Energy (DOE) neben geowissenschaftlicher Forschung einen Pilotversuch, indem inaktive Behälter mit einem Durchmesser von 115 mm in das kristalline Grundgebirge eingebracht und rückgeholt werden sollen. Der Pilotversuch soll der Demonstration einer Entsorgungsmöglichkeit von Strontium-Kapseln aus der Forschung dienen, weshalb hier auch ein deutlich geringerer Behälter- bzw. Bohrlochdurchmesser benötigt wird. Die Sicherheitsanalysen für Transport, Konstruktion, Operation, Verschluss und Langzeitsicherheit werden derzeit erarbeitet. Diskutiert werden auch verschiedene Verfüllmaterialien für das Bohrloch in- Flüssigkeits- oder Feststoffform.

Eine mögliche Bergung ist in keinem der bekannten internationalen Vorhaben zur tiefen Bohrlochlagerung vorgesehen.

Tiefe Bohrungen werden vor allem in der Erdöl- und der Erdgasindustrie eingesetzt. Die hierbei entwickelten Technologien und Verfahren können auch bei einer Endlagerung in tiefen Bohrlöchern angewendet werden. Dafür sind allerdings Anpassungen und Weiterentwicklungen erforderlich.

¹⁵ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016): Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52, S. 158.

Stand der Technik für Bohrungen in großer Tiefe sind Spülbohrverfahren. Ein trockener Ausbau tiefer Bohrlöcher kann für die erforderlichen Tiefen nicht vorausgesetzt werden. Tiefe und Durchmesser sind dabei entscheidende, miteinander in Beziehung stehende Größen. Im Normalfall wird eine Bohrung mit einem größeren Durchmesser begonnen, der mit steigender Tiefe schrittweise verringert wird. Bei typischen Tiefbohrungen der Erdöl- / Erdgasindustrie werden heute in aller Regel Bohrungen im End-Durchmesser von 311,1 mm (12 ¼ ") niedergebracht. Als heute mit Standardbohrverfahren bis in 5.000 m Tiefe maximal realisierbar gilt ein nutzbarer End-Durchmesser von 450 mm. Bei einer Tiefe von 2.000 m ist ein Durchmesser von 650 mm technisch erreichbar. Größere Durchmesser wurden in der Vergangenheit nur in wissenschaftlichen und militärischen Bohrvorhaben realisiert.

Für die Einlagerung radioaktiver Abfälle in mehrere tausend Meter tiefe Bohrlöcher werden größere End-Durchmesser (bis 900 mm, s.o.) benötigt, so dass hier eine erhebliche Weiterentwicklung der Geräte- und Bohrtechnik erforderlich ist. Zudem ist für die Einlagerung ein höherer Anspruch an die vertikale Ausrichtung der Bohrung zu stellen, als bei herkömmlichen industriellen Bohrungen.

Die Bohrlochverfüllung mittels Fluid ist neben dem Spülbohrverfahren selbst auch für die Offenhaltung und Stabilisierung des stehenden Bohrlochs erforderlich. Die Eigenschaften des Fluids sind dabei auf das Umgebungsgestein abzustimmen (Lösungsverhalten, hohe Dichte). Es sind eine ganze Reihe an erprobten Bohrfluiden verfügbar, es muss aber jeweils eine standortspezifische Fluidzusammensetzung entwickelt werden. Da die Stabilisierungsaufgabe auch während und nach der Einlagerung der Abfallgebinde besteht, würde das eingesetzte Fluid im Bohrloch verbleiben, so dass die Abfallbehälter in das Fluid abgesenkt werden und in der Einlagerungstiefe von Fluid umgeben ist. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf bezüglich der Wechselwirkungen zwischen Fluid, Verrohrung und Abfallgebinde und die hieran geknüpften zentralen Fragen der Endlagersicherheit, beispielsweise im Hinblick auf Korrosion und Gasbildung.

Die Verrohrung stabilisiert das Bohrloch und kann im Hinblick auf die Einlagerungstiefe den Gebirgsdruck mit aufnehmen. Im Hinblick auf die Rückholbarkeit ist eine langfristig drucksichere Verrohrung unabdingbar, die zudem unter Einlagerungsbedingungen korrosionsfest sein muss. Erfahrungen zur Langzeitbeständigkeit von Verrohrungsmaterialien liegen nicht vor. Auch hier besteht entsprechender Entwicklungsbedarf.

Abfallbehälter für die tiefe Bohrlochlagerung wären ebenfalls noch zu entwickeln. Maßgebliche Randbedingungen für die Behältergröße sind dabei einerseits die Bohrlochgeometrie und andererseits die Größe des einzulagernden Abfalls. Für die Auswahl des Behältermaterials sind Temperatur- und Druckverhältnisse im Bohrloch sowie die chemischen Eigenschaften des Fluids maßgeblich. Austenitische Stähle werden als prinzipiell geeignet eingestuft. Die erforderliche Behälterstabilität und damit seine Wandstärke wird auch durch die Auflast der übereinander gestapelten Behälter bestimmt.

Die Abfallbehälter können aufgrund der begrenzten Wanddicken nicht selbstabschirmend sein. Entsprechend muss die Einlagerung unter Strahlenschutzbedingungen erfolgen. Kalte Realversuche zur Einlagerung in ein Bohrloch mittels Transferbehälter wurden bereits erfolgreich durchgeführt. Verschiedene Verfahren zum automatisierten Einlagerungsbetrieb sind zudem Stand der Technik. Ein weiterer spezifischer Entwicklungsbedarf wird hier nicht gesehen. Voraussetzung ist aber ein vertikaler Bohrlochverlauf mit möglichst geringen Abweichungen der Ausrichtung.

Als Materialien für Bohrlochverschlüsse haben sich Salz, Ton und Bitumen/Asphalt als langzeitstabil z.B. bei Erdgas/Erdöllagerstätten erwiesen. Der redundante und diversitäre Einsatz

derartiger Materialien über eine Bohrlochverschlussstrecke von über 1000 m wird als technisch machbar eingestuft.

4.1.3. Betriebs- und Langzeitsicherheit

Mit dem derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik lassen sich die Betriebs- und Langzeitsicherheit einer tiefen Bohrlochlagerung noch nicht bewerten. Es lässt sich auch nicht einschätzen, ob eine derartige Lagerung langzeitsicher prinzipiell überhaupt realisiert werden kann. Einige sicherheitsrelevante Themen lassen sich aber identifizieren.

Aufgrund der großen Tiefe der Bohrungen ist es dabei grundsätzlich eine Herausforderung, einen Sicherheitsnachweis zu erbringen, der nicht nur für die Betriebsphase und das Nahfeld der Bohrung, sondern auch für ein größeres Raumvolumen im Sinne eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei einer Langzeitsicherheitsbetrachtung gilt. Durch die Kombination von kristallinem Grundgebirge in großer Tiefe, überlagernden geologischen Barrieren und den erforderlichen Gasfallen ergäbe sich hier jedenfalls eine sehr komplexe Konfiguration.

Neu zu entwickeln ist auch das Spektrum einzubeziehender Störfälle während der Betriebsphase. Die frühzeitige Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfallinventar in den ersten 100 Jahren ist als relevantes Risiko zu bewerten. Eine Freisetzung kann erfolgen aufgrund einer Behälterbeschädigung bei der Einlagerung, durch Korrosionsvorgänge im Zusammenhang mit dem Bohrlochbetriebsfluid oder aufgrund geologischer Vorgänge, die die Bohrloch- und die Behälterstabilität beeinträchtigen. In der Folge ist mit einer erheblichen Freisetzung von Radionukliden in das Bohrlochfluid zu rechnen, was insbesondere Konsequenzen für die Rückholbarkeit hat. Für das offene Bohrloch wäre zudem zu bewerten, ob die Gasbildung aus Korrosion im Bohrlochfluid frühzeitig zu einer aufwärts gerichteten Fluidbewegung und damit zur Ausbreitung von Radionukliden führen könnte.

Hinsichtlich der Langzeitsicherheit eines verschlossenen Einlagerungsbohrlochs wären die zugrunde zu legenden wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen, bzw. die hierbei für die Bohrlochlagerung spezifischen Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse¹⁶ ebenfalls neu zu entwickeln. Dabei wird es als wahrscheinlich angesehen¹⁷, dass in Folge des Kontakts von Behältermaterial und Fluid eine relevante Korrosion bereits nach wenigen Jahrzehnten einsetzt. Im verschlossenen Bohrloch ist als Konsequenz die Bildung erheblicher Wasserstoffgasmengen zu erwarten. Die Auswirkungen der Gasmigration und des resultierenden Gasdrucks auf das Verschlussystem sind für tiefe Bohrlöcher nicht untersucht. Für die Sicherheitsanalyse müssten Wissenslücken zum geochemischen Milieu im tiefen Bohrloch, beeinflusst durch Behälter- und Verrohrungsmaterialien, Bohrlochfluid, Gestein und ggf. Abfallinventar geschlossen werden. Auch die langfristige Einhaltung der Unterkritikalität in einem tiefen Bohrloch mit zahlreichen, vertikal übereinander eingebrachten Behältern mit abgebranntem Kernbrennstoff kann aufgrund dieser Wissenslücken derzeit nicht bewertet werden¹⁸.

4.1.4. Rückholung und Bergung

Die Anforderungen an Rückholung und Bergung müssten zunächst für die tiefe Bohrlochlagerung spezifiziert werden. Nach sinngemäßer Übertragung der BMU Sicherheitsanforderungen von 2010 wird die Rückholung im Sinne der Umkehrbarkeit der Einlagerung eines Abfallbehälters bis zum

¹⁶ engl.: FEP: Features, Events, Processes

¹⁷ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016): Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52, Kapitel 10.2.

¹⁸ a.a.O., Kapitel 10.3.

Zeitpunkt des Verschlusses eines Bohrlochs, unter Einsatz vorhandener Verfahren, als machbar eingestuft. Der Einlagerungszeitraum in ein Bohrloch, und damit die mehr oder weniger unmittelbare Zugänglichkeit der Abfallgebinde, umfasst allerdings nur etwa 3 bis 5 Jahre und ist damit nicht vergleichbar zum Rückholungszeitraum aus einem Endlagerbergwerk. In K-Mat 52¹⁹ wird hierzu dargestellt, dass aufgrund von Erfahrungen aus der konventionellen Bohrtechnik der Betrieb von Bohrlochern über 100 Jahre grundsätzlich möglich ist. Über diesen Zeitraum könnte demnach auch eine Rückholung aus einem offen gehaltenen Bohrloch erfolgen.

Die gemäß BMU Sicherheitsanforderung von 2010 über 500 Jahre erforderliche Bergbarkeit von Behältern wird in K-Mat 52 mit heutigen Kenntnissen als nicht machbar eingestuft. Nach Verschluss des Bohrlochs könnte der eingelagerte Abfall zwar prinzipiell durch Überbohren wieder erreicht und ggf. auch geborgen werden. Letztlich ist aber keine Aussage darüber möglich, ob Behälter und Bohrlochausbau in der Einlagerungstiefe über den geforderten Zeitraum von 500 Jahren ausreichend intakt und lokalisierbar bleiben²⁰.

4.1.5. Empfehlung

Eine Endlagerung in tiefen Bohrlochern könnte prinzipiell eine weiträumige Isolation der Abfälle von der Biosphäre unter Nutzung redundanter und diversitärer geologische Barrieren und langer technischer Verschlussstrecken ermöglichen. Nicht zuletzt wird die große Einlagerungstiefe als Merkmal einer erhöhten Proliferationssicherheit gesehen.

Die Technologie einer Endlagerung in tiefen Bohrlochern erscheint allerdings derzeit nicht so ausgereift wie die Endlagerung in einem Bergwerk. Generell weist die Technik einige von der Kommission als relevant eingestufte Probleme auf, die intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erfordern, und für die die Aussichten auf Machbarkeit unklar sind. Zu nennen ist hier vor allem die Einlagerung der Abfallbehälter in ein Bohrlochbetriebsfluid mit den Konsequenzen der Behälter- und Verrohrungskorrosion und einer relevanten Gasbildung. Zudem besteht Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Bohrtechnologie für die in der Einlagerungstiefe erforderlichen, derzeit nicht verfügbaren Bohrdurchmesser und für die für dieses Form der Endlagerung erforderlichen Abfallbehälter.

Außerdem müsste auf das Konzept der Bergbarkeit verzichtet werden, da es nach derzeitigem Wissenstand als nicht machbar eingestuft wird.

es ist davon auszugehen dass eine Weiterentwicklung der Technologie möglich ist, die dann zu einer anderen Bewertung tiefer Bohrlocher führen könnte. Tiefe Bohrlocher können aber erst dann als Entsorgungsalternative in Betracht gezogen werden, wenn die Technik ausgereift und mindestens ebenso erfolversprechend ist wie die Endlagerung in einem Bergwerk.

Die Kommission empfiehlt, die Entwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik, die derzeit vor allen Dingen in den USA erfolgt, weiter zu beobachten und den erreichten Stand regelmäßig festzustellen, z.B. im Rahmen einer Berichterstattung durch den Vorhabenträger an die Regulierungsbehörde und den deutschen Bundestag. Außerdem erachtet es die Kommission als sinnvoll, auch auf deutscher Seite Forschungsvorhaben zu offenen Fragen wie der spezifischen Behältertechnologie und der an die Bohrlochlagerung zu stellenden Sicherheitsanforderungen angemessen zu fördern. Aufgrund der grundsätzlichen Unsicherheit, ob durch intensive Forschung und Entwicklung der Pfad der tiefen Bohrlocher überhaupt als eine Option für die sichere

¹⁹ Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016): Tiefe Bohrlocher, Februar 2016, K-Mat 52, Kapitel 9.

²⁰ a.a.O., S. 217

Endlagerung erwiesen werden kann, darf die Standortsuche für ein Endlager in einem Bergwerk hierdurch aber nicht eingeschränkt werden.

4.2. Langzeitzwischenlagerung

Unter dem Begriff der Langzeitzwischenlagerung versteht die Kommission die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über einen Zeitraum von mehreren hundert Jahren, unter einem zeitlich nicht festgelegten Verzicht auf die Entwicklung einer endgültigen Entsorgungslösung. Sie grenzt sich insofern durch die zeitliche Dimension ab von der *notwendigen* Zwischenlagerung bis zur Einlagerung in ein betriebsbereites Endlager. Die Langzeitzwischenlagerung ist de facto keine wirkliche Entsorgungsoption. Dennoch könnte sie, über die wahrscheinlich notwendigen Zeiträume von einigen Jahrzehnten hinaus, unter bestimmten Umständen eine von der Gesellschaft zu verfolgende Strategie darstellen.

Kommission ist daher der Auffassung, dass das Thema Langzeitzwischenlagerung hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren Beobachtung bedarf, und hat zu den hiermit verbundenen Fragestellungen ein Gutachten eingeholt²¹.

Eine mehr oder weniger zufällige, sich wiederholende Verlängerung des Betriebs von Zwischenlagern ist keine akzeptable Option für den Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen. Um daher überhaupt als denkbare Strategie in Betracht zu kommen, bedarf eine Langzeitzwischenlagerung über einige hundert Jahre einer bewussten Entscheidung und einer dezidierten Begründung. Sie verschiebt die Frage der Endlagerung in eine sehr weit entfernte Zukunft, in der von der dann lebenden Generation nichts desto trotz eine Entscheidung über die tatsächliche Entsorgung der hoch radioaktiven Abfällen erwartet wird.

4.2.1. Technische Einflussgrößen

Als geplanter Zustand wäre das Gesamtsystem eines Langzeitzwischenlagers auf wahrscheinliche Entwicklungen während einiger hundert Jahre auszulegen. Die Schutzziele wären dabei mit den heutigen identisch: der sichere Einschluss der radioaktiven Stoffe, die Abfuhr der Zerfallswärme und die Einhaltung der Unterkritikalität sowie die Vermeidung unnötiger und die Begrenzung und die Kontrolle unvermeidbarer Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung sind ohne Abstrich auch in Zukunft von einer Langzeitzwischenlagerung zu gewährleisten. Rein technisch erscheint eine Langzeitzwischenlagerung grundsätzlich realisierbar.

Die baulichen Anlagen wären hinsichtlich ihrer Robustheit so auszulegen, dass auch bei einem zeitweisen Ausfall von sicherungs- bzw. sicherheitstechnischen Maßnahmen ihre sicherheitsgerichteten Funktionen bestehen bleiben. Ein wirksames, auf die lange Nutzungsdauer abgestimmtes Alterungsmanagement für die Bauwerke müsste dafür sorgen, dass Bauwerksschäden festgestellt, dokumentiert und verfolgt werden. Darauf aufbauend wären Instandsetzungsmaßnahmen zu planen und durchzuführen. Grundsätzlich könnte auch ein, ggf. mehrfacher, Neubau der Gebäude und Anlagen erforderlich werden.

Hinsichtlich der Auslegung eines Langzeitzwischenlagers gegen Einwirkungen von außen müssten regulatorische Grundlagen geschaffen werden, in denen trotz langfristig zunehmender Unsicherheiten handhabbare Festlegungen zu Art, Höhe und Eintrittshäufigkeit der für die Auslegung zugrunde zu legenden Einwirkungen getroffen werden. Da diesbezügliche Prognosen nicht abdeckend für einige hundert Jahre erfolgen können, müssen die regulatorischen

²¹ TÜV Nord ENSYS, Öko-Institut e.V. (2015). Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle. K-MAT 44.

Rahmenbedingungen so beschaffen sein, dass während der Betriebszeit des Langzeitzwischenlagers die zu unterstellenden Einwirkungen und ihre möglichen Auswirkungen regelmäßig überprüft und ggf. Nachrüstmaßnahmen realisiert werden.

Alle realistisch denkbaren Ausführungsoptionen zur Langzeitzwischenlagerung weisen Vor- und Nachteile auf. Eine zunächst nahe liegende Weiternutzung der bestehenden Zwischenlager hätte den grundsätzlichen Nachteil, dass diese nicht im Hinblick auf Betriebszeiten von einigen hundert Jahren ausgelegt wurden. Sie weisen daher einen Mangel an Flexibilität gegenüber Lastannahmen auf, die aufgrund der langen Lagerzeit deutlich über die heutigen Annahmen hinausgehen, oder die auf zusätzlich zu berücksichtigenden Einwirkungen beruhen. Bei Neubauten könnten dem gegenüber die für erforderlich gehaltenen Anforderungen, einschließlich Reserven, von vorneherein eingeplant werden. Das dazu notwendige technische Regelwerk und der regulatorische Rahmen wären aber noch zu entwickeln.

Übertägige Langzeitzwischenlager böten gegenüber flach untertägigen, also noch oberflächennahen, Bauwerken Vorteile hinsichtlich des Schutzes gegen Überflutungen, sowie hinsichtlich der einfacheren Zuwegung und Instandhaltung. Untertägige Lagereinrichtungen und Tunnellösungen böten gegenüber übertägigen Lagern hingegen Vorteile hinsichtlich der Anlagensicherung und gegen zivilisatorisch bedingte Einwirkungen von außen. Mögliche Aufpralllasten können durch Erdüberdeckungen bzw. Anschüttungen gedämpft werden. Tunnellösungen könnten die Überflutungsproblematik vermeiden.

Stahlbetonstrukturen gelten bereits heute als vergleichsweise langlebig. Es liegen aber keine Erfahrungen über das Alterungsverhalten von Stahlbeton über Zeiträume von mehreren hundert Jahren vor. Im Laufe der Nutzungsdauer würden daher Sanierungen der Betonstrukturen höchstwahrscheinlich notwendig werden.

Die Dichtheit der Lagerbehälter müsste mit Hilfe eines Behälterüberwachungssystems dauerhaft überwacht werden. Handhabungseinrichtungen wie Krananlagen, Flurförderfahrzeuge o. ä. müssten für die Ein- und Auslagerung der Lagerbehälter vorhanden sein und im Hinblick auf ggf. erforderliche Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an den Lagerbehältern während des gesamten Zeitraums der Langzeitzwischenlagerung betriebsbereit zur Verfügung stehen. Für Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen an den Lagerbehältern, insbesondere am Dichtsystem, wäre eine Behälterwartungsstation vorzuhalten. Auch eine sog. "heiße Zelle" inkl. Handhabungsequipment für Instandsetzungsmaßnahmen am Primärdeckeldichtsystem und für ein ggf. erforderliches Umladen des Inventars in einen zweiten Lagerbehälter müsste vorhanden sein. Die Verfügbarkeit der verwendeten Komponenten des Dichtungssystems wäre ebenso dauerhaft sicherzustellen wie die erforderliche Energieversorgung.

Für den Erhalt der Betriebsbereitschaft der technischen Einrichtungen über lange Zeiträume hinweg wäre ein Wartungs- und Instandhaltungskonzept zu entwickeln, das auch den Ersatz nicht mehr verwendbarer Komponenten vorsieht. Da eine Ersatzteilbevorratung für die gesamte Dauer der Langzeitzwischenlagerung nicht realisierbar ist, muss die Fähigkeit erhalten bleiben, diejenigen Bauteile und Baugruppen, die einer Alterung unterliegen, über den Zeitraum der Langzeitzwischenlagerung bei Bedarf nachfertigen zu können. Auch die Möglichkeit eines kompletten Austauschs der technischen Einrichtungen wäre mit zu berücksichtigen, zumal ein sich weiter entwickelnder Stand der Technik zu Nachrüstungsbedarf führen wird.

Die Aufrechterhaltung von Integrität und Handhabbarkeit der Inventare ist eine wichtige Voraussetzung. In der heutigen Nachweisführung zur Sicherstellung der Integrität des Inventars werden einige Aspekte, z. B. chemische Interaktionen, Versprödungsverhalten der Inventare oder Hybrid-Reorientierung, aufgrund des kürzeren Beurteilungszeitraums aus der Betrachtung

ausgeklammert, die für lange Lagerzeiträume neu zu analysieren und in der Folgezeit wiederkehrend zu bewerten wären. Die heute verwendeten Analysemethoden zur Sicherstellung der Inventarintegrität müssten auf ihre Eignung für Langzeitaussagen hin überprüft und ggf. durch neue Bewertungsmethoden ersetzt werden, die ihrerseits erst noch zu entwickeln wären. Die Dokumentation der Inventare und der Behälter müssten so umfassend sein, dass auch nach längerer Zeit eine grundlegende Bewertung mit Basisdaten möglich wäre. Ein wesentlicher Aspekt hierbei ist die generationenübergreifende Speicherung und Auffindbarkeit der Daten sowie der Erhalt ihrer Lesbarkeit.

Aus heutiger Sicht wäre bei der Planung einer Langzeitzwischenlagerung zu unterstellen, dass die Anforderungen an die Integrität und Handhabbarkeit abgebrannter Brennelemente nicht über den gesamten geplanten Lagerzeitraum aufrechterhalten werden können. Es wären daher Konzepte zu entwickeln, die bei Hinweisen auf unerwünschte Schädigungen angewandt werden könnten (z.B. die Brennelemente neu zu verpacken).

Die Sicherung eines Langzeitzwischenlagers gegenüber Dritten erfordert neben baulichen und technischen Sicherungseinrichtungen auch Sicherungspersonal oder staatliche Einsatzkräfte. Dabei wären mindestens die gleichen technischen Einrichtungen und Systeme erforderlich, die zur Sicherung der derzeitigen Zwischenlagerung eingesetzt werden. Hierzu gehören passive Einrichtungen (z. B. verstärkte Wände) und aktive Systeme (z. B. elektronische Überwachungseinrichtungen).

Über einige hundert Jahre hinweg gewinnt außerdem die Auslegung der Anlagen gegenüber Einwirkungen bei kriegerischen Auseinandersetzungen an Bedeutung. Unabhängige Medienversorgung, befristeter personalloser Betrieb, regelmäßiges Update der Maßnahmen gegen Beschuss/Flugkörperabsturz und eine Bevorzugung untertägiger Lagerformen wären die Konsequenzen.

Es wären also bereits in der Planung spezifische, von heutigen Annahmen ggf. abweichende Lastannahmen (inkl. zu unterstellenden Tatmustern, Auslegungstätern, Hilfsmitteln und Tätervorgehen) als Auslegungsgrundlage neu festzulegen, aufgrund des langen Betrachtungszeitraum verbunden mit der Verpflichtung, diese in regelmäßigen Abständen und bei erkanntem Bedarf durch die zuständigen Behörden zu evaluieren. Ob langfristig eine hieraus folgende regelmäßige Ertüchtigung der Sicherungsmaßnahmen technisch möglich ist, so dass auch Angriffe mit verbesserten oder neuartigen Tat- und Hilfsmitteln beherrscht werden können, kann aus heutiger Sicht nicht prognostiziert werden.

4.2.2. Nichttechnische Einflussgrößen und generationenübergreifender Kompetenzerhalt

Bei einer über mehrere Jahrhunderte dauernden Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind nicht nur Fragen der technischen Machbarkeit und Sicherheit in den Blick zu nehmen. Es sind vielmehr auch die Randbedingungen und deren mögliche Änderung zu berücksichtigen, die die Fähigkeit einer Gesellschaft beeinflussen, die mit der Zwischenlagerung verbundenen Aufgaben dauerhaft verantwortungsvoll zu erfüllen.

Der hohe Spezialisierungsgrad der Behältertechnologie, die Wartungsarmut der Behälter selbst und die nach Beendigung der Kernenergienutzung fehlende Inlandsnachfrage können dazu führen, dass bereits in wenigen Jahrzehnten ein Erhalt der erforderlichen Kompetenzen in Deutschland nicht mehr ohne weiteres vorausgesetzt werden kann. Ähnliches gilt für die Fähigkeit zum Umgang mit den hoch radioaktiven Abfällen, sei es im Rahmen von Behälterreparaturen, Umverpackung oder in Zusammenhang mit den auf eine Langzeitzwischenlagerung folgenden

Entsorgungsschritten bis hin zur Realisierung der Endlagerung. Die Verfügbarkeit qualifizierten technischen, wissenschaftlichen und administrativen Personals für eine zukünftige Nischen-Technologie der Langzeitzwischenlagerung kann nicht als sicher gelten. Mit dem Verlust von Know-how können aber Einbußen an der Qualität im Umgang mit den Abfällen einhergehen. Es wäre also eine Herausforderung, die benötigten Kompetenzen in der erforderlichen Qualität über einige hundert Jahre aufrecht zu erhalten.

Demografische Effekte wie Bevölkerungsrückgang und -konzentration in urbanen Räumen können auf lange Sicht auch Fragen der Standortauswahl und der Auslegung von Langzeitzwischenlagern beeinflussen. Je nach Standort wäre beispielsweise der Aufwand für den Erhalt der erforderlichen externen Infrastruktur (Zufahrten, Medienversorgung) auf lange Sicht zunehmend dem Lager selbst zuzurechnen, das ggf. der alleinige Nutzer der Infrastruktur wäre.

Unter regulatorischen Gesichtspunkten wäre eine Langzeitzwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle über einige hundert Jahre, unter Verzicht auf ein aktives Verfahren mit dem Ziel der Endlagerung, mit dem heutigen nationalen und europäischen Rechtsrahmen nicht kompatibel. Eine potenzielle Entscheidung in diese Richtung müsste also eine weitgehende Überarbeitung der atomgesetzlich geregelten Verfahrens- und Verwaltungsgrundlagen inklusive des untergesetzlichen Regelwerkes nach sich ziehen, verbunden mit einer grundsätzlichen Neuorientierung der Sicherheitsphilosophie im Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen. Für die Genehmigung und deren Aufrechterhaltung wird es neuer Konzepte bedürfen, die geeignet sind, mit Genehmigungsvorbehalten umzugehen, die sich aus den langfristig nicht prognostizierbaren Einflüssen auf das Sicherheits- und Sicherungskonzept ergeben.

Sinnvoller Weise müsste eine Langzeitzwischenlagerung in staatlicher Zuständigkeit erfolgen, um die erforderliche Kontinuität zu ermöglichen. Hinsichtlich der mit der Genehmigung und Aufsicht verbundenen Aufgaben läge es aus heutiger Sicht nahe, diese bei einer Behörde auf Bundesebene zu konzentrieren, um Kompetenzen zu bündeln, Schnittstellen zu optimieren und Kosten zu begrenzen. Insofern wären verschiedene Änderungen der heutigen Zuständigkeitsverteilung bei der Zwischenlagerung erforderlich. Die Akteurs- und Meinungsvielfalt im Zusammenhang mit der Langzeitzwischenlagerung wird während eines langfristigen Betriebs sehr wahrscheinlich erheblich schwinden, so dass Prozesse demokratischer Entscheidungsfindung unter Beteiligung von Öffentlichkeit und Stakeholdern kaum möglich sein werden.

Die Finanzierung einer Langzeitzwischenlagerung wirft gegenüber der heutigen Praxis eine Reihe offener Fragen auf, z. B. zum Begriff der Sicherstellung (§ 9a AtG), zur Aufrechterhaltung des Verursacherprinzips, zur rückwirkenden Geltendmachung von Mehrkosten oder zur Umwidmung von Rücklagen, die für die Endlagerung gebildet wurden. Die Kosten für Errichtung, Betrieb und Überwachung der Zwischenlager wären zusätzlich zur Endlagervorsorge aufzubringen. Der derzeit vorhandene Rechtsrahmen des Atomgesetzes bzw. der Endlagervorausleistungsverordnung bedürfte einer entsprechenden Weiterentwicklung.

Unabhängig von der gewählten Ausführungsoption des Langzeitzwischenlagers dürfte der erforderliche Zeitbedarf bis zu seiner Inbetriebnahme mehrere Jahrzehnte umfassen. Gar nicht quantifizierbar ist dabei der vorlaufende Prozess des gesellschaftlichen und politischen Diskurses, der zunächst zu einem Konsens für die Langzeitzwischenlagerung als Paradigmenwechsel gegenüber der heutigen Sichtweise führen müsste. Unter den derzeit gültigen genehmigungsrechtlichen Randbedingungen ist jedenfalls davon auszugehen, dass die Inbetriebnahme eines geplanten Langzeitzwischenlagers nicht mehr während der derzeitigen Laufzeit der bestehenden Zwischenlager möglich wäre.

4.2.3. Empfehlung

Eine heute zu treffende Entscheidung für eine Langzeitzwischenlagerung über einige Jahrhunderte wäre mit dem Eingeständnis verbunden, dass unter den heutigen Sicherheitsanforderungen, der heutigen Risikowahrnehmung und den heutigen gesellschaftlichen Randbedingungen keine Lösung für den dauerhaften Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen gefunden wurde, und dass die hiermit verbundenen Entscheidungen deshalb von zukünftigen Generationen getroffen werden müssten.

Die technischen Randbedingungen einer Langzeitzwischenlagerung sind aus heutiger Sicht zwar vollständig beschreibbar, ihre langfristige Entwicklung über Zeiträume von einigen Jahrhunderten ist aber nur eingeschränkt prognostizierbar. Außerdem werden einige Aspekte gesellschaftlichen Wandels (z. B. Atomausstieg und Demografie) Herausforderungen für den Erhalt eines Langzeitzwischenlagers bilden. Schließlich kann die gesellschaftliche Stabilität, wie aus der Geschichte zu lernen ist, über so lange Zeiträume nicht vorausgesetzt werden. Instabilitäten wie z.B. kriegerische Auseinandersetzungen und Einwirkungen Dritter müssten in der Auslegung eines Langzeitzwischenlagers berücksichtigt werden. Freilich erscheint es schwer vorstellbar, den sicheren Betrieb eines Langzeitzwischenlagers in Phasen schwerer gesellschaftlicher Verwerfungen - wie z. B: einem Zusammenbruch der gesellschaftlichen Ordnung - zu gewährleisten.

Die Planung einer Langzeitzwischenlagerung und die Aufrechterhaltung der Fähigkeit hierzu über Jahrhunderte hinweg wirft eine ganze Reihe von Fragen auf und beinhaltet Unsicherheiten und damit Risiken, die aus heutiger Sicht gegen eine aktive Verfolgung einer solchen Strategie sprechen. Nichts desto trotz mag der Gesellschaft eine Langzeitzwischenlagerung aufgenötigt werden, wenn es nicht gelingt die angestrebte Endlagerung zu realisieren. Die Kommission betrachtet es daher als sinnvoll und notwendig, insbesondere die mit der Alterung von Behältern und Inventaren verbundenen Effekte im Blick zu behalten und hier auch in Zukunft Anstrengungen für weitere Erkenntnisgewinne zu unternehmen.

4.3. Transmutation

Die Kommission hat das Verfahren der Transmutation als ein Thema identifiziert, dass hinsichtlich seiner Relevanz für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe einer weiteren Beobachtung bedarf, und hat zu den mit der Transmutation verbundenen Fragestellungen zwei Gutachten eingeholt²²²³.

Transmutation zielt darauf ab, die beim Betrieb von Kernreaktoren entstehenden langlebigen²⁴ Nuklide der Elemente Plutonium, Neptunium, Americium und Curium (sogenannte Transurane) nach vorheriger Abtrennung (Partitionierung) in stabile oder kurzlebige Nuklide umzuwandeln. Die Transmutation der im abgebrannten Brennstoff ebenfalls vorhandenen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte wird in der Forschung hingegen praktisch nicht verfolgt. In diesem Zusammenhang ist Transmutation auch für eine weitere Behandlung der bereits verglasten hoch radioaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nicht geeignet. Für Brennelemente aus Forschungs- und Prototypreaktoren sind die heute diskutierten

²² Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45.

²³ Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48.

²⁴ unter langlebigen Radionukliden werden in dem hier diskutierten Zusammenhang Nuklide mit Halbwertszeiten von mehr als ca. 10.000 Jahren verstanden, kurzlebige Nuklide haben dementsprechend deutlich kürzere Halbwertszeiten

Verfahren ebenfalls nicht anwendbar, so dass sich die Anwendung des Verfahrens nur auf die Brennelemente aus Leistungsreaktoren bezieht.

Transmutation kann zu einer Verringerung, im besten Fall zu einer Eliminierung des Anteils langlebiger Transurane am endzulagernden Radionuklidinventar führen. Sie ist aber keine Entsorgungsoption zum langfristigen Umgang mit hoch radioaktiven Abfällen, da auch bei optimistischen Annahmen hoch radioaktive bzw. langlebige Abfälle verbleiben, die einer Endlagerung, bedürfen.

4.3.1. Technologisches Gesamtsystem und technischer Entwicklungsstand

Die Umsetzung von "Partitionierung und Transmutation" (oder kurz "P&T") beinhaltet im Wesentlichen drei Schritte: Abtrennung (Partitionierung), Brennstofffertigung und Umwandlung (Transmutation).

Bei der Partitionierung (P) werden die abgebrannten Brennelemente in einer Wiederaufarbeitungsanlage chemisch aufgelöst und die enthaltenen radioaktiven Stoffe in verschiedenen Prozessschritten in mehrere Produktströme separiert. Dabei sind für die Abtrennung der Transurane zwei Verfahren zu unterscheiden. Aus der Wiederaufarbeitung stammt das für die Abtrennung von Uran und Plutonium aus abgebrannten Uranoxid-Brennelementen entwickelte hydrometallurgische PUREX-Verfahren. Um zukünftig auch die sog. Minoren Aktiniden (Neptunium, Americium, Curium) abtrennen zu können, ist eine erhebliche technische Weiterentwicklung erforderlich. Die Machbarkeit einer Abtrennung konnte gezeigt werden. Bisherige Versuche befinden sich aber noch im Labormaßstab. Ob eine großtechnische Umsetzung mit den erforderlichen Wiedergewinnungsfaktoren im Bereich von 99,9% gelingt, ist aus heutiger Sicht offen. In einem noch früheren Entwicklungsstadium befindet sich das Konzept der sog. pyrometallurgischen Verfahren, basierend auf elektrochemischen Methoden bei hohen Temperaturen und unter Ausschluss von Sauerstoff.

Aus den separierten Transuranen werden im nächsten Schritt frische Brennelemente gefertigt. Auch die Entwicklung von Brennstoffen, die neben Plutonium die Minoren Aktinide enthalten, befindet sich noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium – insbesondere für die uranfreien Brennstoffe zum Einsatz in beschleunigergetriebenen Reaktoren (s.u.). Eine Problematik bei Brennelementfertigung, -transport und -handhabung der Transmutations-Brennelemente stellen die hohe Gammastrahlung und die, insbesondere von Curium ausgehende, Neutronenstrahlung dar. Sie erfordern massive Abschirmungen und fernbediente Hantierung und führten bereits zu Überlegungen, auf Abtrennung und Transmutation der Curiumisotope zu verzichten. Für die uranfreien Brennstoffe existieren außerdem noch keine Verfahren zur Abtrennung der Spaltprodukte von der Matrix, so dass über die resultierenden Abfallprodukte hinsichtlich Volumen und Eigenschaften derzeit keine Aussagen möglich sind.

Die frischen Brennelemente werden letztlich in geeigneten Transmutationsreaktoren eingesetzt und dort bestrahlt, um die Transurane zu spalten. Für die Transmutationsreaktoren und deren Brennstoff werden international zwei Konzepte diskutiert. Zum einen sind dies "Schnelle Reaktoren" mit Mischoxid-Brennstoffen, die eine Weiterentwicklung der Schnellen Brüter darstellen. In Frankreich existiert derzeit ein Konzept für einen Prototypreaktor (sog. ASTRID-Reaktor) als Schneller Brüter mit Optimierung für die Transmutation. Zum anderen werden beschleunigergetriebene Reaktoren mit uranfreien Brennstoffen diskutiert, die durch eine externe Neutronenquelle angefahren und gesteuert werden. Solche Anlagen existieren bisher nur als Konzeptstudien. Ein erster beschleunigergetriebener Versuchsreaktor (MYRRHA) soll mit

wesentlicher Förderung durch die Europäische Union in Belgien errichtet werden. Daneben besteht ein Konzept für einen europäischen Prototypen (sog. EFIT-Reaktor).

Die Transmutations-Brennelemente müssten nach erfolgter Transmutation erneut wiederaufgearbeitet werden, um danach den Zyklus erneut zu durchlaufen. Da in jedem Durchlauf nur ein Teil der Transurane umgewandelt werden kann, ergibt sich daraus eine Vielzahl von erforderlichen Umläufen. Zwischen den verschiedenen Schritten sind zudem Zwischenlager und Transporte verschiedener radioaktiver Stoffe erforderlich. Da der Prozess nicht zu einer vollständigen Transmutation der langlebigen Minoren Aktiniden führt, sind im Ergebnis nach wie vor hoch radioaktive sowie erhebliche Mengen schwach- und mittelradioaktive (Sekundär-)Abfälle zu entsorgen.

4.3.2. Zeitrahmen und Kosten

Aufgrund des noch sehr frühen Entwicklungsstadiums erscheinen für die Entwicklung aller notwendigen P&T-Technologien bis zur industriellen Reife aus heutiger Sicht zunächst mindestens vier bis fünf Jahrzehnte erforderlich, ggf. auch deutlich mehr.

Bezogen auf das in Deutschland nach Beendigung der Kernenergienutzung vorhandene Inventar abgebrannter Brennelemente und bei einer angestrebten Reduzierung der darin enthaltenen 140 t Transurane auf 10 % des Ausgangswerts müssten anschließend durchschnittlich zwischen fünf und sieben Transmutations-Reaktoren sowie die erforderliche Infrastruktur zur Wiederaufarbeitung (Partitionierung) kontinuierlich über 150 Jahre in Betrieb sein. Anfänglich könnten aufgrund der großen Menge an Transuranen auch 16 Reaktoren erforderlich werden, nach 100 Jahren noch etwa 3 bis 4 Reaktoren. Gesamt-Betriebszeiten unter 100 Jahren lassen sich theoretisch nur mit deutlich mehr Reaktoren bzw. höheren Reaktorleistungen oder unter der optimistischen Annahme eines höheren Transmutationsanteils pro Zyklus erreichen. Unterstellt man geringere Reaktorleistungen können sich auch Betriebszeiten von 200 bis 300 Jahren ergeben.

Über die Kosten eines P&T-Systems sind derzeit nur sehr grobe Abschätzungen mit großen Bandbreiten möglich. Je nach Konzept wären für Forschung und Entwicklung 25 bis 60 Milliarden Euro zu veranschlagen, für die Bereitstellung der erforderlichen Anlagen weitere 40 bis 350 Milliarden Euro. Die mit Transmutationsanlagen erzeugbare elektrische Energie kann hierzu lediglich einen Deckungsbeitrag liefern.

4.3.3. Auswirkungen auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland

Die Einflüsse einer umfassenden P&T-Strategie auf die Endlagerung können derzeit höchstens qualitativ benannt werden. So könnten das Volumen, das Radionuklidinventar und die Radiotoxizität der hoch radioaktiven Abfälle reduziert werden. Der Flächenbedarf für ein entsprechendes Endlager könnte sich ebenfalls reduzieren, wobei aber das Endlagerkonzept und die Wärmeleistung der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung einen größeren Einfluss auf den Flächenbedarf ausüben als der Anteil der transmutierbaren Radionuklide. Um eine nennenswerte Reduzierung der Wärmeleistung zu erreichen, müssten die durch P&T entstehenden Spaltprodukte nach der Transmutation noch etwa 300 Jahre in einem obertägigen Zwischenlager abklingen.

Der erforderliche Isolationszeitraum für die Endlagerung wird sich nicht verringern, da die potenzielle Dosis, die langfristig aus der Endlagerung resultiert, nicht durch die Transurane sondern durch die für P&T nicht zugänglichen langlebigen Spalt- und Aktivierungsprodukte bestimmt wird. Die Transurane gelten unter Endlagerbedingungen als weitgehend immobil. Die

insgesamt vorhandene Spaltproduktmasse würde sich hingegen erhöhen, je nach Transmutationskonzept sogar in etwa verdoppeln. Daneben ist wesentlich, dass die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung in Form verglaster Abfallprodukte das langlebige Aktivitätsinventar des Endlagers bestimmen und einer Transmutation aus heutiger Sicht nicht zugänglich sind.

Für bestimmte Szenarien des menschlichen Eindringens oder schneller Freisetzungen nach unwahrscheinlichen Entwicklungen kann die durch P&T verringerte Aktivität des endgelagerten Inventars zur Verringerung potentieller Dosisleistungen führen.

Die Menge der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle vergrößert sich durch die bei P&T anfallenden Sekundärabfälle (z.B. Betriebs- und Rückbauabfälle) erheblich um schätzungsweise 150.000 – 170.000 m³. Diese Abfälle besitzen jedoch vergleichsweise geringe Halbwertszeiten. Im aktuellen Nationalen Entsorgungsprogramm Deutschlands gibt es hierfür keinen Endlagerpfad.

Der Zeitpunkt für den Verschluss eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle würde sich deutlich in die Zukunft verschieben, sei es durch eine spätere Inbetriebnahme oder eine längere Offenhaltung. Verbunden wäre dies mit sicherheitstechnischen Konsequenzen und Auswirkungen für die Sicherung.

4.3.4. Sicherheit und Proliferationsrisiken

Die Entwicklung von Transmutationsreaktoren mit gegenüber heutigen Leistungsreaktoren erhöhter Sicherheit stellt eines der Kernziele der aktuellen internationalen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet dar. Allerdings weisen Transmutationsreaktoren spezifische Störfallrisiken auf, die aus dem speziellen radioaktiven Inventar in den Anlagen, den chemischen und physikalischen Eigenschaften der Transmutationsbrennstoffe sowie den Eigenschaften der zur Kühlung vorgesehenen Flüssigmetalle resultieren. Ob eine erhöhte Sicherheit der Transmutationsreaktoren gegenüber heutigen Kernkraftwerken daher tatsächlich erreicht werden kann ist aus heutiger Sicht offen.

Aufgrund der höheren Wärmeentwicklung, der hohen Dosisleistung und der Kritikalitätssicherheit ergeben sich bei P&T teils deutlich höhere Anforderungen an den Transport und die Zwischenlagerung der radioaktiven Materialien. Im Verhältnis zur eingesetzten Tonne Schwermetall wäre im Vergleich zur heutigen Praxis mit einem Vielfachen an Brennelement-Transporten und Handhabungsschritten zu rechnen, verbunden mit erheblichen Anforderungen an den Strahlenschutz insbesondere des Personals.

Im Falle der großtechnischen Umsetzung einer P&T-Strategie in Deutschland würde während der Betriebszeit mit einigen Tonnen abgetrennter Transurane jährlich umgegangen werden, von denen insbesondere Plutonium, aber in geringerem Maße auch Neptunium und Americium zum Bau von Kernwaffen missbräuchlich verwendet werden könnten. Bei den Anlagen zur Wiederaufarbeitung und Brennstoffherstellung, bei denen diese Stoffe separiert gehandhabt werden, bestünden über mehrere hundert Jahre (s.o.) kontinuierlich hohe Anforderungen an die Spaltmaterialkontrollen, aber auch an die Anlagensicherung. Aus diesem Grunde geht die Entwicklung in Richtung einer gemeinsamen Abtrennung der Minoren Aktiniden. Nach erfolgter Transmutation wäre das Risiko einer Proliferation entsprechend reduziert bzw. ausgeschlossen.

Dem gegenüber steht das Szenario einer Wiedergewinnung kernwaffenfähiger Stoffe aus einem Endlager. Dies erfordert die Rückholung oder Bergung der Abfälle und die daran anschließende Abtrennung der gewünschten Spaltstoffe. Diese Maßnahmen sind mit erheblichem Aufwand verbunden, dürften für subnationale Akteure undurchführbar sein und würden durch Maßnahmen der Spaltmaterialüberwachung detektiert werden.

Die Risiken aus der Umsetzung einer P&T-Strategie in einem Zeitraum von ca. 150 – 300 Jahren sind gegenüber einer möglichen Reduzierung potenzieller Risiken in der Langzeitsicherheit eines geologischen Endlagers abzuwägen.

4.3.5. Gesellschaftliche und soziale Randbedingungen für die praktische Umsetzung

Die Nutzung einer P&T Strategie erfordert für die kommenden Jahrhunderte stabile staatliche Verhältnisse inklusive einer entsprechenden Infrastruktur für Wissenserhalt, Ausbildung, Betrieb, Forschung und Entwicklung. Damit würde eine P&T-Strategie die Verantwortung für Behandlung und Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle weitgehend auf die zukünftigen Generationen verlagern.

Eine Entscheidung für die Umsetzung von P&T setzt eine entsprechende Akzeptanz der Bevölkerung voraus, die aufgrund der erforderlichen Zeitdauern für die technische Verwirklichung auch von zukünftigen Generationen getragen werden müsste. Der heutige gesellschaftliche Konsens zum Verzicht auf die Kernenergienutzung in Deutschland müsste aufgehoben werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen im Atomgesetz müssten angepasst und untergeordnete Regelwerke geschaffen werden, um die mit einer P&T-Strategie verbundene großtechnische Plutoniumnutzung in dem oben beschriebenen technologischen Ausmaß zu ermöglichen. Des Weiteren wäre eine Verständigung bezüglich der Finanzierung erforderlich, sowohl im Hinblick auf eine zügige Entwicklung als auch auf eine spätere Umsetzung der Technologien. Selbst eine wie auch immer geartete Beteiligung europäischer Partnerländer wäre mit erheblichen politischen, gesellschaftlichen und regulatorischen Anpassungen verbunden. Im europäischen Raum werden bisher nur in Frankreich und durch die EURATOM konkrete Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten verfolgt.

4.3.6. Empfehlung

Unter Würdigung der oben beschriebenen und in den eingeholten Gutachten beschriebenen Aspekte lassen sich aus der von der Kommission zu bearbeitenden Endlagerthematik keine Argumente ableiten die für eine Entwicklung einer Transmutationstechnologie sprechen. Unter den in Deutschland geltenden Randbedingungen bietet sie keine Vorteile für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, daher ist aus dieser Sichtweise heraus eine aktive Verfolgung einer P&T-Strategie nicht zu empfehlen.

5. Zentrale Einschlussfunktion für radioaktive Abfälle - geologische und/oder technische Barrieren?

Die Langzeitsicherheit jeder Endlagerung basiert darauf, dass eine oder mehrere Barrieren dauerhaft vorhanden sind, die einen Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten und eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre innerhalb des Nachweiszeitraumes von einer Million Jahren verhindern.

Dazu wird immer das gesamte Endlagersystem betrachtet. Für eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen besteht das Endlagersystem aus den eingelagerten Abfallbehältern, dem sie umgebenden Endlagerbergwerk mit seinen technischen und geotechnischen Barrieren, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam und damit im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind.

Für jedes in Deutschland in Frage kommende Wirtsgestein wurden hier oder international bereits entsprechende Endlagerkonzepte entwickelt. In einem Endlagerkonzept wird beschrieben, mit welchen technischen und sicherheitstechnischen Maßnahmen das Ziel des langfristig sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Für eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen sind dabei zwei grundsätzlich unterschiedliche Sicherheitsansätze zum Nachweis des langzeitsicheren Einschlusses möglich, je nachdem ob die maßgebliche Einschlussfunktion einer geologischen Barriere (dem sogenannten einschlusswirksamen Gebirgsbereich) oder einer technischen Barriere (basierend auf langzeitstabilem Behälter und seiner Ummantelung) zugeordnet wird.

5.1. Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG-Konzept)

Für den Nachweis, dass eine geologische Barriere den langzeitsicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten kann, wird ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) innerhalb des Wirtsgesteins um die radioaktiven Abfälle in einem Bergwerk ausgewiesen. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den geotechnischen Verschlüssen (z.B. Schachtverschlüsse, Streckenverschlüsse, Versatzmaterial) den Einschluss der Abfälle sicherstellt. Der ewG stellt hierbei die Hauptbarriere (= geologische Barriere) dar. Als zusätzliche Barrieren sind die geotechnischen Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse, Versatzmaterial) planmäßig vorgesehen. Der Behälter hat beim ewG-Konzept nur eine zeitlich begrenzte Funktion als technische Barriere, auf der insbesondere der Nachweis der Langzeitsicherheit nicht beruhen soll. Ein derartiges Konzept ist vorstellbar für gut geeignete Steinsalz-, Tonstein- und Kristallinformationen mit entsprechend geringer Gebirgsdurchlässigkeit. Es sind je nach örtlicher Situation auch Endlagerkonzepte denkbar, bei denen an einem Standort mehrere räumlich voneinander unterscheidbare einschlusswirksame Gebirgsbereiche ausgewiesen werden.

Das ewG-Konzept wurde in Deutschland vom AkEnd²⁵ entwickelt und seine Anwendbarkeit im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten für Endlager in den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein nachgewiesen. Die Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010²⁶ basieren auf dem ewG-Konzept.

Bei geeigneter Standortauswahl ist es auch nach Auffassung der Kommission möglich, einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich so auszuweisen, dass ein Nachweis seiner Integrität über eine Million Jahre geführt werden kann.

Bei ausreichender Dichtigkeit gelingt dabei der Nachweis eines vollständigen Einschlusses, bei dem bei Erhalt der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum keine Radionuklide den ewG verlassen können. Diese Nachweisstrategie des vollständigen Einschlusses wird bis dato für Standorte im Salzgestein verfolgt.

Alternativ wird im Nachweisverfahren gezeigt, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aufgrund seiner rückhaltenden Eigenschaften während des Nachweiszeitraums Radionuklide mindestens in dem Maße binden kann, dass nur geringfügige Freisetzungen in die Biosphäre zu erwarten sind, die wiederum nicht zu einer Überschreitung von Grenzwerten für die effektive radioaktive Dosis führen können (sicherer Einschluss). Diese Nachweisstrategie des sicheren Einschlusses wird für Standorte im Tonstein verfolgt.

²⁵ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1, dort Kap. 4.1.1.

²⁶ BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010.

Für Kristallingestein wären in Deutschland entsprechende Homogenbereiche mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit oder Konfigurationen in Kombination von Kristallin mit einem überlagernden ewG (z.B. einer Salzschiefer) ²⁷ auszuweisen, an denen ein Nachweis des vollständigen oder sicheren Einschlusses geführt werden könnte. Dabei sind auch Konzepte denkbar, in denen ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich nicht für das Endlager in seiner Gesamtheit, sondern für kleinere Einheiten des Endlagers definiert wird.

Bei geeigneter Standortauswahl im Salz und im Tonstein ist es auch nach Auffassung der Kommission möglich, einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich so auszuweisen, dass ein Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagersystems über eine Million Jahre geführt werden kann. Aufgrund des ungenügenden Kenntnisstands zu den Kristallinvorkommen in Deutschland kann die Kommission derzeit nicht bewerten, wie erfolgversprechend die Suche nach einem Kristallinstandort zur Umsetzung eines ewG-Konzeptes in Deutschland ist.

Beim ewG-Konzept haben die Behälter die Aufgabe, während des Endlagerbetriebes (wenige Jahrzehnte) die Rückhaltung von Radionukliden bis zur Wirksamkeit von anderen geotechnischen und der geologischen Barriere nach Verschluss des Endlagers zu gewährleisten sowie eine sichere Handhabung der Abfallbehälter unter Strahlenschutzbedingungen zu ermöglichen. Dieselben Sicherheitsfunktionen werden von den Behältern während eines festgelegten Zeitraumes für eine (eventuelle notwendige) Rückholung in der Betriebsphase gefordert. Nach Verschluss des Endlagers sollen die Abfälle bis zu 500 Jahre bergbar sein, woraus sich Anforderungen an die mechanische Stabilität des Behälters und seine Korrosionsbeständigkeit ergeben. Ab dem Zeitpunkt, nach dem die Bergbarkeit keine Anforderung mehr ist, muss der Behälter im ewG-Konzept keine Barrierefunktion mehr übernehmen, da die Langzeitsicherheit des Endlagersystems durch die Integrität des ewG nachgewiesen wird und im Sicherheits- und Nachweiskonzept von langzeitigen Eigenschaften der Behälter kein Kredit genommen werden soll. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zum nachfolgend beschriebenen sogenannten "Behälterkonzept" dar.

5.2. Konzept der langzeitsicheren technischen Barrieren (Behälterkonzept)

Wenn das Wirtsgestein keine ausreichende Barriere darstellt (z.B. bei einem klüftigen Kristallingestein), dann müssen technische Barrieren den Einschluss der Abfälle sicherstellen. Im sogenannten Behälterkonzept ist diese Barriere in erster Linie ein Abfallbehälter, der langfristig entsprechend dicht sein muss. Damit er diese Funktion auch über den Nachweiszeitraum von bis zu einer Million Jahre übernehmen kann, wird er zusätzlich mit einer Schutzschicht (dem sogenannten "Buffer"), bestehend aus einer mehrere Dezimeter dicken, quellfähigen Bentonitschicht, angeordnet.

Das Behälterkonzept wird bereits heute bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Kristallingestein (z.B. in Schweden) zugrunde gelegt. Dabei übernimmt der Behälter über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre die wesentliche Barrierefunktion. Anforderungen an die Rückholbarkeit während des Betriebs und eine sich anschließende Phase der Bergbarkeit nach Verschluss des Endlagers sind gleichermaßen zu berücksichtigen. Der Behälter ist also im Unterschied zum ewG-Konzept nicht nur für die Betriebsphase des Endlagers und einen nachfolgenden Bergbarkeitszeitraum sicherheitsrelevant, sondern für den gesamten Nachweiszeitraum.

²⁷ Konfigurationstyp Bb nach AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, K-MAT 1, S. 131ff.

Als Behälter sind in derartigen Endlagerkonzepten derzeit Kombinationen aus mechanisch stabilen Innenbehältern aus Sphäroguss und korrosionsbeständigen Außenbehältern aus dickwandigem Kupfer vorgesehen. Zusätzlich wird der Behälter im Einlagerungshohlraum mit einer Bentonitschicht, dem "Buffer", ummantelt. Bentonit ist ein stark quellfähiger Ton, der bei Zutritt von Feuchtigkeit quillt und dadurch den eingeschlossenen Behälter gegenüber Einwirkungen aus seiner unmittelbaren Umgebung abschottet. Nach dem Quellen ist die Durchlässigkeit des Buffers sehr gering (ca. $k = 10^{-11}$ m/s bis 10^{-12} m/s), eine potenzielle Migration von Stoffen (e.g. Radionukliden) durch den Buffer ist auf Diffusionsvorgänge beschränkt. Voraussetzung ist, dass das als Buffer eingesetzte Bentonitprodukt²⁸ sorgfältig und mit einer ausreichenden Dichte um die Abfallbehälter herum eingebaut wird, und dass unmittelbar im Bereich des Buffers keine oder nur geringfügige Erosionsvorgänge zu erwarten sind.

Das umgebende Wirtsgestein hat beim Behälterkonzept die Aufgabe, die mechanische Stabilität der Einlagerungshohlräume während der des Endlagerbetriebs sicher zu stellen. Die Tiefenlage des Endlagerbergwerks verweist dabei in erster Linie auf den Schutz der eingelagerten Abfälle gegenüber exogenen Einflüssen (Eiszeiten, Erosion). Das Wirtsgestein übernimmt nicht, oder nicht maßgeblich, die Aufgabe, während des Nachweiszeitraums einen Kontakt mit Wasser oder einen Radionuklidaustrag zu verhindern. Diese Funktionen werden für den Langzeitsicherheitsnachweis hauptsächlich von Behälter und Buffer wahrgenommen.

Trotzdem wird man auch bei einem Endlagerkonzept, dem das Behälterkonzept zugrunde liegt, eine Wirtsgesteinsformation auswählen, die ein relativ hohes Isolationsvermögen gegenüber Einflüssen aus der Biosphäre hat. Derartige Kombinationswirkungen lassen sich für einen Nachweis der Langzeitsicherheit des Endlagersystems nutzen. Der Nachweis des sicheren Einschlusses beruht dann auf einer integrierten Betrachtung des Zusammenspiels von technischen und geotechnischen Barrieren und Wirtsgesteinseigenschaften. Dabei wird z.B. im schwedischen Sicherheitsnachweis darauf abgezielt, dass ein geringer Prozentsatz an Behälterversagen während des Nachweiszeitraums nicht ausgeschlossen werden kann, dass dieser aber nur zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre unterhalb von Grenzwerten führen darf.

5.3. Stellung von ewG-Konzept und Behälterkonzept im Standortauswahlverfahren

Nach Auffassung der Kommission hat das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs den Vorteil, dass es hinsichtlich der nachzuweisenden Langzeitsicherheit auf geologischen Eigenschaften des Endlagersystems basiert, die an geeigneten Standorten als vergleichsweise solide prognostizierbar angesehen werden können. Technische und geotechnische Barrieren können die Robustheit des Endlagersystems erhöhen, die geforderte Langzeitsicherheit ist im Nachweisverfahren hiervon aber nicht abhängig. Demgegenüber ist das Vertrauen auf eine i. W. technisch begründete Langzeitsicherheit bei dem in Rede stehenden Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zunächst geringer als das gegenüber einer geowissenschaftlich begründeten Prognose. Nicht umsonst ist der Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ursprünglich aus dem ewG-Konzept und einer auf Geologie basierenden Nachweisführung abgeleitet worden.

Für die Kommission ist also das ewG-Konzept hinsichtlich seiner Nachweissicherheit das robustere. Dabei erscheinen Endlagerkonzepte, deren Langzeitsicherheit auf der Ausweisung

²⁸ Es werden international verschiedene Mischungen und Produktformen entwickelt.

eines (oder mehrerer) einschlusswirksamer Gebirgsbereiche basiert, in Deutschland grundsätzlich in allen drei diskutierten Wirtsgesteinstypen realisierbar, vorausgesetzt es werden geeignete Standorte gefunden. Das Informationsdefizit hinsichtlich der deutschen Kristallinvorkommen gegenüber den vorhandenen Vorkenntnissen zu Salz- und Tonsteinformationen macht sich hierbei nachteilig bemerkbar. Hier bedarf es in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens der Abhilfe: Es ist nicht akzeptabel einen Wirtsgesteinstyp rein aufgrund von Defiziten im Kenntnisstand frühzeitig aus dem Auswahlverfahren auszuschließen.

Die Kommission schließt, mit Blick auf die in anderen europäischen Staaten, insbesondere in Skandinavien, verfolgten Endlagerprojekte auf Basis des Behälterkonzepts nicht aus, dass ein solches Konzept auch in Deutschland zu realisieren wäre, dies würde aber einen Perspektivwechsel in der Nachweisphilosophie hinsichtlich der Langzeitsicherheit voraussetzen. Aufrecht zu erhalten wäre dabei der Anspruch zu zeigen, dass ein auf Behältertechnologie, Buffer und geotechnischen Barrieren basierender Langzeitsicherheitsnachweis zu einer gleichwertigen Sicherheitsaussage führt. Entsprechende Untersuchungen zum Behälterkonzept und einem darauf angepassten Sicherheits- und Nachweiskonzept wären für deutsche Standorte noch durchzuführen, könnten dabei aber auf den Entwicklungen in Skandinavien aufsetzen. Denkbar sind in diesem Zusammenhang insbesondere auch kombinierte Konzepte, die vorhandene einschlusswirksame Eigenschaften des Wirtsgesteins mit technischen Barrieren kombinieren und in dieser Kombination eine weitere Nachweismöglichkeit für den langzeitsicheren Einschluss eröffnen. Bei einer Betonung der Funktion der technischen Barrieren für die Langzeitsicherheit wären auch nicht nur Eignungsprognosen für Kristallinstandorte betroffen: Behälterkonzepte lassen sich grundsätzlich in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen realisieren, also auch in Salz- oder Tonsteinformationen. Sie sind nicht auf den Wirtsgesteinstyp Kristallin beschränkt.

6. Endlagermonitoring

Endlagermonitoring dient dem Zweck, den Zustand der geologischen Formation, der hydrogeologischen Verhältnisse und der Abfälle, bzw. die Auswirkungen des Endlagers auf seine Umgebung in den verschiedenen Etappen der Endlagerung systematisch zu beobachten. Hierbei wird in den verschiedenen Etappen der Endlagerung zu unterschiedlichen Zeitpunkten eine Vielzahl an Methoden zur Anwendung kommen.

Die ständige Beobachtung des Endlagersystems, seiner Komponenten und seiner Umgebung dient während des gesamten Prozesses der frühzeitigen Entdeckung möglicher Fehlentwicklungen oder unvorhergesehener Verläufe, um ggf. daraus Konsequenzen ziehen und Fehlerkorrekturen einleiten zu können (im Extremfall bis hin zur Rückholung oder Bergung von radioaktiven Abfällen). Sie dient auch zur Optimierung der jeweils anstehenden geotechnischen Schritte, z.B. der Auslegung der verschiedenen Verschlussbauwerke, und nicht zuletzt der regelmäßigen Überprüfung der Annahmen und Informationen, auf denen die Sicherheitsnachweise für Errichtung, Betrieb und Nachbetriebsphase des Endlagers beruhen.

Für das Monitoring muss festgelegt werden, welche Parameter an welchem Ort zu beobachten sind, da dies Auswirkungen auf die Auslegung der Techniken für das Monitoring (Sensoren und Datenübertragung an die Oberfläche) hat. Zumindest sollten dies die Parameter sein, die für die Sicherheitsüberlegungen relevant sind, z.B. in Bezug auf die Wirksamkeit der geologischen und technischen Barrieren. Die Monitoring-Parameter können erst festgelegt werden, wenn mögliche Endlagerstandorte in Verbindung mit den jeweiligen Endlagerkonzepten ausgewählt sind, im Detail kann die Festlegung erst anhand der letztlich getroffenen Standortentscheidung erfolgen.

Bei einem Monitoring muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen dem Bestreben, die sicherheitsrelevanten Parameter für ein Endlager möglichst vollständig zu überwachen und der Tatsache, dass mit eingebauten Sensoren/Messgeräten und damit verbundenen Kabeln auch potentielle Schwachstellen für Wasserzutritte geschaffen werden, z.B. für die Informationsübertragung aus dem Inneren einer verschlossenen Strecke. Dieser Konflikt wird verschärft, wenn das Monitoring nach Verschluss des gesamten Bergwerks weitergeführt werden soll. An dieser Stelle besteht ein Zielkonflikt: Einerseits kann ein unvollständiger Verschluss eine Schwachstelle für die Sicherheit bedeuten. Andererseits kann durch ein Monitoring ein Sicherheitsgewinn im Fall unerwarteter Entwicklungen eintreten. Dieser Zielkonflikt wird voraussichtlich in Zukunft aufgelöst oder zumindest abgeschwächt werden, wenn technische Entwicklungen zur kabellosen Datenübertragung, die heute noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium sind, neue Monitoring-Möglichkeiten mit sich bringen werden.

Um die Beobachtungen in einem möglichst umfassenden zeitlichen Rahmen interpretieren zu können, muss das Monitoring der geologischen Formation bereits mit der Festlegung der Standorte für die untertägige Erkundung beginnen. Hierdurch werden Informationen zum Ausgangszustand des Systems erhoben, mit denen die bei der weiteren Entwicklung des Endlagersystems gewonnenen Daten verglichen werden können. Um spätere Hebungs- oder Absenkungsvorgänge bestimmen zu können, ist beispielsweise eine frühzeitige Einrichtung von dauerhaft gesicherten geodätischen Festpunkten zur Vermessung der Geländeoberfläche eine der ersten nach Ausweisung eines Standorts für die untertägige Erkundung notwendige Maßnahme des Endlagermonitoring.

Mit der Einrichtung untertägiger Anlagen (zunächst zur Erkundung, nach erfolgter Standortentscheidung dann zu Einrichtung des Endlagers) werden weitere Monitoring-Einrichtungen installiert und betrieben werden, mit denen beispielsweise Spannungszustände und ihre Entwicklung oder die Bildung potenzieller Wasserwegsamkeiten überwacht werden. Die Einlagerung der Abfälle wird zusätzliche und andere Monitoring-Aktivitäten in Bezug auf die Endlagergebäude und ihre Einlagerungsumgebung nach sich ziehen. Mit dem Verschluss von Einlagerungsbereichen und später dem Verschluss des Endlagers werden Entscheidungen über den Einbau von Messgeräten zur Gewinnung spezifischer Daten (beispielsweise über die Temperaturentwicklung, einen Wasserzutritt, über Gasbildung oder eine Radionuklidfreisetzung in den Nahbereich), aber auch zur Übertragung der Daten nach außerhalb zu treffen sein. Für das Monitoring verschlossener Bereiche besteht dabei eine zeitliche Begrenzung entsprechend der Lebensdauer der eingesetzten Geräte. Daher werden für eine längerfristige Überwachung des Endlagerstandorts indirekte Beobachtungen (z.B. der Geländeoberfläche, des Grundwassers im Deckgebirge oder der planmäßigen Außengrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) an Bedeutung gewinnen.

Das Endlagermonitoring macht also während des gesamten Prozesses eine Entwicklung mit, die parallel zu den Etappen der Endlagerung verläuft. Dabei werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Informationen anfallen, die ausgewertet und hinsichtlich ihrer Bedeutung für Sicherheit des Endlagers interpretiert werden müssen. Anhand der Informationen aus dem Monitoring kann die fortdauernde Funktionstüchtigkeit eines Endlagersystems während der verschiedenen Etappen seines Entstehens und seiner Existenz demonstriert und damit das Vertrauen in die Richtigkeit der getroffenen Entscheidungen gestärkt werden. Das Endlagermonitoring wird damit auch zur technisch/wissenschaftlichen Entscheidungsgrundlage zur Fehlererkennung. In diesem Zusammenhang sind Maßstäbe zu entwickeln um zu unterscheiden, wann Abweichungen vom jeweiligen Erwartungswert als Fehler einzustufen sind, die das Ergreifen von Fehlerkorrekturmaßnahmen erforderlich machen.

Ein aktives Endlagermonitoring ist dabei bis mindestens zu dem Zeitpunkt erforderlich, zu dem die Bergbarkeit der Behälter auslegungstechnisch endet. Es ist nicht möglich, für diese langfristige Überwachung Methoden vorzugeben, es ist aber bereits heute der Anspruch zu formulieren, dass die Überwachung des Endlagers sich in allen Etappen an dem für ein Endlagermonitoring jeweils verfügbaren Stand von Wissenschaft und Technik orientieren muss, und dass diesbezüglich auch eine zielgerichtete Weiterentwicklung der Methoden zur Überwachung der Sicherheit des Endlagers gefördert werden muss. Da es darüber hinaus keinen definierten Endpunkt der Überwachung des Endlagers geben kann, ist zu erwarten, dass eine über die Existenz des Endlagers informierte Gesellschaft auch langfristig den Endlagerstandort bzw. die ihn umgebenden Schutzgüter (z.B. Oberfläche, Grundwasser) beobachten wollen wird. Mit welchen Methoden dies geschehen wird, bleibt der Zukunft überlassen, über eine vorsorgende Dokumentation können hierfür die Grundlagen künftige Generationen übergeben werden.

7. Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System

7.1. Einführung

Die Gestaltung des Endlagerprozesses als selbsthinterfragendes System verfolgt, ebenso wie das Prozessmonitoring, die Zielsetzung, die langfristige, sicherheitsrelevante Aufgabe kontinuierlich auf höchstem Sicherheitsniveau zur Vermeidung von Fehlern und unerwünschten Entwicklungen durchzuführen. Im Verhältnis zum Prozessmonitoring schafft das selbsthinterfragende System – vereinfacht gesprochen – überhaupt erst die Voraussetzungen, dass die durch Prozess begleitende Beobachtung, Reflexion und Evaluation gewonnenen Erkenntnisse und Einsichten von den handelnden Akteuren auf- und angenommen werden. Darüber hinaus sind selbsthinterfragende Systeme durch eine kontinuierliche Selbstreflexion gekennzeichnet.

Die AG 3 hat sich in ihrer 20. Sitzung am 23.03.2016 durch den Arbeitspsychologen Prof. Oliver Sträter²⁹ über wesentliche Aspekte selbsthinterfragender Systeme informieren lassen. Die folgenden Ausführungen basieren auf seinem Vortrag und der in der 20. und 21. Sitzung der AG 3 geführten ausführlichen Diskussion des Themas.

Aus psychologischer Sicht bestehen verschiedene Faktoren, die eine hinterfragende Haltung erschweren oder beeinträchtigen. Hier sind beispielsweise das Ausblenden von Informationen, die nicht ins eigene Bild passen, sowie das Abwerten von Informationen, die dem eigenen Konzept widersprechen, zu nennen. Die Implementierung und der Erhalt eines selbsthinterfragenden Systems ist daher kein „Selbstläufer“ sondern bedarf einer kontinuierlichen Aufmerksamkeit und organisatorischen Verankerung. Grundsätzlich sind dabei die drei Ebenen (1) Individuum, (2) Institution (intern) und (3) intraorganisationale Beziehungen (System) zu betrachten. Diese sind zwar untrennbar miteinander verbunden, sind aber auch in ihrer jeweiligen spezifischen Ausprägung und Wirksamkeit zu betrachten und zu entwickeln. Die nachfolgenden Ausführungen gelten in besonderem Maße sowohl für die Institution(en) des Betreibers als auch des Regulators, die Treiber und Hauptakteure des Endlagerprozesses sind. Grundsätzlich sollten sich aber auch alle anderen beteiligten Institutionen, beispielsweise der Forschung oder wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Begleitung, daran orientieren.

²⁹ Beratungsunterlage zur 20. Sitzung der AG 3 am 23. März 2016. Vortrag zum Thema „Selbsthinterfragende Systeme“. Präsentation von Prof. Dr. habil. Oliver Sträter. K-Drs./AG3-117

7.2. Ebene des Individuums

Auf der Ebene des Individuums bestimmen individuelle kognitive Aspekte die Wahrnehmung und den Umgang mit Informationen. Mittels etablierter Methoden (beispielsweise Workload Management) können die kognitiven Fähigkeiten der Informationsverarbeitung und die Fähigkeit zur Selbsthinterfragung geschult werden. Letztendlich werden aber die Möglichkeiten solcher Schulungen an ihre Grenzen gelangen, wenn eine Bereitschaft (oder Fähigkeit) zu einem reflektierenden Verhalten und zur Offenheit für andere Meinungen bei Mitarbeitern nicht vorhanden oder gering ausgeprägt ist. Insbesondere (aber nicht nur) bei der Auswahl von Führungspersonal sind daher entsprechende persönliche Eigenschaften der Kandidaten als Einstellungskriterium und als Ziel der persönlichen Weiterentwicklung zu berücksichtigen.

7.3. Ebene der Institutionen

Das individuelle Verhalten in der Bereitschaft zur Reflexion und selbstkritischem Hinterfragen wird durch die organisatorischen Randbedingungen der jeweiligen Institution geprägt, die sich durch die Organisationsstrukturen einerseits und die Organisationskultur andererseits manifestieren.

Unter dem Stichwort „Sicherheitskultur“ wurden in den letzten zwei Jahrzehnten im Kontext sicherheitsrelevanter Technologien Ansätze für eine reflektierende Kultur entworfen, in Institutionen implementiert und weiterentwickelt, die auch von den Endlagerinstitutionen aufzunehmen und anforderungsgerecht zu adaptieren sind.³⁰ Da sich eine Kultur per se nicht verordnen lässt, spielt das Commitment (die Selbstverpflichtung) einer Institution eine erhebliche Rolle. Ergänzend bedarf es aber auch geeigneter Prüfmechanismen, beispielsweise in Form von Überprüfungsprozessen oder Reviews, die Außenstehenden und der Öffentlichkeit Anhaltspunkte für die tatsächlich vorhandene Sicherheits- oder Selbstreflexions-Kultur der handelnden Institutionen geben. Diese Überprüfungsprozesse können sich nicht auf die klassische „Aufsicht – Betreiber“ Interaktion beschränken, da auch innerhalb der für die Regulierung und Aufsicht zuständigen Behörde(n) eine Sicherheits- oder Selbstreflexions-Kultur zu etablieren und für Überprüfungsprozesse zugänglich zu machen ist. Der Frage der Überprüfungsprozesse widmen sich die weiter unten folgenden Ausführungen zur intraorganisationalen Organisation.

Ein selbsthinterfragendes System setzt des Weiteren voraus, dass die beteiligten Institutionen eine Kultur entwickeln und pflegen, die nicht von dem Ziel geprägt ist, als geschlossene Einheit aufzutreten und sich im ungünstigsten Fall im Sinne einer „Wagenburgmentalität“ hinter den eigenen Erkenntnissen, Meinungen und Anschauungen zu verschanzen. Dies gilt sowohl für einzelne Organisationseinheiten innerhalb einer Institution, insbesondere aber auch für die Institution als Ganzes. Vielmehr sind innerhalb der Institutionen Anreize zu schaffen, sich nach außen zu öffnen, andere Meinungen zu hören und zu reflektieren und sich aktiv und offen an (wissenschaftlichen) Diskussionen auf unterschiedlichen Ebenen zu beteiligen, um die eigenen Positionen kontinuierlich zu reflektieren und weiterzuentwickeln. Institutionen können eine solche Arbeitsweise unterstützen, indem sie beispielsweise die dialogischen Kompetenzen der Mitarbeiter fördern, diese in den Programmen für die Personalentwicklung verankern und in den Kriterien zur Leistungsbewertung reflektieren. Dabei ist zu vermitteln, dass das faire auf einander Eingehen und die Auseinandersetzung mit Argumenten Vorrang vor der Durchsetzung der eigenen Position haben.

³⁰ Zur Implementierung der Sicherheitskultur seitens der Regulierungs- und Aufsichtsbehörden siehe aktuell auch: Nuclear Energy Agency (OECD/NEA): The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body. NEA No. 7247, Paris, 2016

Die Bereitschaft von Mitarbeitern oder Organisationseinheiten, sich mit einer Meinungsvielfalt auseinanderzusetzen und auf gesellschaftliche Bedürfnisse einzugehen, wird nur dann erreicht werden, wenn die Arbeiten nicht unter ständigem Zeitdruck erfolgen. Für entsprechende Bedingungen kann einerseits das verantwortliche Leitungspersonal sorgen, beispielsweise durch eine quantitativ und bezüglich der verfügbaren Kompetenzen geeignete personelle Ausstattung. Andererseits werden sie aber auch durch die prozeduralen Vorgaben (zulässige Dauer von Verfahrensschritten etc.) bestimmt.

Die Organisationsstruktur einer Institution hat erheblichen Einfluss auf die Realisierung der materiellen Ziele sowie auf die Entwicklung der gewünschten kulturellen Eigenschaften. Die Organisationslehre verfügt über ein breites Portfolio an Methoden, um Prozesse und Abläufe innerhalb von Organisationen zu überprüfen und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Diese sind mit der gebotenen Sorgfalt anzuwenden, um Verunsicherungen der Mitarbeiter, die mit organisatorischen Veränderungen in der Regel einhergehen, zu minimieren.

7.4. Intraorganisationales System und Beziehungen

Das Gesamtsystem der am Endlagerprozess beteiligten Institutionen, Gruppen und Individuen stellt einen komplexen Problemraum dar, der sich aus den Interessen und Zielen der verschiedenen Beteiligten gestaltet. Im Sinne des selbsthinterfragenden Systems ist diese Situation durchaus auch positiv zu sehen, da vor allem eine Vielfalt von Meinungen und Zielen die Voraussetzungen dafür schafft, Positionen, Planungen oder Strukturen zu hinterfragen und gegebenenfalls nachzusteuern.

Da es sich bei der geologischen Endlagerung um eine hochspezialisierte Thematik handelt, die von einer überschaubaren Zahl von Fachleuten, Betroffenen und Interessierten bearbeitet wird, ist es im Sinne des selbsthinterfragenden, lernenden Systems von besonderer Bedeutung, dass Gelegenheiten zum Austausch geschaffen und genutzt werden. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auch auf den Erhalt der Vielfalt der Positionen zu legen, was bedeutet, dass kritischen Positionen Raum gegeben und auf ihre unvoreingenommene Würdigung im weiteren Prozessverlauf geachtet wird.

Auch ist bei der Gestaltung des institutionellen / organisationalen Gesamtsystems darauf zu achten, dass nicht bei einer einzelnen Institution Kompetenzen oder Entscheidungsbefugnisse in einer Weise gebündelt werden, die die Überprüfbarkeit und gegebenenfalls die Fehlerkorrektur getroffener Entscheidungen verhindert. Dazu sind innerhalb des Gesamtsystems Antagonismen zu etablieren, die sich beispielsweise durch eine Verteilung von Entscheidungsbefugnissen oder durch einen gezielten Kompetenzaufbau und –erhalt, der die Herstellung „gleicher Augenhöhe“ zum Ziel hat, manifestieren.

Ein organisationales Gesamtsystem, das den genannten Anforderungen gerecht wird, wird sich über die Zeit verändern, weiterentwickeln und flexibel an die jeweiligen Erfordernisse anpassen. Für den Beginn des Standortauswahlverfahrens sind folgende Maßnahmen zu beachten bzw. zu etablieren:

Das Gesamtsystem muss in Bezug auf die Anzahl, Zuständigkeiten und Interaktionen der beteiligten Institutionen so gestaltet sein, dass es für Beteiligte und Externe überschaubar ist und es nicht zu einer Selbstblockade aufgrund unklarer oder konfligierender Kompetenzen kommt. Nachvollziehbare Strukturen und Zuständigkeiten ermöglichen auch Fachleuten und andern Interessierten, die nicht unmittelbar in den Prozess involviert sind, ihre Anliegen und Beiträge an geeigneter Stelle zu adressieren.

In diesem Gesamtsystem ist auch die Öffentlichkeit als Akteur zu berücksichtigen, der in den verschiedenen Phasen des Auswahlverfahrens unterschiedliche Möglichkeiten und Rechte der Beteiligung haben wird. Dies muss transparent und nachvollziehbar sein, um eine Beteiligung nicht aufgrund unklarer Bedingungen zu erschweren oder zu verhindern.

Im selbsthinterfragenden System ist eine nicht unmittelbar als Akteur in das Auswahlverfahren involvierte wissenschaftliche Instanz von wesentlicher Bedeutung. Diese Funktion ist von einem wissenschaftlichen Beirat auszuüben, der dem nationalen Begleitgremium zugeordnet wird, (um eine ausufernde Vielfalt von Einzelakteuren zu vermeiden). Dieser Beirat kann eigene wissenschaftliche Expertise unmittelbar oder in Reaktion auf seitens des Betreibers vorgelegte Berichte in das Verfahren einbringen.

Der wissenschaftliche Beirat sorgt darüber hinaus dafür, dass die oben beschriebenen Anforderungen an die Gewährleistung und Berücksichtigung von Meinungsvielfalt eingehalten werden, und fordert bei Bedarf entsprechende Maßnahmen ein.

Zur Förderung der wissenschaftlichen Vielfalt ist darauf zu achten, dass Forschungsmittel einer Vielzahl von Forschungsorganisationen zur Verfügung gestellt werden und eine Einengung auf wenige Einrichtungen vermieden wird. Hier kommt dem wissenschaftlichen Beirat eine Rolle als Kontrollorgan über die Vergabestellen zu, im Rahmen derer er die Gewährleistung von Vielfalt in der Forschung einfordern kann.

Neben der wissenschaftlichen Begleitung des Auswahlprozesses durch den wissenschaftlichen Beirat ergibt sich in verschiedenen Zusammenhängen der Bedarf, auch die Gewährleistung geeigneter organisatorischer Randbedingungen unabhängig zu begleiten. Dies betrifft zum einen die oben genannten Überprüfungsprozesse für die Sicherheits- und Selbstreflexionskultur in den beteiligten Institutionen. Zum anderen ist aber auch regelmäßig zu hinterfragen, ob das institutionelle Gesamtsystem anforderungsgerecht aufgestellt ist.

Diese Aufgaben können ebenfalls durch den wissenschaftlichen Beirat wahrgenommen werden, wenn dieser über die entsprechenden Kompetenzen in der Organisations- und Prozessorganisation verfügt. Alternativ hierzu wäre ein eigener Beirat einzurichten, der über spezifische Kompetenzen in der Organisations- und Prozessorganisation verfügt.

Für den fachlichen Austausch ist eine jährliche Kolloquiumsreihe zu etablieren, die darauf ausgerichtet ist, die Meinungsvielfalt abzubilden und die fachliche Auseinandersetzung zu fördern. Die jährlichen Dokumentationen der Tagungen stellen im Laufe der Zeit einen Informationsfundus dar, der zur kritischen Reflexion beiträgt.

Neben den genannten Tagungsbänden trägt eine Schriftenreihe mit periodischen Fachberichten zum Wissenserhalt und –transfer bei.

8. Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien

Zur Frage der geowissenschaftlichen Kriterien hat das Öko-Institut mit Stand Jahresende 2015 einen Zwischenbericht³¹ vorgelegt, in dem der bis dato in der AG 3 erreichte und in verschiedenen, teils divergierenden Beiträgen der AG 3 Mitglieder enthaltene Diskussionsstand zusammengestellt. Er wurde als Grundlage für Erstellung einer Workshop-Unterlage für die Online-Kommentierung

³¹ Öko-Institut (2015). Zwischenbericht: Dokumentation zum Thema: Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Gutachtens „Fragen der Standortauswahl“. 05.01.2016.

und den Fachworkshop der Endlagerkommission am 29. und 30.01.2016 in Berlin verwendet und anschließend von der AG 3 für die Auswertung der Workshop-Beiträge und für die weitere Entwicklung des geowissenschaftlichen Kriterienkatalogs genutzt. Die nachfolgenden Kapitel geben diesen Zwischenbericht noch einmal wieder.

Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass es sich bei dem hier dokumentierten Diskussionsstand um den Stand zum Jahresende 2015 handelt, der im Rahmen der weiteren Befassung der AG 3 mit dem Thema der geowissenschaftlichen Kriterien mit Unterstützung durch das Öko-Institut eine iterative umfassende Weiterentwicklung³² erfahren hat.

8.1. Ziel

Die Endlagerkommission hat gemäß § 4 Abs. 2 (2) des Standortauswahlgesetzes die Aufgabe,

„geowissenschaftliche ... Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung sowie wirtsgesteinsspezifische Ausschluss- und Auswahlkriterien für die möglichen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin sowie wirtsgesteinsunabhängige Abwägungskriterien“

für das Standortauswahlverfahren festzulegen.

Nach den Vorgaben des StandAG ist bei der Standortauswahl der Stand von Wissenschaft und Technik anzuwenden. Weiterhin sind internationale Erfahrungen zu analysieren. Aus der Analyse der internationalen Erfahrungen ist festzustellen, dass die Lagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle sowohl im Wirtsgestein Ton als auch im Wirtsgestein Kristallin den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik darstellt. Aus diesem Grund muss dafür Sorge getragen werden, dass diese Wirtsgesteinstypen nicht frühzeitig aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden. Insbesondere sollten die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in der Phase 1 des Auswahlverfahrens nicht zu einem solchen Ausschluss führen. Demnach sind auch die Abwägungskriterien daraufhin zu prüfen, inwieweit sie durch die Wahl der Bewertungsrelevante Eigenschaft und/oder Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums bereits wirtsgesteinsspezifisch ausgerichtet sind.

Nachfolgende Ausarbeitung beschäftigt sich mit den geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle. In Phase 1 des Standortsuchverfahrens werden mit Hilfe von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen Teilgebiete und nachfolgend Standortregionen festgelegt, in denen die nachfolgend genannten Mindestanforderungen erfüllt sind und die Ausschlusskriterien nicht erfüllt sind.

Die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen gelten während des gesamten Standortauswahlverfahrens. Wenn dementsprechend in einer späteren Phase festgestellt wird, dass in einer Standortregion (bzw. an einem Standort) ein Ausschluss-kriterium erfüllt ist oder eine Mindestanforderung nicht eingehalten ist, wird die Standortregion bzw. der Standort ausgeschlossen.

Nach genannte Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien gelten nicht für ein Endlager für schwach und mittel radioaktive Abfälle. Für ein solches Endlager müssen noch gesonderte Überlegungen angestellt werden.

³² siehe hierzu K-Drs. 157, K-Drs. AG3-91, 91a bis d, K-Drs. 209, 209a-c

Nach den Vorgaben des StandAG ist bei der Standortauswahl der Stand von Wissenschaft und Technik anzuwenden. Weiterhin sind internationale Erfahrungen zu analysieren.

Aus der Analyse der internationalen Erfahrungen ist festzustellen, dass die Lagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle sowohl im Wirtsgestein Ton als auch im Wirtsgestein Kristallin den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik darstellt. Aus diesem Grund muss dafür Sorge getragen werden, dass diese Wirtsgesteinstypen nicht frühzeitig aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden. Insbesondere sollten die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in der Phase I des Auswahlverfahrens nicht zu einem solchen Ausschluss führen.

Demnach sind auch die Abwägungskriterien daraufhin zu prüfen, inwieweit sie durch die Wahl der Bewertungsrelevante Eigenschaft und/oder Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums bereits wirtsgesteinsspezifisch ausgerichtet sind.

8.2. Begriffsbestimmungen

Für die Systematisierung der Kriterienentwicklung hat die AG 3 ein einheitliches Verständnis der Kategorien "Ausschlusskriterium", Mindestanforderung und "Abwägungskriterium" entwickelt, dass zu folgenden Begriffsbestimmungen führte³³:

Ausschlusskriterium:

Ein Ausschlusskriterium ist ein Kriterium, bei dessen Erfüllung eine Standortregion bzw. ein Standort nicht für ein Endlager geeignet ist und daher aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen wird. Die Ausschlusskriterien bleiben während des gesamten Auswahlverfahrens gültig.

Mindestanforderung:

Eine Mindestanforderung für die Auswahl einer Endlagerregion bzw. eines Endlagerstandortes ist eine Anforderung, die auf jeden Fall eingehalten werden muss. Sofern sie nicht eingehalten wird, ist der Standort nicht geeignet und wird daher aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen. Die Mindestanforderungen bleiben während des gesamten Auswahlverfahrens gültig.

Abwägungskriterium:

Durch Abwägungskriterien sollen Standortregionen bzw. Standorte, die nach Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Verfahren verblieben sind, untereinander verglichen werden (zusammen mit den Ergebnissen von Sicherheitsuntersuchungen)

Die nachfolgend genannten Kriterien haben zum Ziel, einen Standort festzulegen, der die bestmögliche Sicherheit zur Isolation insbesondere hoch radioaktiver Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren erwarten lässt. Sie orientieren sich eng an den geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Anforderungen an eine günstige geologische Gesamtsituation gem. AkEnd³⁴. Die dort zusammengestellten Aspekte wurde von der Arbeitsgruppe geprüft und entweder übernommen, modifiziert bzw. angepasst oder begründet nicht übernommen.

³³ siehe hierzu K.-Drs. 63, Kap. 2

³⁴ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

8.3. Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien

8.3.1. Großräumige Vertikalbewegungen

Eine Standortregion mit einer zu erwartenden großräumigen geogenen Hebung von mehr als 1 mm pro Jahr im Nachweiszeitraum (~1 Mio. Jahre) wird ausgeschlossen. Eine Standortregion soll möglichst geringe tektonisch bedingte großräumige Hebungen aufweisen.

Erläuterung: Großräumige Hebungen eines Gebirgsbereiches in dem ein Endlager eingebettet ist, könnten dazu führen, dass an der Geländeoberfläche verstärkt Erosion auftritt, die die notwendige Schutzwirkung der Überdeckung des Endlagers beeinträchtigen kann (s.a. AkEnd (2002)³⁵, S. 86-87).

8.3.2. Aktive Störungszonen

In der Endlagerregion dürfen keine geologisch aktiven Störungszonen vorhanden sein, die das Endlagersystem und insbesondere den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie die technischen und geotechnischen Barrieren beeinträchtigen können.

Erläuterung: Unter einer „aktiven Störungzone“ werden sowohl Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz als auch Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung verstanden. Als "aktive Störungen" mit Sicherheitsrelevanz für ein Endlager werden Verwerfungen angesehen, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel (d.h. seit etwa 34 Mio. Jahren) bis heute Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische bzw. aseismische Vorgänge (also Vorgänge, die nicht aus den Gesetzen der Tektonik abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind), die zu ähnlichen sicherheitlichen Konsequenzen wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln (s.a. AkEnd (2002)³⁶, S. 87/88).

8.3.3. Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

In der Standortregion darf das Gebirge nicht durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt sein, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich des Endlagers und insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu erwarten sind. Das Endlager muss in einem neu aufzufahrenden Bergwerk errichtet werden. Das Wirtsgestein und insbesondere der einschlusswirksame Gebirgsbereich dürfen nicht durch früher abgeteufte Bohrungen in ihrer Einschlussfunktion beeinträchtigt sein. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss unverritzt sein.

Auffahrung, Betrieb und Offenhaltung des Erkundungsbergwerkes Gorleben bleiben davon unberührt.

Erläuterung: Da im Rahmen der Auswahl der Standortregionen im ersten Schritt noch keine gebirgsmechanischen Standsicherheitsberechnungen erfolgen, muss der Einfluss aus gegenwärtiger und früherer bergbaulicher Tätigkeit erst einmal qualitativ abgeschätzt werden.

³⁵ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

³⁶ a.a.O.

8.3.4. Seismische Aktivität

In der Standortregion dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1 / NA 2011-01.

Erläuterung: siehe AkEnd (2002)³⁷, S. 89-91

8.3.5. Vulkanische Aktivität

In der Standortregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.

Erläuterung: siehe AkEnd (2002)³⁸, S. 91-93

8.3.6. Grundwasseralter

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Einlagerungsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen. Diese Grundwässer dürfen daher kein Tritium und / oder (fast kein) ¹⁴C enthalten.

Erläuterung: Junge Grundwässer (z.B. feststellbar anhand ihrer Tritium- und C-14-Gehalte) deuten auf eine Teilnahme des Grundwassers am hydrologischen Kreislaufs hin. Die beiden Parameter werden routinemäßig untersucht und bieten die Chance, relativ früh im Verfahren Informationen zum Grundwasseralter zu bekommen. Im Endlagerbereich soll jedoch die Permeabilität so gering sein, dass möglichst keine Grundwasserbewegung vorhanden ist. Das Fehlen von Tritium und C-14 ist allerdings kein hinreichender Beleg für eine günstige geologische Gesamtsituation (s.a. AkEnd-Bericht, S. 94-95).

8.4. Geowissenschaftliche Mindestanforderungen

8.4.1. Gebirgsdurchlässigkeit

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen. Sofern ein direkter Nachweis in der ersten und zweiten Phase der Standortsuche noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.

Erläuterung: Grundsätzlich gilt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit möglichst gering sein soll, damit ein advektiver Flüssigkeitstransport vermieden wird und allenfalls ein diffusiver Stofftransport erfolgt (s.a. AkEnd (2002)³⁹, S. 95 und S. 113-129). Ein poröses Gestein hat einen Durchlässigkeitsbeiwert k_f von etwa 10^{-10} m/s, wenn $0,00001 \text{ cm}^3$ einer Flüssigkeit mit einer Viskosität von $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ (= Viskosität von Wasser) in einer Sekunde ein Gesteinsstück von 1 cm Länge und 1 cm^2 Querschnitt bei einem Druckunterschied von 1 bar (= 10 m Wassersäule) zwischen Eintritts- und Austrittsstelle bei einer Temperatur von 0°C und einem atmosphärischen Druck von 760 mm Quecksilbersäule durchfließt.

³⁷ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

³⁸ a.a.O.

³⁹ a.a.O.

8.4.2. Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.

Erläuterung: siehe AkEnd (2002)⁴⁰, S. 95.

8.4.3. Minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen. In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum mit der Bildung eiszeitlicher Rinnen zu rechnen ist, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter der maximal zu erwartenden Tiefe solcher Rinnen liegen.

Erläuterung: Durch die Festlegung einer Mindesttiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches soll vermieden werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich durch von der Geländeoberfläche ausgehende Einwirkungen, insbesondere durch intensive Erosion (z.B. durch subglaziale Rinnenbildung in Eiszeiten) beeinträchtigt wird. Die in einer Standortregion bzw. am Standort zu erwartende Rinnentiefe muss prognostiziert werden. Bei der später vorzunehmenden Abwägung ist aus sicherheitlichen Überlegungen im Rahmen der Abwägung auf einen großen Abstand zwischen der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der Unterfläche der Rinnen zu achten (s.a. AkEnd (2002)⁴¹, S. 95).

Zur minimalen Tiefe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gab es einen Ergänzungsvorschlag von Herrn Dr. Appel und eine sich hierauf beziehende Stellungnahme von Herrn Dr. Fischer und Herrn MdB Kanitz, die auf den folgenden Seiten wörtlich wiedergegeben werden.

Vorschlag zur Ergänzung der Mindestanforderung "Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs" von Herrn Dr. Appel⁴²

Die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen, bei Salzstöcken 600 m, wovon jeweils mindestens 300 m auf die Salzscheibe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das nichtsalinare Deckgebirge entfallen müssen.

Zum Schutz vor naturbedingten Einwirkungen von der Erdoberfläche ist in AKEND (2002) die Mindestteufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit 300 m unter Geländeoberfläche festgelegt worden. Das entspricht einer Tiefe, in der bei den potenziellen Wirtsgesteinstypen Tonstein und Granit (bzw. vergleichbaren kristallinen Gesteinstypen) nicht mehr mit entlastungsbedingter Durchlässigkeitserhöhung als Folge erosiver Beseitigung von überlagernden Teilen des Deckgebirges gerechnet werden muss. Mit naturbedingten Einwirkungen waren insbesondere Erosion und ihre Folgen gemeint. In BGR (2009) wird diese Mindestteufe als zu gering angesehen. Angesichts der Gefahr der künftigen Entstehung tiefer subglazialer Rinnen böte sie keinen ausreichenden Schutz. Vorgeschlagen wird eine Mindestteufe von 500 m.

Dieser Vorschlag ist nicht zwingend. Er beruht auf der insbesondere von KELLER (2009) entwickelten Position, wonach im norddeutschen Tiefland für die Zukunft mit der Entstehung von Rinnen mit bis zu 500 m Tiefe gerechnet werden muss. Die grundsätzliche Möglichkeit künftiger eiszeitlicher Rinnenentstehung - auch mit diesem Tiefgang - ist seit langem belegt und

⁴⁰ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁴¹ a.a.O.

⁴² siehe hierzu K.-Drs. /AG3-70

unbestritten. Allerdings werden die für die Lage und den Tiefgang solcher Rinnen verantwortlichen Prozesse derzeit im Einzelnen nicht so gut verstanden, dass daraus auf eine zwangsläufige Gleichbehandlung Gesamt-Norddeutschlands geschlossen werden dürfte, die zur Festlegung einer generell gültigen Mindesttiefe von 500 m zwänge. Angesichts der Tatsache, dass gerade Tonsteinvorkommen im Tiefenbereich zwischen etwa 300 und 500 m unter Gelände (auch) sicherheitstechnische Vorteile bieten können (z. B. JOBMANN et al. 2007a u. b), erscheint es vielmehr angemessener, die mit künftiger Rinnenbildung verbundenen Sicherheitsaspekte in einem umfassenden Abwägungsprozess zu berücksichtigen. Grundlage dafür ist das Abwägungskriterium "Robustheit und Sicherheitsreserven" des AkEnd mit differenzierter Bewertungsfunktion für die Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Die Umformulierung der Mindestanforderung "Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs" ist allerdings aus einem anderen Grund sinnvoll:

Bei einer Wirtsgesteinsformation (z. B. aus Tonstein), deren Mächtigkeit etwa der des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entspricht, befände sich auch deren Oberfläche in dieser Tiefe. Die geforderten 300 m würden vollständig aus dem darüber liegenden Deckgebirge bestehen. Bei Salzstrukturen bedeutete die Einhaltung der Mindestanforderung auf diese Weise, dass sich der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. ihn unmittelbar überlagernde Salzgesteine der Wirtsgesteinsformation in direktem Kontakt mit Grundwasser führenden Schichten des Deckgebirges befinden könnten und wahrscheinlich örtlich auch befänden. Diese sicherheitstechnisch nicht akzeptierbare Situation sollte durch eine klare Mindestanforderung für Salzstöcke ausgeschlossen werden. Die vom AkEnd festgelegte Mindestdtiefe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 300 m sollte daher um die von BGR (1995 u. 2007) für Salzstöcke geforderte Salzscheibe über dem Endlagerbereich von 300 m bei gleichzeitiger Mindestmächtigkeit des (nichtsalinaren) Deckgebirges von 300 m AkEnd ergänzt werden. BGR (1995) hatte bei der Identifizierung untersuchungswürdiger Salzstöcke eine Mindestmächtigkeit des Deckgebirges über dem Gipshut von 200 m zu Grunde gelegt; dieser Wert stünde nach der oben gegebenen Erläuterung im Widerspruch zu der Anforderung des AkEnd.

Zitierte Schriften

AKEND - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.- Dezember 2002.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Salzformationen.- Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, August 2005 (Bearbeiter: Kockel, F., Krull, P., Fischer, M., Frisch, U., Heßmann, W. & Stiewe, H.), Archiv-Nr. Hannover: 111 089, Archiv-Nr. Berlin: 2025041.

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

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2009): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). Teil I. Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen.- Im Auftrag des BMWi, Mai 2009, (Bearbeiter: J. Hammer, J. Sönneke, G. Mingerzahn), Hannover, Tagebuchnr. 10593/09.

JOBMANN, M., AMELUNG, P., BILLAUX, D., POLSTER, M., SCHMIDT, H. & UHLIG, L. (2007a): *Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - Abschlussbericht.- DBE TECHNOLOGY, Peine, März 2007.*

JOBMANN, M., AMELUNG, P. & UHLIG, L. (2007b): *Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Auslegung eines generischen Endlagers im Tonstein in Deutschland - GENESIS - Anlagenband Geologie der Referenzregionen im Tonstein.- DBE TECHNOLOGY, Peine, März 2007.*

KELLER, S. (2009): *Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland.- BGR-Bericht, Hannover, August 2009.*

Kurzstellungnahme zu Beratungsunterlage K-Drs. /AG 3-70 von Herrn Dr. Fischer und Herrn MdB Kanitz⁴³ (K.-Drs. /AG3-72)

Zur Ergänzung der Mindestanforderung "Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Die vorgeschlagene Ergänzung der Mindestanforderung zur Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist weder notwendig noch zielführend.

Einerseits wird der hier thematisierten Beeinträchtigung des ewG durch eiszeitliche Rinnen bereits durch die in K-Drs/AG3-63 enthaltene Ergänzung

"In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum mit der Bildung eiszeitlicher Rinnen zu rechnen ist, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter der maximal zu erwartenden Tiefe solcher Rinnen liegen."

hinreichend Rechnung getragen. Diese Formulierung berücksichtigt auch, dass nicht nur Salzstöcke, sondern insbesondere auch Tonformationen von eiszeitlichen Rinnen betroffen sein können und die Unversehrtheit des ewG eine Grundvoraussetzung ist.

Andererseits ist die geforderte Festlegung der Mächtigkeit von Salzschwebe und Deckgebirge willkürlich und ebenso unbegründet wie die Behauptung, dass direkter Kontakt des Salzspiegels mit Grundwasser sicherheitstechnisch nicht akzeptabel sei.

Die Existenz zahlreicher Salzstöcke in Norddeutschland mit geringer mächtigen Deckgebirgen bzw. mit direktem Kontakt zum Grundwasser beweist das Gegenteil. Dies ist insbesondere daher unbedenklich, da auch bei direktem Kontakt mit Grundwasser die Subrosion infolge der Aufsättigung und der sich dann einstellenden Dichteschichtung des Grundwassers schnell zum Erliegen kommt.

⁴³ siehe hierzu K.-Drs. /AG3-72

8.4.4. Maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs

Diese Anforderung des AkEnd ist aus Sicht der AG 3 für die Standortauswahl nicht erforderlich.

8.4.5. Fläche des Endlagers

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht.

*Erläuterung: Im Rahmen der Auswahl der Standortregionen (1. Schritt des Auswahlverfahrens) ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich eines Endlagers noch nicht bekannt. Für die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches einschließlich des gesamten Endlagerbergwerks wurde im AKEnd-Bericht für Salz von einer Fläche von 3 km² und für Tonstein von 10 km² ausgegangen. **Diese Zahlenwerte sind nicht mehr zutreffend und werden derzeit im Rahmen eines von der Endlagerkommission vergebenen Gutachtens neu ermittelt.** Nach dem Bericht zum Nationalen Entsorgungsprogramm sollen zudem weitere Abfallmengen aus der Urananreicherung und aus dem Endlager Asse – sofern ein geeigneter Standort für ein Kombilager gefunden werden kann - in das Endlager für hoch radioaktive Abfälle aufgenommen werden sollen. Bei der Berechnung der Flächenausdehnung eines Endlagers muss auch das Lagerkonzept einschließlich der Zugangsstrecken, Untertagelabors, Verschlussbauwerke usw. beachtet werden (S.a. AkEnd (2002⁴⁴), S. 95).*

8.4.6. Erkenntnisse zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich des Nachweiszeitraums

Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit (= Höhe) und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und damit seine Integrität über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

Erläuterung: siehe AkEnd (2002)⁴⁵, S. 95.

⁴⁴ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁴⁵ a.a.O.

8.5. Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Ziel des Standortauswahlverfahrens ist es, einen Standort zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für eine Isolation der Abfälle von den Schutzgütern für einen Zeitraum von ungefähr einer Million Jahren gewährleistet. Nachdem Standortregionen bzw. Teilgebiete ausgewählt worden sind, die die Mindestanforderungen erfüllen, soll mit Hilfe der nachfolgend genannten Abwägungskriterien beurteilt werden, ob eine insgesamt günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich nicht aus der besonders guten Erfüllung eines einzelnen Kriteriums, sondern aus der Summe der Erfüllung aller Kriterien.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im Folgenden als Anforderung formuliert und thematisch in drei Gewichtungsgruppen gegliedert, die sich zunächst an der Bedeutung der Anforderung für das zentrale Ziel des Einschlusses im ewG orientieren:

Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

- Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau
- Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit
- Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens

- Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen
- Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Anforderung 7: Gute Gasverträglichkeit
- Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit
- Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge gegenüber Radionukliden
- Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse
- Anforderung 11: Günstige Bedingungen für den Bau von Verschlussbauwerken
- Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges

Die Abwägungskriterien kommen erstmals in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zur Anwendung und gelten ab dann für den gesamten weiteren Abwägungsprozess bis zum Abschluss der Phase 3 mit der Auswahl des Endlagerstandorts. Sie dienen in Schritt 2 der Phase 1 zunächst der Ausweisung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen. In Schritt 3 der Phase 1 sollen sie, zusammen mit planungswissenschaftlichen Kriterien, dazu dienen, Standortregionen für die übertägige Erkundung auszuweisen.

In den Phasen 2 und 3 treten auf Basis der dann nach und nach verfügbaren standortbezogenen Informationen aus der übertägigen und untertägigen Erkundung schrittweise Sicherheitsuntersuchungen auf Basis der dann ebenfalls erforderlichen generischen Endlagerkonzepte hinzu, die mit dem stetigen Kenntnisgewinn iterativ verfeinert werden. Im Vergleich der betrachteten Standorte ergeben sich Vorschläge für die untertägige Erkundung (Abschluss Phase 2) und schlussendlich der Vorschlag für den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit (Abschluss Phase 3).

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dienen in diesem Prozess als Prüfgegenstände. Die Gruppierung und Reihenfolge beinhaltet dabei zunächst keine explizite Bedeutungshierarchie und auch keine numerisch fassbare Gewichtung. Gleichwohl ist der Kommission bewusst, dass die Abwägungskriterien für die Sicherheit des auszuwählenden Standorts unterschiedliche Bedeutung haben, die z.T. auch konzeptspezifisch bzw. wirtsgesteinsspezifisch unterschiedlich sein können. Auch Kombinationswirkungen können dabei abwägungsrelevant sein. Es ist aber nicht möglich hieraus a priori eine Gewichtungsvorschrift abzuleiten. Aus diesem Grund sind in jedem Prozessschritt alle Anforderungen entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzuprüfen. Es kann auch grundsätzlich keine der Anforderungen unter Verweis auf andere Anforderungen in der Betrachtung entfallen.

In der Bewertung und dem Vergleich von Standortregionen bzw. Standorten ist ein Abwägungsprozess auf Basis einer verbal-argumentativen Herangehensweise erforderlich. Es werden keine formalen Aggregationsregeln oder Kompensationsbeziehungen unter den Anforderungen definiert. Vielmehr erfolgt eine Gesamtbetrachtung aller Anforderungen mit dem Ziel, Standortregionen bzw. Standorte mit einer möglichst hohen Erwartung an ihre sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale auszuweisen, Unterschiede transparent zu machen und hieraus eine Rangfolge für den jeweils folgenden Prozessschritt abzuleiten. In den folgenden Schritten kann die erwartete Sicherheit eines Standorts dann durch Kenntnisgewinn vertieft überprüft und bewertet werden, wobei neben den Abwägungskriterien im Verlauf des Prozesses die immer detaillierter werdenden Sicherheitsuntersuchungen gegenüber den reinen Kriterien an Bedeutung gewinnen. Über Sensitivitätsanalysen können dabei robustere von weniger robusten Merkmalskombinationen unterschieden werden. Dabei sind auch Änderungen in der anfänglichen Rangfolge sowie Rücksprungmöglichkeiten zu zunächst zurückgestellten Standorten mit zu bedenken.

8.5.1. Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

8.5.1.1. Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

Die Anforderung "kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau" charakterisiert für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle günstige hydrogeologische Verhältnisse. Als günstig werden diese dann bezeichnet, wenn sowohl das Grundwasserangebot an die Abfälle als auch die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gering ist. Ein geringes Grundwasserangebot begrenzt u.a. die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen. Eine geringe Grundwasserbewegung ist Bedingung für einen langsamen advektiven Transport von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Als Bewertungsgröße dafür wird die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers herangezogen. Diese errechnet sich aus der

Entfernung, die das Grundwasser in einer Zeiteinheit zurücklegt. Unter stagnierenden Grundwasserbedingungen kommt lediglich Diffusion als Transportmechanismus in Frage.

Zugehörige Kriterien (s.a. Tabelle 8-1)

- Die **Grundwasserströmung**, ausgedrückt als Abstandsgeschwindigkeit, sollte **möglichst gering**, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr, sein.
- Das **Grundwasserangebot** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte **möglichst gering** sein. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte daher aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.
- Die **Diffusionsgeschwindigkeit**, erfasst durch den effektiven Diffusionskoeffizienten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, sollte **möglichst gering** sein (kleiner 10^{-11} m²/s).

Tabelle 8-1: Transport durch Grundwasser: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 - 1	> 1
Grundwasserangebot	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	< 10^{-12}	10^{-12} - 10^{-10}	
Diffusionsgeschwindigkeit	effektiver Diffusionskoeffizient [m ² /s]	< 10^{-11}	10^{-11} - 10^{-10}	> 10^{-10}

Der **effektive Diffusionskoeffizient** als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit in konkreten Gesteinsvorkommen liegt als Information zunächst flächendeckend nicht vor. **Hilfsweise** kann daher der **Gesteinstyp als Indikator für die Diffusionsgeschwindigkeit** herangezogen werden.

In Abhängigkeit vom Gesteinstyp wird die Diffusionsgeschwindigkeit durch unterschiedliche charakteristische Merkmale bestimmt:

Bei Sedimentgesteinen sind **geringe Permeabilität und Porosität** Merkmale eines geringen effektiven Diffusionskoeffizienten. Indikatoren dafür sind bei Tonstein die **absolute Porosität** und der **diagenetische Verfestigungsgrad** des Gesteins.

Die entsprechende Bewertungsgröße **für Tonstein** (s.a. Tabelle 8-2) lautet daher:

- Das Gestein sollte über eine geringe absolute Porosität und einen hohen diagenetischen Verfestigungsgrad verfügen.

Tabelle 8-2: Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp TONSTEIN

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit	Absolute Porosität	< 20 %	20 % - 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

Für andere Gesteinstypen müssen für die Eigenschaft "Diffusionsgeschwindigkeit" noch entsprechende **Abwägungsmaßstäbe** oder Analoga aufgestellt werden. Hierzu müssten Tabellen ähnlich der Tabelle 8-2 auch für die Wirtsgesteinstypen Salz und Kristallin entwickelt werden. Die beiden nachfolgenden Tabellen (Tabelle 8-3 und Tabelle 8-4) beinhalten daher keine Angaben, sondern sind als entsprechende Platzhalter zu verstehen.

Tabelle 8-3: Platzhalter - Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp SALZ

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit				

Tabelle 8-4: Platzhalter - Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp KRISTALLIN

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit				

Mögliche (weitere) Indikatoren für das Fehlen einer Grundwasserbewegung bzw. für eine nur geringe Grundwasserbewegung, für die in AkEnd (2002)⁴⁶ mangels belastbarer Informationen keine Kriterien abgeleitet worden sind:

⁴⁶ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

- auf Dauer trockenes Gestein
- Temperaturverteilung im tiefen Untergrund
- teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte

8.5.1.2. Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Unter dem Begriff "Konfiguration" werden in erster Linie die Ausdehnung und Funktion des eine günstige geologische Gesamtsituation bestimmenden Gesteinskörpers oder - bei mehreren Gesteinskörpern - die geometrische Anordnung der durch Ausdehnung und Funktion charakterisierten beteiligten Gesteinskörper verstanden. Hinzu kommen die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb der Geosphäre sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial.

Ausdehnung, Anordnung und Tiefenlage von Gesteinskörpern sind in der Regel einfacher erhebbar als bestimmte Gesteinseigenschaften oder die hydraulischen und hydrochemischen Standortverhältnisse. Daher kommt der Konfiguration sicherheitsrelevanter Gesteinskörper in der geologischen Barriere als früh erkennbarem Merkmal einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" im Rahmen des Auswahlverfahrens besondere Bedeutung zu.

Zugehörige Kriterien

- Die **barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** müssen über eine **Mächtigkeit** verfügen, die eine Isolation der Radionuklide in der Größenordnung von einer Million Jahren bewirkt (rechnerische Ableitung unter Voraussetzung idealer Barrierewirkung).
- Der **Endlagerbereich** (Konfigurationstyp A in AkEnd (2002)⁴⁷) **bzw.** der **Wirtsgesteinskörper** (Konfigurationstyp Ba in AkEnd (2002)⁴⁸) **sollte** von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs **umschlossen sein** (siehe auch Abbildung 8-1).

Handelt es sich bei Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich um unterschiedliche Gesteinskörper und wird der Wirtsgesteinskörper nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen (Konfigurationstyp Bb in AkEnd (2002)⁴⁹, siehe auch Abbildung 8-2), dann kann die Anordnung beider Einheiten allein selbst dann keinen ausreichenden Beitrag zu einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" leisten, wenn sie die geforderten Gesteinseigenschaften aufweisen.

Zumindest kann die Qualität der barrierewirksamen Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Anordnung und Ausdehnung der beteiligten Gesteinskörper nicht ohne weiteres abgeleitet werden. In erster Näherung dürfte die einschließende Wirkung einer solchen Konfiguration davon abhängig sein, wie weitgehend das Wirtsgestein vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen ist und in welcher hydraulischen Position sich (eine oder mehrere) konfigurationsbedingte Fehlstellen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich befinden, durch die das Grundwasser im Wirtsgestein auf Grund der Konfiguration in die regionale Grundwasserbewegung einbezogen sein kann.

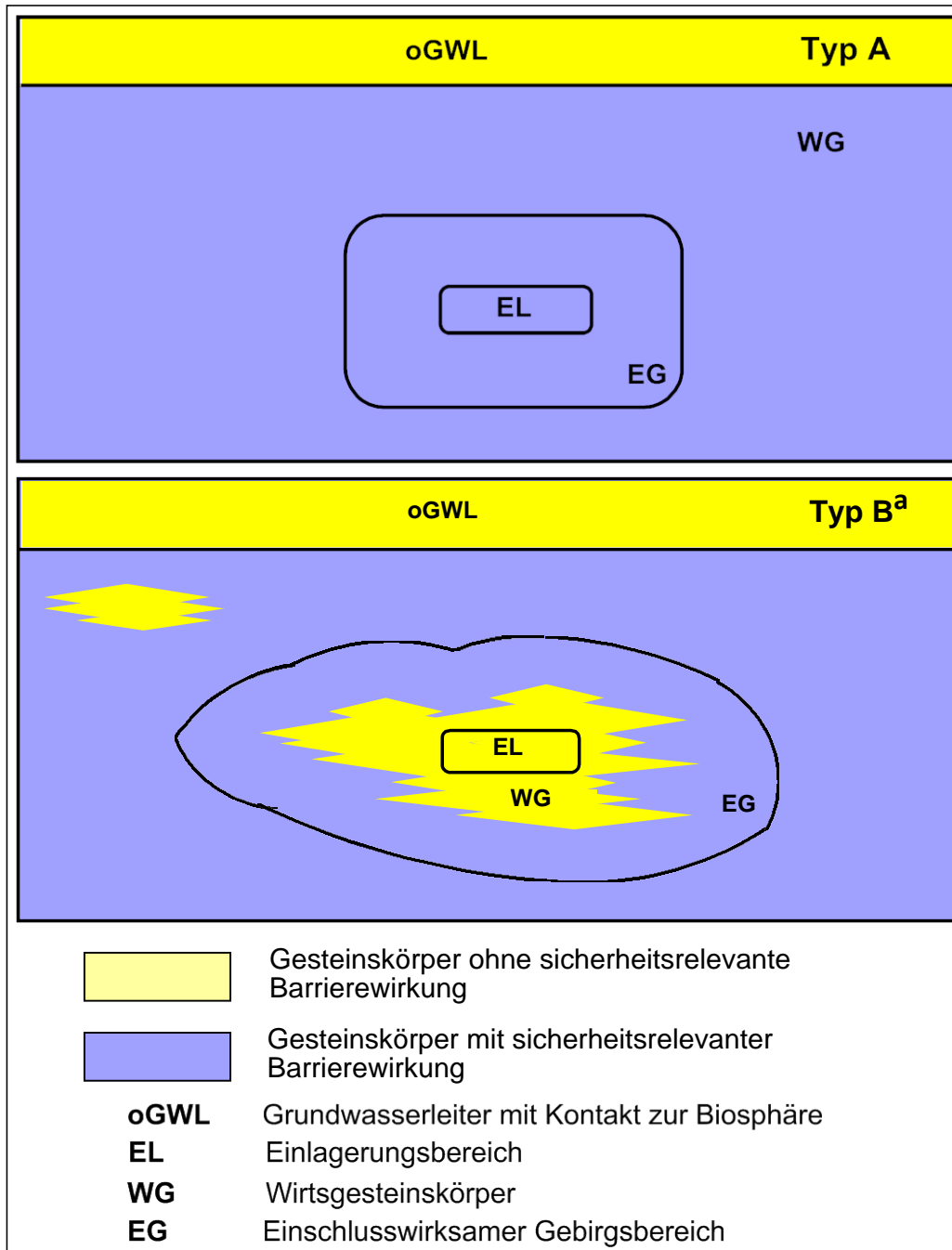
⁴⁷ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁴⁸ a.a.O.

⁴⁹ a.a.O.

Eine "günstige geologische Gesamtsituation" muss sich umso mehr aus konfigurationsunabhängigen Gegebenheiten einer Region bzw. eines Standortes ergeben, je "offener" die Anordnung von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ist. Denn dann müssen andere Gegebenheiten, wie beispielsweise große Tiefe und günstige hydraulische und hydrochemische Bedingungen im Einlagerungsbereich des Endlagers für den Einschluss der Abfälle im Endlager sorgen. Eine solche, dem Konfigurationstyp "Bb" entsprechende Situation könnte beispielsweise bei einer weiträumigen Überlagerung von tief liegendem kristallinem Wirtsgestein durch barrierewirksame Salz- oder Tonsteinfohlen gegeben sein (s. Abbildung 8-2 oben).

Abbildung 8-1: Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich: Typ A und Typ Ba aus AkEnd (2002)⁵⁰



Quelle: AkEnd (2002)

Erläuterung zu Abbildung 8-1:

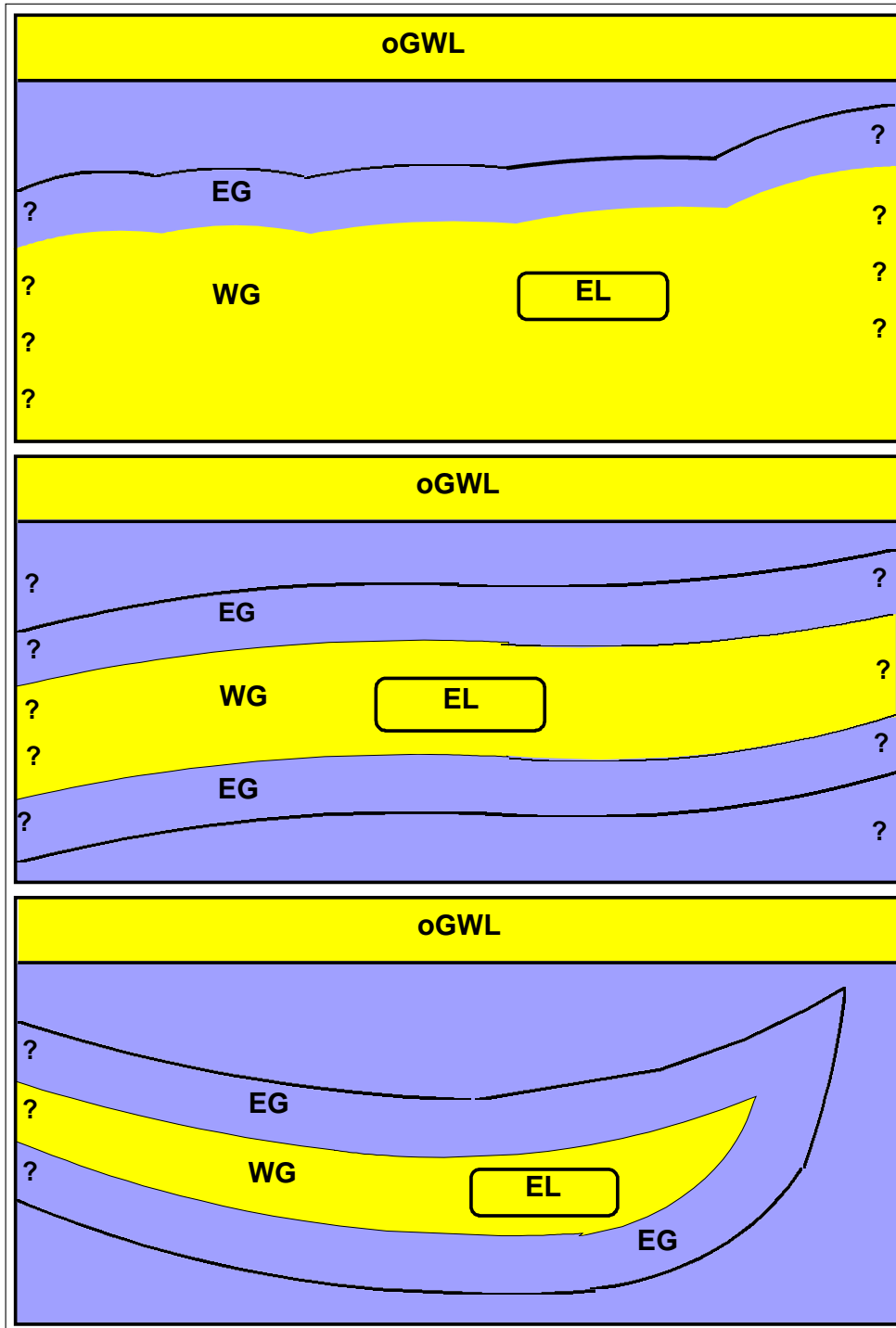
Typ A: Das Wirtsgestein ist sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches.

Typ B: Das Wirtsgestein ist kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Die Darstellung entspricht dabei dem Typ Ba: Das Wirtsgestein ist vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen.

Die Darstellung ist schematisch und ohne Maßstab.

⁵⁰ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1, S.134.

Abbildung 8-2: Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich: Typ Bb aus AkEnd (2002)⁵¹



Quelle: AkEnd (2002)

Erläuterung zu Abbildung 8-2:

Konfigurationstyp Bb: Geologische Strukturen mit unterschiedlichem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Darstellung ist schematisch und ohne Maßstab, „?“ bedeutet "weitere Ausdehnung unbekannt". Legende siehe Abbildung 8-1.

⁵¹ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1, S. 135

- Die **Teufe der Oberfläche des** erforderlichen **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** sollte unter einschränkender Beachtung tiefenabhängiger gebirgsmechanischer Risiken möglichst groß sein, um die **Robustheit** des Endlagersystems gegenüber natürlichen Einwirkungen auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich von außen und **Sicherheitsreserven** zu gewährleisten.

Tiefenabhängige **gebirgsmechanische Risiken** bestehen **insbesondere beim Wirtsgesteinstyp Ton / Tonstein**. Sie werden außer durch die tiefenabhängige Gebirgsdruck- und Temperaturzunahme auch durch die petrographische und mineralogische Zusammensetzung, den Grad der Konsolidierung des Gesteins und die örtlichen Gebirgsspannungsverhältnisse beeinflusst.

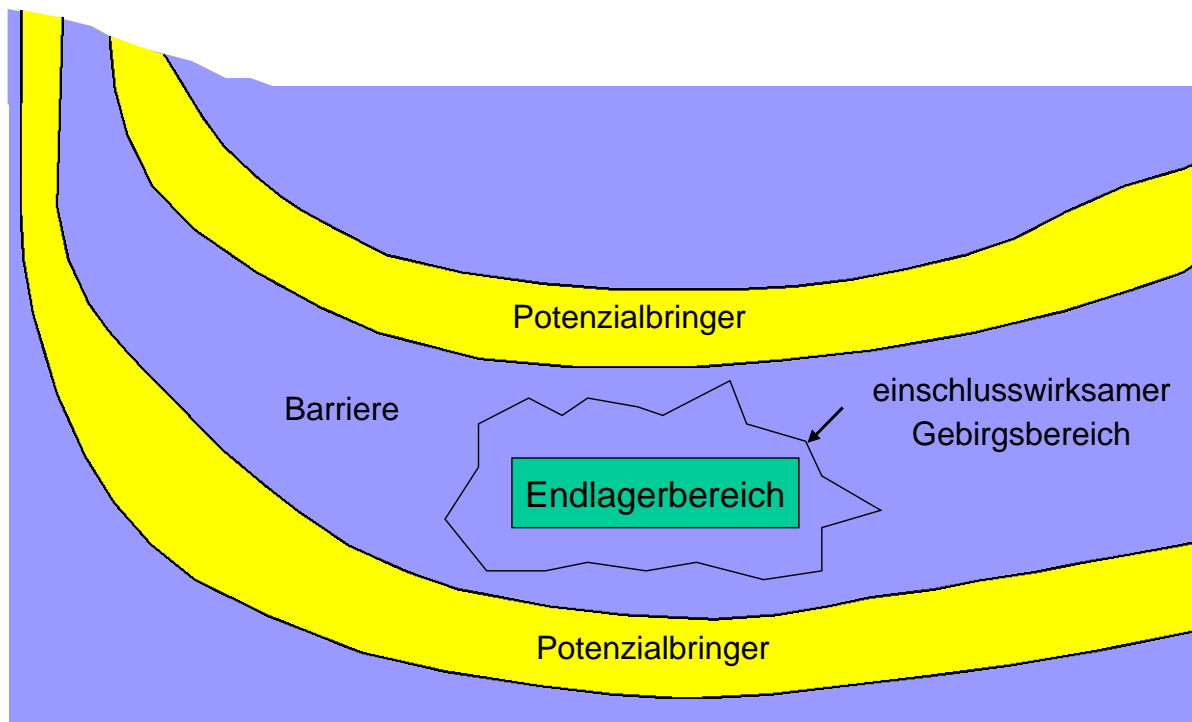
Bei der Anwendung der Kriterien sind gegebenenfalls regionsspezifische Einwirkungsszenarien zu beachten. Deren etwaigen nachteiligen Auswirkungen auf den Einschluss ist dann gegebenenfalls durch die **rechtzeitig abgestimmte Vorgabe** einer regionsbezogenen maximalen Tiefe und bei der bewertungsrelevanten Eigenschaft "Robustheit und Sicherheitsreserven" in Tabelle 8-5 durch die Vorgabe einer abweichenden **regionsbezogenen Mindesttiefe** zu begegnen. Ein Beispiel hierfür ist die für eine künftige Eiszeit zu besorgende Entstehung tiefer subglazialer Rinnen in Teilgebieten der norddeutschen Tiefebene.

- Der **einschlusswirksame Gebirgsbereich** muss über eine **räumliche Ausdehnung** verfügen, die größer ist als das für das Endlager rechnerisch erforderliche Volumen. Damit besteht Spielraum für eine flexible Endlagerauslegung, u. a. um Platz brauchende Rückholungskonzepte berücksichtigen zu können, einschließlich Sicherheitsabständen. Eingangsgröße für die Abwägung ist die bei einsöhliger Lagerung benötigte Fläche.
- Der **spezifische hydraulische Gradient**⁵² über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte so gering sein, dass die aus der Nachbarschaft solcher Gesteinskörper resultierenden Potenzialkontraste die **rechnerische induzierte Abstandsgeschwindigkeit über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich** selbst bei Zugrundelegung einer Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von 10^{-10} m/s und einer effektiven Porosität von 10 % **nicht über Werte von 1 mm/a** ansteigen lassen (s.a. AkEnd (2002)⁵³, S.142).

⁵² Das Kriterium des spezifischen hydraulischen Gradienten bezieht sich auf Tonsteinvorkommen innerhalb heterogen aufgebauter Sedimentgesteinsfolgen.

⁵³ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

Abbildung 8-3: Schematische Darstellung von Potenzialgebieten und Endlagerbereich aus AkEnd (2002)⁵⁴



Quelle: AkEnd 2002

⁵⁴ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1, S. 143.

Tabelle 8-5: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierenwirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 -100
	Grad der Umschließung des Endlagerbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Vollständig, Typ A und Ba, s. Beispiel in Abbildung 8-1	Unvollständig, Typ Bb, kleinere, Fehlstellen, in unkritischer Position s. Beispiel in Abbildung 8-2 Unten	Unvollständig; Typ Bb, größere Fehlstellen, in unsicherer Position s. Beispiel in Abbildung 8-2 Oben und Mitte
Robustheit und Sicherheitsreserven (über die Mindestanforderung hinaus.	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
	<i>Alternativ-Vorschlag von Herrn Prof. Kudla</i>	<i>Tonstein und Salzstöcke und Salz in flacher Lagerung: Sollvorgabe >500 m</i>	<i>Tonstein und Salzstöcke und Salz in flacher Lagerung: Sollvorgabe >500 m</i>	<i>Tonstein und Salzstöcke und Salz in flacher Lagerung: Sollvorgabe >500 m</i>
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit, Vielfaches des Mindestflächenbedarfs, (z. B. für Salz 3 km ² und Ton 10 km ²) ⁵⁵	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach

Vorhandensein von Gesteinskörpern mit				
---------------------------------------	--	--	--	--

⁵⁵ Die genauen Flächenbedarfe sind noch festzulegen.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
erhöhtem hydraulischen Potenzial ⁵⁶				
Vorschlag für neues Kriterium zur Vermeidung der Aufprägung erhöhten Potenzials: Durch benachbarte Potenzialbringer (Gesteinskörper mit erhöhtem hydraulischen Potenzial) induzierte Grundwasserströmung durch Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich (gilt i.W. für Tonstein)	Rechnerische Abstandsgeschwindigkeit über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10^{-10} m/s und effektiver Porosität 0,1) [m/s] ⁵⁷	$\ll 0,1$	0,1 - 1	> 1

In frühen Phasen des Auswahlverfahrens liegen die zur Anwendung des Kriteriums zur Bestimmung und Bewertung des **spezifischen hydraulischen Gradienten über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. der daraus resultierenden rechnerischen Abstandsgeschwindigkeit** erforderlichen Informationen wahrscheinlich nicht vor. Dann können ersatzweise das Vorhandensein potenzialbringender Grundwasserleiter und die relevanten Eigenschaften der für die Existenz erhöhter Potenziale in Frage kommenden Einheiten zur Beurteilung herangezogen werden. Dazu können folgende Indikatoren zur Anwendung kommen:

Indikator a

Anschluss von wasserführenden/wasserleitenden Schichten in Nachbarschaft zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich an ein hohes hydraulisches Potenzial.

Zugehörige Kriterien

- Ein Anschluss an ein hohes Potenzial sollte möglichst nicht gegeben sein. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn in unmittelbarer Nähe unterhalb und oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers **keine Gesteinskörper mit hohem Potenzial bzw. hoher Potenzialdifferenz** vorhanden sind.

⁵⁶ Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine fragwürdige Beurteilungsgröße. Der in AkEnd (2002) für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet. Soweit entsprechende Informationen vorliegen, sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die dadurch verursachte Abstandsgeschwindigkeit (≤ 1 mm/a) als eigentlich gesuchte Größe erhoben werden.

⁵⁷ Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine fragwürdige Beurteilungsgröße. Das gilt auch für die hier mit Vorbehalt ersatzweise eingeführte Größe Abstandsgeschwindigkeit, die gewählt wurde, um Parametereleichheit mit dem Kriterium Grundwasserströmung herzustellen. Der in AkEnd (2002) für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene qualitative Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet und wurde in veränderter Form beibehalten (s. Fußnote 8). Soweit bzw. sobald entsprechende Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die damit sowie mit Gebirgsdurchlässigkeit 10^{-10} m/s und effektiver Porosität 0,1 ermittelte rechnerische Abstandsgeschwindigkeit benutzt werden.

- Der hydraulische Widerstand der leitenden Schicht zwischen Potenzialanschluss und Endlagerposition sollte groß sein, d. h. die Transportlänge sollte groß und die Gebirgsdurchlässigkeit klein sein.

Indikator b (in Ergänzung zu AkEnd (2002))

Hydraulische Drücke im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinskörper, die auffällig von der zu erwartenden hydrostatischen Druckverteilung abweichen, und / oder deutliche Druckunterschiede zu benachbarten Grundwasser (gering) leitenden Gesteinskörpern aufweisen, können ein Hinweis auf die günstige hydraulische Barrierewirkung und damit geringe Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Wirtsgesteinskörpers sein. Das gilt dann, wenn gezeigt werden kann, dass die aktuell und in der jüngeren geologischen Vergangenheit bestehenden hydraulischen Verhältnisse (hydraulische Eigenschaften der Gesteinskörper, Potenzialdifferenzen) nicht ausgereicht haben, um in fernerer geologischer Vergangenheit verursachten anomalen Druckunterschiede abzubauen. Voraussetzung für eine solche Interpretation ist aber, dass die die Auffälligkeiten für den für die gesamte geforderte Fläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gelten und die Ursachen dafür plausibel abgeleitet werden können.

Zugehöriges Kriterium (s.a. Tabelle 8-6)

Die hydraulischen Drücke im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. generell im gering durchlässigem Wirtsgestein sollten von den auf Grund der Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereich **zu erwartenden hydrostatischen Drücken** bzw. von den in unter- bzw. überlagernden möglichen Potenzialbringern herrschenden Drücken **deutlich und plausibel erklärbar** abweichen.

Tabelle 8-6: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper: Ersatzweise anwendbare Indikatoren bei fehlenden Informationen zur Abstandsgeschwindigkeit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Anschluss an hohes Potenzial (Indikator a)	Vorhandensein von Gesteinskörpern mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können. ⁵⁸	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden, jedoch ohne erhöhtes Potenzial	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

⁵⁸ Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine fragwürdige Beurteilungsgröße. Der in AkEnd (2002) für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet und wurde in veränderter Form beibehalten. Soweit entsprechende

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
		Gebirgsbereich vorhanden		
Hydraulische Drücke (Indikator b)	Abweichung von hydrostatischen Erwartungswerten und/oder benachbarten Potenzialbringern			

8.5.1.3. Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit

Die zuverlässige räumliche Charakterisierung der wesentlichen direkt oder indirekt für den Einschluss der Abfälle zuständigen geologischen Barrieren, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers, ist Voraussetzung für belastbare Abwägungsentscheidungen im Rahmen des Auswahlverfahrens sowie für zuverlässige spätere Sicherheitsbewertungen.

Die räumliche Charakterisierbarkeit beruht auf der **Ermittelbarkeit** der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften und der **Übertragbarkeit** dieser Eigenschaften durch Extrapolation bzw. Interpolation. Beide hängen maßgeblich von Entstehungsbedingungen der Gesteinstypen oder / und ihrer späteren Überprägung ab.

Zugehörige Kriterien (s.a. Tabelle 8-7)

Ermittelbarkeit

- Die **charakteristischen Eigenschaften** der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper aufbauenden **Gesteinstypen** sollten eine **geringe Variationsbreite** aufweisen und **räumlich möglichst gleichmäßig verteilt** sein.
- **Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten** sollte die **Überprägung möglichst gering sein**. Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von **Bruch- und Falten tektonik**. **Salzstrukturen** sollten möglichst großräumige Verfaltungen der Schichten mit unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften aufweisen.

Übertragbarkeit

- **Günstige Verhältnisse** sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers **großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet** sind.

Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die unter Verwendung der rechnerisch Abstandsgeschwindigkeit durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper ($\leq 1 \text{ mm/a}$) benutzt werden. Das gilt auch für die hier mit Vorbehalt ersatzweise eingeführte Größe Abstandsgeschwindigkeit, die gewählt wurde, um Parametergleichheit mit dem Kriterium Grundwasserströmung herzustellen.

Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Insofern ist die Festlegung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.

Tabelle 8-7: Gute räumliche Charakterisierbarkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich / Wirtsgesteinskörper	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich / Wirtsgesteinskörper	gering	deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich / Wirtsgesteinskörper und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des ewG), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des ewG), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet
	für Salzstrukturen (Salzstöcke) gilt:	große ovale Salzstrukturen		kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstrukturen
Übertragbarkeit der Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

8.5.1.4. Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Bei der Beurteilung günstiger geologischer Gesamtsituationen genügt es nicht, die aktuellen Verhältnisse zu ermitteln und räumlich zu charakterisieren; vielmehr müssen zur Identifizierung und Einschätzung sicherheitsrelevanter Langzeitveränderungen auch verlässliche Voraussagen über die zukünftige Entwicklung der **geologischen** Verhältnisse möglich sein. Die Anforderung der guten Prognostizierbarkeit ist daher eine wesentliche Voraussetzung für den Nachweis der langfristigen Stabilität der günstigen geologischen Verhältnisse. Sie bezieht sich auf das gesamte Endlagersystem. Sie gilt also nicht nur bei Einzelkriterien, sondern übergreifend bei der Gesamtheit der geowissenschaftlichen Kriterien.

Prognosen über den geforderten Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren erfordern eine rückblickende Betrachtung über weit mehr als eine Million Jahre. Im Hinblick auf Prognostizierbarkeit günstig sind geologische Gesamtsituationen, deren Entwicklungsgeschichte sich über lange Zeiträume zurückverfolgen lässt und bei denen insbesondere keine wesentliche Veränderung der sicherheitsrelevanten Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verzeichnen ist.

Zugehöriges Kriterium (s.a. Tabelle 8-8)

- Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitlichen Merkmale, insbesondere "Mächtigkeit", flächenhafte bzw. räumliche "Ausdehnung" und "Gebirgsdurchlässigkeit" des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Tabelle 8-8: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Veränderung <u>der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale</u> : „Mächtigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
	Veränderung <u>der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale</u> : „Ausdehnung“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
		über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
	Veränderung der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale, hier: „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre

8.5.2. Gewichtungsguppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens

8.5.2.1. Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

Die mit der Forderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen verbundene Zielsetzung besteht aus geotechnischer bzw. gebirgsmechanischer Sicht darin, im anstehenden Gebirge ein standsicheres Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauen und Endlagerungshohlräumen ohne nachhaltige Schädigung des umgebenden Gebirges (Rissbildung) sowie mit möglichst geringem Aufwand an technischen Sicherungsmitteln (kein tragender Ausbau) für die jeweilig vorgesehene Betriebszeit auslegen zu können.

Darüber hinaus sollten durch anthropogene Einwirkungen in der Betriebszeit und in der Nachbetriebszeit keine für den Erhalt der Barrierenintegrität nachteiligen mechanischen, thermischen oder hydraulischen Prozesse induziert werden (z. B. mechanisch oder thermisch bedingte Rissbildungen, Fluidströmungen). Insbesondere sollen **geotechnische Barrieren**, wie z. B. Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerke, **später** entsprechend dem jeweiligen Stilllegungskonzept **funktionsfähig so hergestellt werden können**, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet ist

Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des anthropogenen Eingriffs (Schacht- und Streckenauffahrung) in das Gebirge mit Entfestigung und Auflockerung des Gesteinsgefüges und Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten in der Bau- und Betriebszeit möglichst gering sind und darüber hinaus im Bereich von geotechnischen Barrieren längerfristig nach der Stilllegung wieder vermindert und schließlich bei jederzeitigem Erhalt der Barrierenintegrität eliminiert werden. Für die Ableitung von Beurteilungsgrößen bzw. Indikatoren zur Überprüfung der Einhaltung der Forderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen werden zunächst Sachverhalte identifiziert, die eine im Sinne eines sicheren Einschlusses günstige Situation charakterisieren und zur Identifizierung der entsprechenden Gebirgsverhältnisse herangezogen werden können:

- Über eine Kontursicherung hinausgehend sollte kein tragender Ausbau erforderlich sein, um mit der Eigentragfähigkeit des Gebirges zusammen standsichere Grubenbaue zu erhalten.
- In den geologischen Barrieren sollten durch die Auffahrung des Endlagers und den Ausbau keine die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden Sekundärpermeabilitäten erzeugt werden
- Die Funktionstüchtigkeit von geotechnischen Barrieren (z. B. Querschnittsabdichtungen) sollte durch konturnahe Gebirgsentfestigung nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus herabgesetzt werden

Ausgehend von diesen Sachverhalten⁵⁹ werden zwei Indikatoren für das Vorliegen von in diesem Sinne günstigen geomechanischen Verhältnissen formuliert, auf die die unten genannten Kriterien ausgerichtet sind:

Indikator 1

Das Gebirge wirkt geomechanisch als Haupttragelement.

Das Gebirge wird als **Haupttragelement** angesehen, wenn von ihm die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden kann (abgesehen von einer Kontursicherung, z. B. **sehr wenig** Anker - Maschendraht).

Indikator 2

Es liegt keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnah entfestigten Auflockerungszone vor.

Außerhalb einer konturnahen Auflockerungszone sind Sekundärpermeabilitäten ohne erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht **detektierbar** und bedingen daher zusätzliche, aber bei entsprechender Planung grundsätzlich vermeidbare Unsicherheiten in späteren Sicherheitsbetrachtungen. Die Prognostizierbarkeit der geohydraulischen Situation im barrierewirksamen Teil des Gebirges wird dadurch herabgesetzt.

Bei der planmäßigen Beschränkung der Gebirgsentfestigung und Gebirgsauflockerung auf konturnahe Bereiche ist die intakte geologische Barriere in ihrer räumlichen Ausdehnung zumindest für den Ist-Zustand eindeutig charakterisierbar (durch Berechnungen) und exemplarisch belegbar (durch Felduntersuchungen).

Eine über den Konturbereich hinausgehende Gebirgsentfestigung muss durch entsprechende Endlagerplanung zwingend vermieden werden.

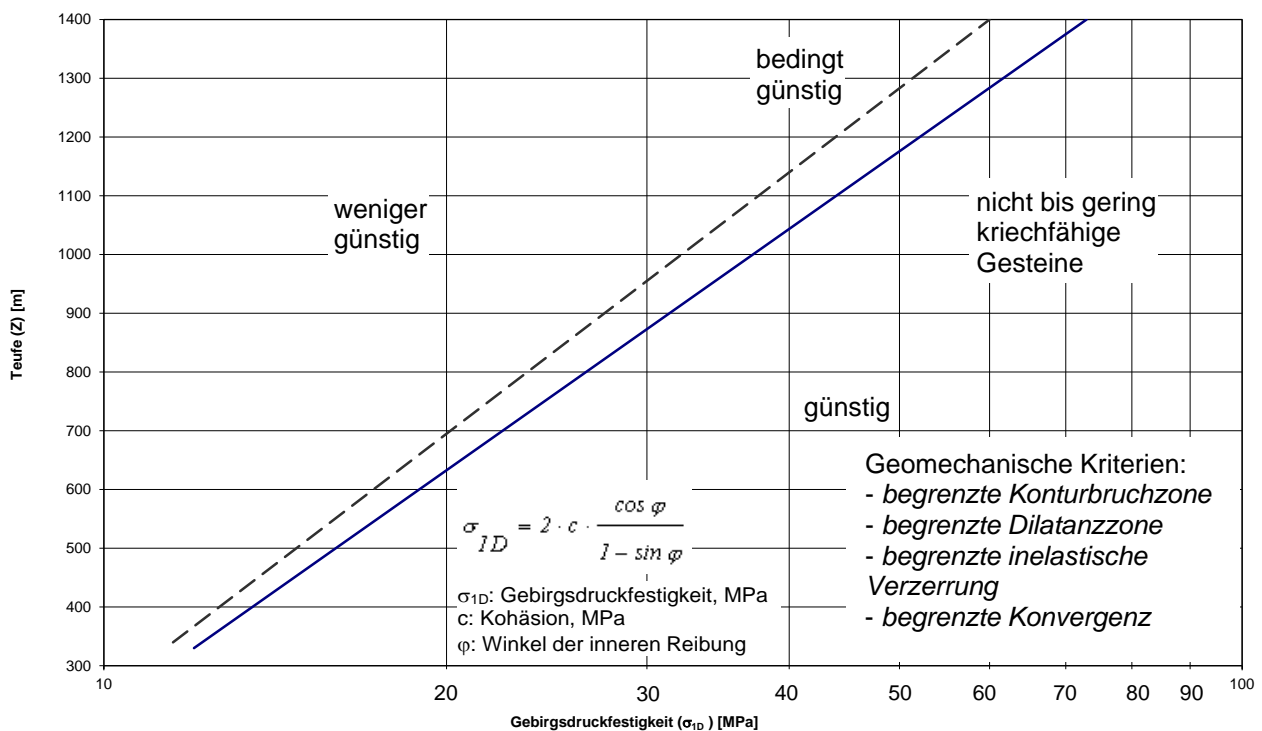
Zugehöriges Kriterium (s.a. Tabelle 8-9)

- Die **Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten** im Wirtsgestein / im einschlusswirksamen Gebirgsbereich **außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone** um die Endlagerhöhlräume sollte **möglichst gering** sein.

⁵⁹ Die Option, die Probleme größerer Tiefe (massiver Ausbau und mögliche Folgen für Langzeitsicherheit) zugunsten größerer Einlagerungstiefe in Kauf zu nehmen, wurde vom AkEnd nicht betrachtet.

Das Vorgehen bei der Kriterienentwicklung und die Herleitung der Beurteilungsmaßstäbe wird in AkEnd (2002)⁶⁰ bzw. in den dort zugrunde gelegten Arbeiten⁶¹ ausführlich beschrieben. Danach besteht bei Berücksichtigung bestimmter **gebirgsartbezogener** Vorgaben ein Zusammenhang zwischen Teufenlage eines Grubenbaus und der Gebirgsfestigkeit, die zur Beurteilung der Neigung zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten genutzt werden kann. Bei der Anwendung des Abwägungskriteriums wird zwischen Gesteinen mit elastisch-sprödem und elastisch-gering plastischem / gering kriechfähigem Materialverhalten einerseits und Gesteinen mit ausgeprägtem Kriechverhalten andererseits unterschieden (siehe Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5).

Abbildung 8-4: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilem) Materialverhalten [nach LUX 2002⁶²]



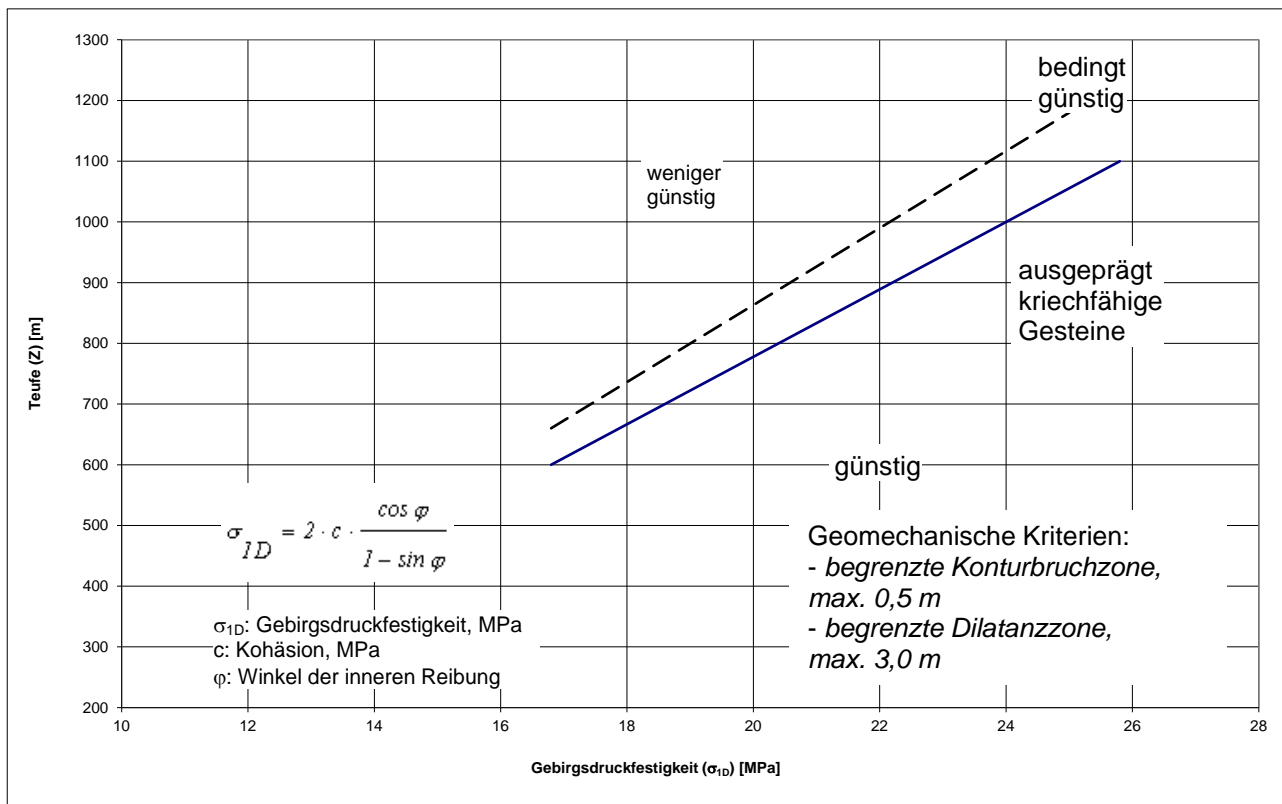
Quelle: nach Lux 2002

⁶⁰ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁶¹ Lux (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen, TU Clausthal, Dezember 2002. K-MAT 12-21.

⁶² Lux (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen, TU Clausthal, Dezember 2002. K-MAT 12-21.

Abbildung 8-5: Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [nach LUX 2002⁶³]



Quelle: nach Lux 2002

⁶³ Lux (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen, TU Clausthal, Dezember 2002. K-MAT 12-21.

Tabelle 8-9: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Neigung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone ⁶⁴	Zulässige Teufenlage in Abhängigkeit von der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit, zu entnehmen dem Lagebezug der Endlagerteufe zur Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit: Abbildung 8-4: Festgesteine mit nicht bzw. gering kriechfähigem Materialverhalten; Abbildung 8-5: Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten	Die zu bewertende Teufe liegt unterhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt mäßig (< 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.

8.5.2.2. Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Schadstofffreisetzung aus dem tiefen geologischen Untergrund in die Biosphäre kann insbesondere über die Migration fluider Phasen erfolgen, und zwar auf im Gebirge primär bereits vorhandenen Wegsamkeiten, auf sekundär durch den anthropogenen Eingriff (Bau und Betrieb des Endlagers) bedingten Wegsamkeiten oder auf durch zukünftige geogene Einwirkungen induzierten Wegsamkeiten.

Eine günstige geologische Gesamtsituation ist daher u. a. dann gegeben, wenn der einschlusswirksame Gebirgsbereich grundsätzlich eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweist.

Mechanismen für die Ausbildung von Wegsamkeiten können Gefügebrauchungen infolge thermomechanischer Beanspruchung (Rissaufweitungen, Rissbildungen) und selektiver Auflösung von Gesteinspartien infolge Einwirkung lösungsfähiger Wässer (geochemisch reaktives Milieu im Rissbereich) sein. Hier bleibt die Kriterienentwicklung auf den Mechanismus mechanisch bedingter Rissaufweitung / Rissbildung beschränkt. Die **selektive Auflösung von Gesteinspartien** infolge Einwirkung lösungsfähiger Wässer (geochemisch reaktives Milieu im Rissbereich) wird hier nicht betrachtet.

⁶⁴ Das Kriterium steht in engem Zusammenhang mit den unter Anforderung 2 (Konfiguration / Tiefe) diskutierten Problemen

Zur weiteren Spezifizierung dieser Anforderung erscheint es plausibel, davon auszugehen, dass sowohl grundsätzliche Gesteinseigenschaften als auch die Relation zwischen schädigungsfreier Gesteinsbeanspruchbarkeit und vorhandener bzw. zu erwartender Gesteinsbeanspruchung in Betracht zu ziehen sind. Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen ist der Ansatz, dass auch in derzeit gering permeablen bis impermeablen Gebirgsformationen zusätzliche Rissysteme entstehen können und zwar dann, wenn unter der Einwirkung zukünftiger geogener oder anthropogener Beanspruchungen

- die Gesteine nicht hinreichend tragfähig sind, um die aufgeprägten Beanspruchungen ohne Überschreitung der Zug- sowie Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit aufzunehmen,
- die Gesteine kein hinreichendes Spannungsrelaxationsvermögen aufweisen, um bruchlos durch einen deformationsbegleiteten Spannungsumlagerungsprozess mit Beanspruchungsabbau die äußeren Lasten aufzunehmen,
- die Gesteine trotz eines ausgeprägt plastisch-viskosen Verhaltens beanspruchungs- und deformationsbedingt Gefügauflockerungen und Gefügeentfestigungen erfahren.

In allen diesen Fällen reagieren die Gesteine auf die äußeren Lasten mit der Ausbildung von neuen bzw. der Weiterentwicklung von schon bestehenden Fissuren (Mikro- bis Makrorissen). Diese Sekundärrisse führen dann auch bei einem primär gering permeablen bzw. impermeablen Gestein nach einer hinreichenden Vernetzung zur Ausbildung einer möglicherweise unvertretbar großen Sekundärpermeabilität.

Da die Anforderung „geringe Neigung zur Rissbildung“ nicht unmittelbar in ein an Maß und Zahl orientiertes und damit einer Abwägung zugängliches Kriterium umgesetzt werden kann, werden zunächst Eigenschaften abgeleitet, die jeweils einzelne Aspekte dieser zentralen Anforderung erfassen und für die dann nachfolgend Kriterien formuliert werden können. Vorhandene generelle Kenntnisse zu Gesteins- und Gebirgseigenschaften unter geotektonischer und endlagerrelevanter Beanspruchung legen zur näheren Ausformung der Anforderung die thesenartige Formulierung folgender Sachverhalte als Eigenschaften nahe:

Zugehörige Kriterien (s.a. Tabelle 8-10)

- Die **Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit** sollte **möglichst gering** sein. Dazu sollte die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein. Dies bedeutet, dass das Gebirge keine bei der Bestimmung der Gesteinsfestigkeit nicht erfassbare Trennfugen / Klüfte aufweisen darf.
- Die **Barrierenwirkung** der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte **aus geowissenschaftlicher, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar** sein. Folgende Sachverhalte können zur Einschätzung verwendet werden:
 - Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein
 - Fossile Fluideinschlüsse
 - Unterlagernde wasserlösliche Gesteine
 - Unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe
 - Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken
 - Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung

- Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien
- Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen (Bewertungsgröße: **Duktilität des Gesteins**).
- **Risse/Risssysteme im Gestein** sollten **bei Beanspruchungsinversion** (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) **geohydraulisch wirksam verschlossen** sein werden (Bewertungsgröße: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung).
- **Risse/Risssysteme im Gestein** sollten **nach der Risschließung geomechanisch wirksam verheilt** sein (Bewertungsgröße: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch **Rissverheilung**).

Tabelle 8-10: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit [Maß ist die Wasserdurchlässigkeit in m/s]	< 10	≤ 100	> 100
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Die Gebirgsformation / der Gesteinstyp wird un-mittelbar / mittelbar anhand eines oder mehrerer der o.g. Sach-verhalte Er-fahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener / technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation / der Gesteinstyp ist man-gels Erfah-rung nicht un-mittelbar / mit-telbar als ge-ring durchläs-sig bis geolo-gisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation / der Gesteins-typ wird un-mittelbar/ mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinrei-chend gering durchlässig identifiziert.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden.)	Duktil / plastisch-viskos ausgeprägt	spröde-duktil bis elasto-viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung	Die Riss-schließung erfolgt aufgrund duk-tilen Mate-rialverhaltens unter Aus-gleich von Oberflächen-rauhigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Riss-schließung erfolgt durch mechanische Rissweiten-verringerung in Verbindung mit sekundären Mechanis-men, z. B. Quelldefor-mationen.	Die Riss-schließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z. B. bei sprödem Materialver-halten, Ober-flächenrau-higkeiten, Brücken-bildung).

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten auf Grund der Bewertung der einzelnen Indikatoren:		Bewertung überwiegend "günstig": Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "bedingt günstig": Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "weniger günstig": Bildung von dauerhaften sekundären Wasserwegsamkeiten zu erwarten

8.5.3. Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

8.5.3.1. Anforderung 7: Gute Gasverträglichkeit

Endgelagerte radioaktive Abfälle können bei Kontakt mit Wasser oder Lösungen durch Korrosion und Radiolyse Gase bilden. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann es zur Gasbildung kommen, wenn Flüssigkeit an die Abfallbehälter gelangt und diese korrodieren. Die Gasbildung kann zu einem Druckaufbau im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Die Gasmengen und die Gasbildungsraten müssen im Rahmen der Szenarienanalyse abgeschätzt werden. Durch den Gasdruckaufbau kann die Integrität der geologischen Barriere gefährdet werden, wenn der Gasdruck den Frac-Druck überschreitet.

Im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen sind auch Auswirkungen des Zweiphasenflusses auf die Radionuklidmigration und Migration radioaktiver Gase zu beachten. Im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen sind auch Auswirkungen des Zweiphasenflusses auf die Radionuklidmigration, dilatanzgesteuerte Gasmigration sowie die Migration radioaktiver Gase zu beachten.

Zur Beurteilung der Auswirkung der Gasbildung auf die Sicherheit des Endlagers, insbesondere auf die Einschlussfunktion von einschlusswirksamem Gebirgsbereich und zugehörigen geotechnischen Barrieren, sind die maximal mögliche Gasmenge, die unter Endlagerungsbedingungen aus dem Abfall gebildet werden kann, sowie die Gasbildungsrate (Volumen pro Jahr) von Bedeutung. Die Gasmenge wird im Wesentlichen von der Art und den Inhaltstoffen der Abfälle, durch die Feuchte in den Abfallgebänden sowie durch das Grundwasser-

bzw. Salzlösungsangebot an die Gebinde bestimmt. Die Gasbildungsrate hängt ab von der Temperatur, der Feuchte und dem chemischen Milieu am Einlagerungsort bzw. im Gebinde.

Zugehörige Kriterien (s.a. Tabelle 8-11)

- Die Gasbildung **der Abfälle** sollte **unter Endlagerbedingungen möglichst gering** sein.

Tabelle 8-11: Gute Gasverträglichkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Wirtsgestein	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	feucht

8.5.3.2. Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit

Die Beurteilung des Wirtsgesteins bzw. des Gesteins des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf Temperaturspannungen ist eng verbunden mit der Frage nach der Bildung von Wasserwegsamkeiten im Barrieregestein und damit nach der Integrität des Endlagers. Modellrechnungen gestatten die Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnungen. Die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, wie der Zugfestigkeit, ermöglicht die Angabe der Bereiche um eine Wärmequelle, in denen Brüche zu erwarten sind.

Umgekehrt lassen sich daraus unter der Randbedingung des vorgegebenen Wärmeeintrags Anforderungen an das Gestein ableiten, die erfüllt sein müssen, wenn die Bruchzone auf die unmittelbare Umgebung des Endlagers beschränkt sein soll, um eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung von einschlusswirksamem Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein zu vermeiden.

Temperaturerhöhungen können außerdem mineralogische Auswirkungen hervorrufen und so zur Beeinträchtigung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins führen. Insbesondere Tonstein und geotechnische Barrieren können von solchen Veränderungen betroffen sein. Aus diesen Zusammenhängen lassen sich folgende Kriterien (bzw. auslegungsrelevante Anforderungen) ableiten:

Zugehörige Kriterien (s.a. Tabelle 8-12)

- Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen kleiner 100°C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen.
- Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.

Tabelle 8-12: Gute Temperaturverträglichkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Temperaturstabilität des Gesteins	Temperatur, bei der es zu Mineralumwandlungen in den Gesteinen kommt [°C]	> 120	100 - 120	< 100
Thermisch bedingte Sekundärpermeabilität	Ausdehnung der thermo-mechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume [m]	< 10	10 - 50	> 50
	Zugfestigkeit [MPa] im Nahbereich (etwa 10 m bis 50 m) um Endlager bei einer Kontakttemperatur von 100°C für Granit Tonstein Steinsalz	> 13 > 8 > 2	≥ 8 ≥ 4 1 - 2	< 8 < 4 < 1

Zur Anforderung "Gute Temperaturverträglichkeit" hat die AG 3 zusätzliche Erläuterungen eingeholt. Die AG3 hat Herrn Minister Wenzel (NMU) gebeten, eine Begründung für ein Temperaturkriterium "100°C" zu formulieren und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), eine Begründung für ein Temperaturkriterium "200°C" beizusteuern.

Beide Beiträge werden nachfolgend wiedergegeben:

Vorschlag des NMU zur Neufassung der Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit ⁶⁵

Die Beurteilung des Wirtsgesteins bzw. des Gesteins des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf Temperaturspannungen ist eng verbunden mit der Frage nach der Bildung von Wasserwegsamkeiten im Barrieregestein und damit nach der Integrität des Endlagers. Modellrechnungen gestatten die Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnungen. Die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, wie der Zugfestigkeit, ermöglicht die Angabe der Bereiche um eine Wärmequelle, in denen Brüche zu erwarten sind.

Umgekehrt lassen sich daraus unter der Randbedingung des vorgegebenen Wärmeeintrags Anforderungen an das Gestein ableiten, die erfüllt sein müssen, wenn die Bruchzone auf die unmittelbare Umgebung des Endlagers beschränkt sein soll, um eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung von einschlusswirksamem Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein zu vermeiden.

Temperaturerhöhungen können außerdem mineralogische Auswirkungen hervorrufen und so zur Beeinträchtigung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins führen. Insbesondere Tonstein und geotechnische Barrieren können von solchen Veränderungen betroffen sein.

⁶⁵ siehe hierzu K-Drs. /AG3-74

Ergänzungsvorschlag Niedersachsen:

Aus geologisch/mineralogischer Sicht sollte ein Wirtsgestein zudem grundsätzlich nicht wesentlich höher aufgeheizt werden, als das Gestein in seiner geologischen Vergangenheit an maximaler Temperatur bereits „erlebt“ hat. Im Allgemeinen wird in den Wirtsgesteinen Ton und Kristallin (im Letzteren auf Grund der Bentonitbarriere) eine Einlagerungstemperatur empfohlen, bei der die durch die Abfallwärme hervorgerufenen Temperatur innerhalb der geotechnischen Barriere 100 °C bis 125 °C nicht überschreitet. Diese Begrenzung ist vor allem den Materialeigenschaften des Bentonits/Tongesteins und der Siedetemperatur von Lösungen (z.B. Vermeidung von Ausfällung von Salzen) geschuldet, um die Integrität des ewG während des anfänglichen Wärmeeintrags nach Einlagerung zu erhalten. In Salzgesteinen ist die Auswirkung von thermisch oder radiolytisch induzierter Gasbildung und Druckaufbau sowie die Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) unter erhöhtem Feuchteeintrag (z.B. durch Salzgrusversatz; Lösungseinschlüsse) kritisch zu bewerten. Die Anwesenheit von inhomogenen Bereichen im Salz (Salztonlagen, Anhydritvorkommen, Carnallititeinschlüssen etc.) kann die thermische Belastbarkeit des Salzgesteins negativ beeinflussen.

Das Wirtsgestein und insbesondere der ewG sollen daher so beschaffen sein, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften, thermomechanische Spannungen und wärmeinduzierte Expansion der Gesteine und ihrer Fluide nicht zu einem Festigkeitsverlust oder zur Bildung von Wasserwegsamkeiten führen können.

Aus diesen Zusammenhängen lassen sich folgende Kriterien (bzw. auslegungsrelevante Anforderungen) ableiten:

Zugehörige Kriterien

Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen kleiner 100 °C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen.

- Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.

Ergänzungsvorschlag Niedersachsen:

- Da wässrige Lösungen in allen Wirtsgesteinen angetroffen werden können, sollte in allen Wirtsgesteinen zur Vermeidung erhöhter Gasdrücke die Temperatur unterhalb des Siedepunktes von Wasser verbleiben (Druckabhängigkeit beachten).

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen der Kriterien:

Anmerkung: Tabelle muss angepasst werden

Vorschlag der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)⁶⁶:

Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit

Durch die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle kommt es zu einem Anstieg der Temperatur im Gebirge. Dieser Temperaturanstieg kann sich je nach zugrundeliegendem Sicherheitskonzept unterschiedlich auf den Einschluss der Abfälle auswirken. Positiv kann sich der Wärmeeintrag beim Wirtsgestein Salz auswirken, da die Kriechfähigkeit des Salzes mit der Temperatur zunimmt

⁶⁶ siehe hierzu K-Drs. /AG3-71

und daher der Einschluss der Abfälle im konvergierenden Gebirge schneller erfolgt. Der Wärmeeintrag kann sich aber auch negativ auswirken, wenn dadurch die Wirksamkeit der einschlusswirksamen Barrieren vermindert wird. Dabei können thermomechanische von mineralogischen Effekten unterschieden werden.

Thermomechanische Temperaturverträglichkeit

Zur Begrenzung hydraulischer Flüsse sollen das Gebirge im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie technische Barrieren wie Salzgrus oder Bentonit eine geringe Permeabilität aufweisen. Zur Ableitung von Indikatoren für die Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins ist daher zu prüfen, welche Auswirkungen ein Temperaturanstieg auf die Permeabilität des Wirtsgesteins selbst sowie auf die Permeabilität der in dem jeweiligen Wirtsgestein erforderlichen technischen Barrieren haben kann.

Permeabilitätserhöhungen können auftreten, wenn bestehende Wegsamkeiten in einem Barrieregestein oder im Material einer technischen Barriere infolge thermischer Volumenänderungen aufgeweitet werden, oder wenn ungünstige Spannungsbedingungen auftreten, die infolge lokaler Festigkeitsüberschreitung neue vernetzte Wegsamkeiten bilden können. Im Nahbereich um ein wärmeentwickelndes Einlagerungsgebäude kommt es infolge der Erwärmung zu einer Ausdehnung des Gebirges bzw. zu einem Anstieg der Druckspannungen und daher nicht zu einer Aufweitung oder Neubildung von Wegsamkeiten. Gleichzeitig kommt es in weiter entfernten Gebirgsbereichen, die weniger erwärmt werden, zu einer Absenkung der Druckspannungen und damit zu einer Verschiebung des Spannungszustands hin zu ungünstigen Spannungsbedingungen. Diese Verschiebung hin zu ungünstigen Spannungsbedingungen erfolgt umso stärker, je größer die Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich ist und je größer der Temperaturgradient im Gebirge ist. Temperaturerhöhung und Temperaturgradient sind umso kleiner, je größer die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität des Wirtsgesteins sind. Günstig sind daher zur Vermeidung thermomechanisch bedingter Barrierenbeeinträchtigungen eine große Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Wärmekapazität des Wirtsgesteins.

Inwieweit eine Begrenzung der maximalen Temperatur der einzulagernden Gebinde dazu beitragen kann, ungünstige Temperatúrauswirkungen zu verhindern, braucht an dieser Stelle nicht diskutiert zu werden, da eine Begrenzung der Einlagerungstemperatur bei jedem beliebigen Standort eine Verringerung der temperaturbedingten Auswirkungen zur Folge hätte, sodass sich daraus keine Kriterien für die Eignung eines Standortes ableiten lassen.

Vom AkEnd wurde als Indikator für die Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins die Ausdehnung der thermomechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume vorgeschlagen. Nach heutigem Wissensstand treten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich jedoch keine ungünstigen thermomechanischen Auswirkungen auf, sondern nur im Fernfeld, z.B. im Abstand von mehreren hundert Metern. Die Ausdehnung einer thermomechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume ist deshalb kein geeigneter Indikator für die Temperaturverträglichkeit.

Ob es im Fernfeld zu thermomechanisch bedingten Festigkeitsüberschreitungen kommen kann, hängt auch von der Gebirgsfestigkeit ab. Die höhere Zugfestigkeit von zum Beispiel Granit gegenüber Salz und Ton kommt dabei jedoch nicht zum Tragen, da bei vorhandenen Trennflächen die Zugfestigkeit ausgedehnter Gebirgsbereiche im Granit nicht größer ist als in anderen Wirtsgesteinen. Deshalb wird in der Gesteinsfestigkeit kein geeigneter Indikator für die thermomechanische Temperaturverträglichkeit gesehen.

Als weiterer thermomechanischer Effekt ist der Prozess des Siedens zu betrachten, der mit dem Erreichen der Siedetemperatur einsetzt, wenn Fluide vorhanden sind. Im Porenraum eines Barrieregesteins vorhandenes bzw. dorthin vordringendes Wasser würde bei atmosphärischem Druck bei 100°C sieden und durch die damit verbundene Expansion der Gasphase den Porendruck erhöhen. Mit dieser Druckerhöhung geht auch eine Erhöhung der Siedetemperatur einher, und der Verdampfungsprozess kommt zum Erliegen, wenn der mit der vorliegenden Temperatur korrespondierende Dampfdruck erreicht ist. Eine Erhöhung der Permeabilität aufgrund dieses Prozesses kann nicht stattfinden, wenn Wasser erst dann in den Porenraum vordringt, wenn Endlagergebäude und technische Barrieren nach Verschluss des Endlagers im Wirtsgestein eingespannt und dem Überlagerungsdruck ausgesetzt sind, weil die möglichen Dampfdrücke in relevanten Temperaturbereichen nur einen Bruchteil des Überlagerungsdruckes betragen, z.B. beträgt bei 200°C der Satteldampfdruck ca. 1,5 MPa gegenüber ca. 18 MPa Überlagerungsdruck in 800 m Tiefe. Anders ist die Auswirkung einer Erwärmung bis zur Siedetemperatur zu beurteilen, wenn Baustoffe bereits in feuchtem Zustand eingebracht werden oder Feuchtigkeit vor der Beaufschlagung des Baustoffs mit dem Gebirgsdruck in den Baustoff eindringen kann. In diesem Fall kann eine Desintegration des Baustoffs auftreten. Für einige Endlagerkonzepte mit Bentonitbuffer wird daher eine Maximaltemperatur unterhalb der Siedetemperatur festgelegt. Als indirektes Kriterium für die Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins hinsichtlich thermomechanischer Effekte kann daher die Frage gelten, ob in dem jeweiligen Wirtsgestein ein Bentonitbuffer erforderlich ist, weil in dem Fall die Maximaltemperatur im Endlager unter Umständen auf 100°C begrenzt werden muss.

Mineralogische Temperaturverträglichkeit

In einigen Sicherheitskonzepten für Endlager in den Wirtsgesteinstypen Ton und Kristallin spielen das Quellvermögen und Sorptionsvermögen von eingebrachtem Bentonit eine Rolle. Daher muss in diesen Konzepten sichergestellt werden, dass die notwendige Sorptionsfähigkeit und das notwendige Quellvermögen des Bentonits nicht durch thermisch bedingte Mineralumwandlungen beeinträchtigt werden. Quellfähigkeit und Sorptionsvermögen von Bentonit sinken, wenn der im Bentonit vorhandene Smektit in Illit umgewandelt wird. Die Illitisierung von Smektit beginnt bereits bei Temperaturen unterhalb 100°C und ist umso intensiver, je höher die Temperatur ist. Auch für die mineralogische Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins kann daher die Frage gelten, ob in dem jeweiligen Wirtsgestein ein Bentonitbuffer erforderlich ist.

Durch die Illitisierung von Smektit kann auch das Sorptionsvermögen des Wirtsgesteins Ton ungünstig beeinflusst werden. Die temperaturbedingte Beeinträchtigung des Sorptionsvermögens ist umso größer, je höher der Smektitgehalt im Ton ist. Die Intensität einer möglichen temperaturbedingten Beeinträchtigung des Sorptionsvermögens des Wirtsgesteins kann daher kein sinnvoller Indikator für die mineralogische Temperaturverträglichkeit sein, weil dabei ein Wirtsgestein mit einem von vornherein geringen Sorptionsvermögen als günstiger eingestuft würde als ein Wirtsgestein mit hohem Sorptionsvermögen.

Mineralumwandlungen können außerdem Auswirkungen auf die Barriereeigenschaften haben, wenn dadurch das Feststoffvolumen verringert wird und sich dementsprechend der für Fluidbewegungen verfügbare Raum vergrößert. Das könnte bei Salzhydraten bei einer Erwärmung über die Temperatur, bei der es zur Kristallwasserabgabe kommt, der Fall sein. An gemahlenem Carnallit wurde unter atmosphärischen Bedingungen ab 80°C Kristallwasserabgabe beobachtet. Unter in-situ Bedingungen liegt die erforderliche Temperatur aufgrund der Einspannung höher. Endlagerkonzepte für das Wirtsgestein Salz sehen auch aufgrund der Schmelztemperatur von Carnallit in Höhe von ca. 170°C einen Abstand der Einlagerungshohlräume von

Kalialzuvorkommen vor. Als Indikator für die Temperaturverträglichkeit speziell des Wirtsgesteins Salz kann daher der Abstand zwischen zwei Kaliflözen gelten.

Aufgrund möglicher temperaturbedingter Mineralumwandlungen pauschal eine Begrenzung der zulässigen Maximaltemperatur im Endlager auf die in der geologischen Vergangenheit vom Wirtsgestein ertragene Maximaltemperatur vorzunehmen, ist nicht sachgerecht, da die Frage, ob eine bestimmte Mineralumwandlung auftritt oder nicht, unabhängig von der in der geologischen Vergangenheit ertragenen Maximaltemperatur sein kann. Beispielsweise tritt die Kristallwasserabgabe von Polyhalit bei 230°C auf, unabhängig davon, ob die Maximaltemperatur einer Salzformation in der Vergangenheit 70°C oder 120°C betragen hat.

Fazit:

Die folgenden Indikatoren können zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit genutzt werden:

Indikator	günstig	weniger günstig
<i>Wärmeleitfähigkeit</i>	<i>groß (z.B. > 5 W/(m K) bei 50°C)</i>	<i>klein (z.B. < 4 W/(m K) bei 50°C)</i>
<i>Wärmekapazität</i>	<i>groß (z.B. > 800 J/(kg K) bei 50°C)</i>	<i>klein (z.B. < 800 J/(kg K) bei 50°C)</i>
<i>Bentonitbuffer</i>	<i>Bentonitbuffer wird nicht benötigt</i>	<i>Bentonitbuffer wird benötigt</i>
<i>Für Salzstandorte: Abstand zwischen zwei Kaliflözen</i>	<i>groß (z.B. > 1.000 m)</i>	<i>klein (z.B. < 500 m)</i>

8.5.3.3. Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden

Für eine Retardation (Rückhaltung) von Radionukliden in der Geosphäre sind die Ionenstärke bzw. die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden im tiefen Grundwasser und der Mineralbestand des Gesteins entscheidend. Weitere retardierende Eigenschaften einer Formation sind Matrixdiffusion (und Sorption an Matrixpartikeln) sowie Filterwirkung gegenüber Kolloiden.

Das Ausmaß der Sorption hängt sowohl von der mineralogischen Zusammensetzung der durchströmten Gesteine als auch vom hydrochemischen Milieu des Tiefenwassers ab. Tonminerale, Mangan-, Eisen- und Aluminium-Oxide, -Hydroxide und -Oxihydrate sowie organische Substanz (z.B. Kohle, Torf) stellen - zumindest unter bestimmten hydrochemischen Milieubedingungen - gute Sorbenten dar. Von den hier interessierenden Gesteinstypen, die als Wirtsgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Frage kommen, trifft das – im Hinblick auf die Zusammensetzung - vor allem auf Tonstein zu. Granit und vergleichbare kristalline Gesteinstypen, aber auch Steinsalz und die meisten damit vergesellschafteten Gesteinstypen weisen hingegen ein generell schwaches Sorptionsvermögen auf, während sie in anderer Hinsicht Vorteile gegenüber anderen Gesteinstypen aufweisen können. Die Bedeutung des Rückhaltevermögens ist daher im Rahmen der abwägenden Gesamtbetrachtung von Endlagersystemen zu beurteilen.

Hinsichtlich des Ausmaßes von Sorption bestehen zwischen den nuklid-, gesteins- und milieuspezifischen Faktoren komplexe Beziehungen, die über die Benennung der geschilderten

allgemeinen Zusammenhänge hinaus die Ableitung eines pauschal anwendbaren quantitativen Kriteriums nicht erlauben. Die Definition und Beurteilung günstiger geochemischer Verhältnisse für Sorptionsvorgänge muss vielmehr im Rahmen einer komplexen gesteins-, nuklid- und milieuspezifischen Fallunterscheidung in späteren Verfahrensschritten vorgenommen werden.

In Sicherheitsbetrachtungen wird als Maß für die Beurteilung des Sorptionsvermögens üblicherweise der lineare Sorptionskoeffizient K_d herangezogen. Ein K_d -Wert von $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ bedeutet bei einer absoluten Porosität des Gesteins von 0,15, dass der Transport von Radionukliden im Grundwasser gegenüber der Abstandsgeschwindigkeit um etwa einen Faktor 10 - 20 verzögert wird. Im Zusammenhang mit der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind solche Gesteinstypen vorteilhaft, die ein Sorptionsvermögen für langlebige Radionuklide aufweisen.

Vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge lässt sich für die Rückhaltung von Radionukliden ableiten (s.a. Tabelle 8-13):

Zugehöriges Kriterium

- Die **Sorptionsfähigkeit** der Gesteine sollte **möglichst groß** sein; der Sorptionskoeffizient (K_d -Wert) sollte für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide größer oder gleich $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ sein.
- Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten möglichst hohe Gehalte an **Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche** aufweisen.

Für die Filterung von Kolloiden lässt sich kein Kriterium ableiten.

Tabelle 8-13: Hohes Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	K_d -Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ [m}^3/\text{kg]}$	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	--

8.5.3.4. Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse

Eine wissenschaftlich nachvollziehbare geochemische Bewertung von potenziellen Endlagerformationen zielt vorrangig auf den Einfluss der lokal/regional auftretenden Tiefenwässer und der festen Mineralphasen der Gesteine auf die Löslichkeit der Radionuklide und damit ihre Freisetzung und Migration bzw. Rückhaltung z. B. durch Sorption und Immobilisierung. Hinzu kommen Fragen möglicher chemischer Angriffe auf das Material technischer und geotechnischer Barrieren und der möglicher Veränderungen der hydrochemischen Bedingungen für Radionuklidfreisetzung und -transport durch eingebrachtes Behälter- und Ausbaumaterial.

Günstige hydrochemische Verhältnisse in einer geologischen Formation werden unter anderem durch ein reduzierendes geochemisches Milieu, geringe Konzentrationen an Komplexbildnern und Kolloiden sowie neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen bei niedrigem CO₂-Partialdruck charakterisiert. Unter derartigen Bedingungen sind geringe Löslichkeiten von Radionukliden zu erwarten.

Als mögliche Indikatoren zur Identifizierung günstiger hydrochemischer Verhältnisse gelten der Eh-Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, der Gehalt an organischen Substanzen und das Fehlen freien Sauerstoffs im Grundwasser sowie darüber hinaus der pH-Wert und die Pufferung durch vorhandene karbonathaltige Gesteine. Für eine Retardation von Radionukliden sind die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z. B. Karbonatkomplexe oder Huminstoffkolloide) im Tiefenwasser und das Vorhandensein von Sorptionsplätzen an Mineralphasen im Gestein entscheidend (s. dazu Anforderung 9). Ein weiterer wichtiger Indikator für günstige hydrochemische Verhältnisse ist das Vorliegen eines geochemischen Gleichgewichtes zwischen Tiefenwasser und Gestein.

Im Zuge der Kriterienentwicklung hat der AkEnd⁶⁷ geprüft, inwieweit sich auf der Basis damals zugänglicher Daten quantitative bzw. qualitative Kriterien für die genannten Indikatoren ableiten lassen (GRS (2001)⁶⁸). Dabei wurden auch das schrittweise Vorgehen bei einer Standortauswahl und die beim jeweiligen Verfahrensschritt voraussichtlich vorliegenden Kenntnisse und Daten berücksichtigt.

gegenwärtige Kenntnisstand zum Chemismus von Tiefenwässern in Deutschland und die heterogene Verbreitung verschiedener Grundwassertypen auf engem Raum lässt derzeit⁶⁹ allerdings keine flächendeckenden Aussagen zur Charakterisierung und Beurteilung von Standortregionen und Standorten auf der Basis hydrochemischer Kriterien zu. Insbesondere bei Grundwässern im für die Errichtung eines Endlagers vorgesehenen Tiefenbereich ist das Wissen über die hydrochemischen Verhältnisse dafür zu lückenhaft. Zuverlässige Aussagen sind daher erst bei genauerer regionaler bzw. standortspezifischer Betrachtung auf Basis entsprechender Daten möglich.

Andererseits können folgende hydro- und geochemische Parameter mit Einfluss auf Löslichkeit und Transportverhalten von Radionukliden als Indikatoren für günstige hydrochemische Bedingungen hinsichtlich Radionuklidlöslichkeit und -transport herangezogen werden. Folgende Zusammenhänge lassen sich benennen:

⁶⁷ AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁶⁸ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (2001): Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "günstige hydrochemische Bedingungen". K-MAT 12-15.

⁶⁹ Angaben aus AkEnd (2002), die der Überprüfung und ggf. Aktualisierung bedürfen.

- Das tiefe Grundwasser in Wirtsgestein / im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll sich mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht befinden.
- Im Bereich des Tiefenwassers sollte ein pH-Wert von 7-8 vorliegen.
- Im Bereich des Tiefenwassers sollten günstige Redoxbedingungen (anoxisch-reduzierendes Milieu) vorliegen.
- Der Gehalt an Kolloiden im Tiefenwasser sollte möglichst gering sein.
- Der Gehalt an Komplexbildnern und die Karbonatkonzentration im Tiefenwasser sollten gering sein.

Zusammenfassend gilt aber, dass zur Ermittlung der Eigenschaft „günstige hydrochemische Verhältnisse“ standortspezifische Kenntnisse und Angaben zur Endlagerkonzeption vorliegen müssen, die in späten Verfahrensschritten bereitgestellt werden können.

8.5.3.5. Anforderung 11: Günstige Bedingungen für den Bau von Verschlussbauwerken

Das Wirtsgestein sollte günstige Bedingungen für den Bau von geotechnischen Verschlussbauwerken (Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse) aufweisen, da diese die maßgeblichen bautechnischen Barrieren zur Rückhaltung der Radionuklide sind. Dazu soll die sich um die Schächte und Strecken bildende Auflockerungszone nur gering sein. Als Indikator kann die Größe und Durchlässigkeit der Auflockerungszone bei Schächten am Ende des Einlagerungszeitraumes verwendet werden.

8.5.3.6. Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges

Zu dieser Anforderung gab es in der AG 3 unterschiedliche Voten, die nachfolgend wiedergegeben werden:

Stellungnahme von Herrn Dr. Fischer und Herr MdB Kanitz⁷⁰:

Zur neuen Anforderung "Hohes Rückhaltevermögen des Deckgebirges von Salzstöcken gegenüber Radionukliden" (Gewichtungsgruppe 3) und zugehöriges neues Abwägungskriterium "Hohe Sorptionsfähigkeit der Gesteine des Deckgebirges":

Die Einführung des Kriteriums steht im Widerspruch zum sicherheitskonzeptionellen Ansatz des sicheren Einschlusses der Abfälle im ewG, der auch der gesamten Methodik der Standortauswahl zugrunde liegt, da es auf eine Rückhaltung außerhalb des ewG abstellt. Es kann daher auch nicht sinnvoll mit anderen Kriterien, die auf einen guten Einschluss im ewG gerichtet sind, abgewogen werden und ist im hohem Maße nachrangig gegenüber anderen in Kriterien noch nicht erfassten Aspekten (Kriechfähigkeit, geringer Wassergehalt des Salzes im ewG, weitgehend abgeschlossene Halokinese, etc.).

Darüber hinaus ist es mit erheblichen Prognoseungewissheiten behaftet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anwendung von nicht sicherheitsgerichteten Mindestanforderungen und Abwägungskriterien die erhebliche Gefahr birgt, dass eignungshöfliche Standorte frühzeitig aus dem Verfahren ausscheiden könnten.]

⁷⁰ siehe hierzu K-Drs. /AG3-72

Stellungnahme zu Beratungsunterlage K-Drs. /AG 3-70 von Herrn Dr. Fischer und Herrn MdB Kanitz⁷¹:

Zur neuen Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) und zugehöriges neues Abwägungskriterium "Schutzfunktion des Deckgebirges von Salzstöcken":

Dem Vorschlag liegt die Annahme zugrunde, dass die Beschaffenheit des Deckgebirges für den Schutz des ewG vor Subrosion maßgeblich sei. Diese Aussage ist jedoch keinesfalls zutreffend, insbesondere dann nicht, wenn über dem ewG mehrere hundert Meter mächtiges Salz lagert.

Die Existenz zahlreicher Salzstöcke in Norddeutschland mit sehr unterschiedlichen Deckgebirgskonfigurationen beweist hingegen, dass selbst bei direktem Kontakt des Salzspiegels mit Grundwasser die Subrosion rasch zum Erliegen kommt und es keines besonderen Schutzes durch das Deckgebirge bedarf.

Maßgebliche Faktoren für Subrosion sind die Tiefenlage des Salzstocks sowie die sich einstellende Dichteschichtung des Grundwassers über dem Salzstock. Die Einstellung einer Dichteschichtung wird wiederum begünstigt durch geringe Salzaufstiegsraten, welche zu gewissen Muldenbildungen am Salzspiegel führen und wiederum eine schwächere Grundwasserdynamik zur Folge haben.

Stellungnahme Herr Dr. Appel⁷², (K-Drs. /AG3-73 vom 21.12.2015):

Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) und zugehöriges Abwägungskriterium "Schutzfunktion des Deckgebirges von Salzstöcken"

Den Barrieren von Endlagersystemen für hoch radioaktive Abfälle kommt eine der beiden übergeordneten Sicherheitsfunktionen "Einschluss der radioaktiven Abfälle" im einschluss-wirksamen Gebirgsbereich (ewG) bzw. "Schutz des ewG" zu. Unter den bei der Standort-auswahl im Vordergrund stehenden geologischen Barrieren übernimmt das Deckgebirge über dem ewG dessen Schutz gegen Einwirkungen von oben bzw. außen. Bei Salzstöcken hat wegen der Wasserlöslichkeit des Wirtsgesteins sowie wegen Wasserlöslichkeit bzw. Wasserleitvermögen mit ihm vergesellschafteter Gesteinskörper und der allgemein vertikalen Ausrichtung der Schichten der Schutz gegen (selektive) Subrosion und ihre möglichen Aus-wirkungen durch ein schützendes Deckgebirge herausragende Bedeutung.

Die mit Errichtung, Betrieb und Abfalleinbringung verbundenen thermischen, hydraulischen und mechanischen Beanspruchungen des ewG und der ihn umgebenden Gesteinskörper in den ersten ca. 10.000 Jahren nach Einlagerung wirken sich auf das Deckgebirge von Salz-stöcken praktisch nicht aus. Es hat daher in dieser Phase für den Schutz des ewG gegen etwaige Einwirkungen von außen besondere Bedeutung. Für den anschließenden Teil des Nachweiszeitraums kann eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion des Deckgebirges durch künftige exogene Prozesse nicht ausgeschlossen werden. Solche Prozesse werden in Deutschland jedoch weder überall noch immer in kritischem Ausmaß auftreten. Eine heute vorhandene Schutzwirkung des Deckgebirges stellt also ein im Auswahlverfahren im Zuge der Abwägung zu berücksichtigendes sicherheitlich positives Standortmerkmal dar.

Mit den Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEND 2002) ist die Beurteilung von Salzstöcken bzw. ihr Vergleich hinsichtlich des Schutzpotenzials des

⁷¹ siehe hierzu K-Drs. /AG3-72

⁷² siehe hierzu K-Drs. /AG3-73

Deckgebirges nur abstrakt bzw. erst spät im Verfahrensablauf möglich. Die Bewertung ist zudem für Außenstehende nur schwierig nachzuvollziehen. Wegen der sicherheitlichen Bedeutung von Subrosion für die sichere Endlagerung, gerade in Salzstöcken, und im Sinne der Verfahrenstransparenz sollte daher dem Kriteriensatz auf Basis AKEND (2002) die Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) mit zugehörigem Kriterium hinzugefügt werden.

Stellungnahme Herr Minister Wenzel⁷³ (K.-Drs. /AG3-74 vom 22.12.2015)

Mindestanforderung „Günstiges Deckgebirge für Salzformationen für einen Zeitraum von 15.000 Jahren“

Für das Wirtsgestein Salz geht es bei dieser Forderung um die Gewährleistung des Schutzes gegen die Beeinträchtigung der Wirtsgesteinsformation und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Subrosion.

In der Salzstudie der BGR von 1995 wurde dazu ausgeführt: „Eine flächenhafte Überdeckung des Caprock einer Salzstruktur mit wasserhemmenden Unterkreidetonen und einer ungestörte Decke aus Sedimenten der Oberkreide und des Alttertiär (z. B. Rupel-Tone) würde ein optimales geologisches Barriere-System darstellen. Dies ist aufgrund der für das Bergwerkskonzept geforderten geringen Tiefenlage des Caprock im Allgemeinen nicht gegeben. Jedoch erscheint auch eine unverritzte und möglichst ungestörte Überdeckung allein durch die Tone des Alttertiär (Eozän, Rupel) akzeptabel.“

Die Abschätzung der verschiedenen ablaufenden Prozesse im Wirtsgestein Salz zeigt insgesamt „– bei aller Ungenauigkeit – eine kritische Zeitspanne, die bis zu mehreren tausend Jahren reichen kann“, in der folgende Störungen/Prozessabläufe auftreten können (Appel & Kreuzsch 2006):

- „Allgemeine gebirgsmechanische Vorgänge/Spannungsumlagerungen, die durch die Existenz der Hohlräume und deren Konvergenz induziert werden...“*
- Thermomechanische Vorgänge, die durch die Ausdehnung des Salzstocks wegen seiner Aufheizung durch die stark wärmeentwickelnden Abfälle auftreten...“*
- Durch die Bildung von Gas können negative Einflüsse auf die Barriere Salzstock und die geotechnischen Barrieren hervorgerufen werden“*

Die heutigen Erkenntnisse und Überlegungen zeigten, „dass eine neue Kaltzeit mit Gletscherüberdeckung in Norddeutschland – gemessen an den tatsächlichen Verhältnissen der Vergangenheit - frühestens in 15.000 – 20.000 Jahren stattfinden kann... Die Umformung ('Beseitigung, Ausräumung') des günstigen Deckgebirges kann im norddeutschen Raum frühestens in ca. 15.000 Jahre von heute geschehen... Eine Abschätzung der Länge der Vorgänge/Prozesse, die den potenziell kritischen Zustand des Endlagers direkt nach Einlagerung verursachen, führt zu einer Zeitspanne von mehreren Tausend Jahren... Ein günstiges Deckgebirge ist also für eine begrenzte Zeit (mehrere Tausend Jahre) unbedingt notwendig.“

⁷³ siehe hierzu K-Drs. /AG3-74

9. Geowissenschaftliche Daten: Informationsbestand und Umgang mit Gebieten mit nicht ausreichender geowissenschaftlicher Datenlage

Als Datenbasis für den Suchprozess der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens (vgl. Kapitel 6.3.1 des Kommissionsberichts) sollen die bei den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) vorliegenden Daten dienen. Auf dieser Grundlage sollen in Phase 1 deutschlandweit Ausschlussgebiete (vgl. Kapitel 6.5.4 des Kommissionsberichts) anhand der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien ausgewiesen sowie potenzielle Wirtsgesteinsvorkommen identifiziert und anhand der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen (vgl. Kapitel 6.5.5 des Kommissionsberichts), Abwägungskriterien (vgl. Kapitel 6.5.6 des Kommissionsberichts) sowie vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen (vgl. Kapitel 6.5.2 des Kommissionsberichts) bewertet werden, so dass unter zusätzlicher Abwägung planungswissenschaftlicher Kriterien (vgl. Kapitel 6.5.8 des Kommissionsberichts) die Phase 1 zu einem Vorschlag mit einer Auswahl an Standorten für die übertägige Erkundung führt.

Die Durchführung von Erkundungsarbeiten vor Ort ist in dieser Phase nicht vorgesehen, daher kommt dem heute vorhanden Datenmaterial und dem daraus zu interpretierenden geologischen Aufbau des Untergrund im Bereich der Wirtsgesteinsvorkommen in Phase 1 eine große Bedeutung zu.

Aus diesem Grund hat die Kommission die Geologischen Dienste der Länder und die BGR um Informationen zu den in den Ländern vorhandenen geowissenschaftlichen Datengrundlagen gebeten. Die vorhandenen Daten mit Bezug zu den geowissenschaftlichen Kriterien wurden von den Behörden daraufhin in Form einer Übersicht zusammengestellt⁷⁴. Als Fazit der in der Arbeitsgruppe 3 der Kommission beratenen Ergebnisse wurde deutlich gemacht, dass nach Auffassung der geologischen Dienste der heutige Kenntnisstand zwar den Beginn des Standortauswahlverfahrens ermögliche, die Informationsdichte über den tieferen Untergrund in Deutschlands aber nicht gleichmäßig ist, so dass Gebiete mit hoher Informationsdichte von solchen mit geringerer Informationsdichte zu unterscheiden sind.

Alle Informationen über den Untergrund werden gemäß Lagerstättengesetz bei den Geologischen Diensten der Länder gebündelt, archiviert und langfristig gesichert. Auf diese Weise ist eine systematische und kontinuierliche Datenerfassung, eine sachgerechte Qualitätssicherung und eine fachkundige Informationsbereitstellung gewährleistet⁷⁵. Hier liegt also prinzipiell bereits ein umfangreicher Bestand an Primär-Daten und nach spezifischen Fragestellungen aufbereiteten Informationen zum tieferen Untergrund vor.

Die heute vorhandenen Primärdaten zum tieferen Untergrund beruhen meist auf Bohrungen, die punktuelle, zunächst eindimensionale Untergrundinformationen einschließlich Materialproben liefern, und indirekten geophysikalischen Untersuchungen, aus deren Interpretation sich sowohl die zwei- und dreidimensionale Verbreitung der Gesteine bzw. Formationen im Untergrund als auch einige ausgewählte spezifische Eigenschaften ableiten lassen. Grundsätzlich arbeiten die Geowissenschaften mit Felddaten, d.h. mit an realen Standorten/Bohrungen ermittelten Informationen, sowie mit Analogieschlüssen, bei denen bekannte Gesteinseigenschaften auf vergleichbare Gesteine übertragen werden und diese dann in die Fläche und den Raum interpoliert

⁷⁴ Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2016). Datengrundlagen für die geowissenschaftlichen Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens. K-MAT 53a.

⁷⁵ Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2012). Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. Papier, erarbeitet für den Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Wittenberg, September 2012.

oder auch extrapoliert werden. Dieser Vorgang der Interpretation vorhandener Informationen muss bezogen auf die Heterogenität der Gesteine und ihre räumliche Abgrenzung sorgfältig durchgeführt und dokumentiert werden.

9.1. Vorhandene Datengrundlagen und -qualität

Die Belegdichte mit Untergrunddaten, insbesondere mit solchen aus mehreren hundert Metern Tiefe, ist in auch Deutschland sehr stark nutzungsorientiert und konzentriert sich konsequenter Weise auf die mit wirtschaftlichen Interessen verknüpften tiefen geologischen Becken wie das Norddeutsche Becken, das Thüringer Becken, den Oberrheingraben und das Alpenvorland, sowie auf klassische Bergbauregionen (z. B. des Steinkohle- und Salzbergbaus). An anderen Stellen fehlt diese Art von Daten zum tieferen Untergrund weitgehend, beispielsweise in den Mittelgebirgsregionen. Neben der inhomogenen Verteilung in der Fläche nimmt die Anzahl an Bohraufschlüssen und anderen geowissenschaftlichen Untersuchungen, und damit der Kenntnisstand, mit zunehmender Tiefe kontinuierlich ab.⁷⁶

Daten des tieferen Untergrundes zu physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Gesteine sowie zu ihren Lagerungsverhältnissen wurden und werden – insbesondere forciert durch die Suche nach Energierohstoffen – überwiegend von der Industrie erhoben und auf die für die Industrie relevanten Fragestellungen hin untersucht und ausgewertet. Das bedeutet z. B., dass für eine Region Bohrungsdaten, Materialproben oder geophysikalische Messungen vorhanden sein können, dass aber die für das Standortauswahlverfahren geforderten Auswertungen, z.B. hinsichtlich der Gesteinseigenschaften und der geowissenschaftliche Kriterien, insbesondere der Abwägungskriterien, bis dato noch nicht durchgeführt wurden.

Bundesweit gesehen ist also festzustellen, dass Dichte und Qualität von Informationen über den geologischen Untergrund insgesamt heterogen und für viele lokale Nutzungsfragen unzureichend sind. Exploration und Datenerhebung durch die öffentliche Hand fanden bzw. finden insbesondere im tieferen Untergrund nur in sehr wenigen Ausnahmefällen statt. Zudem ist zu konstatieren, dass der über lange Zeiträume mit verschiedensten Methoden gesammelte Datenbestand qualitativ sehr unterschiedlich ist und nicht in allen Diensten und für alle Daten digital vorliegt.

Infolgedessen kommen die bisher von Bund und Ländern durchgeführten Studien und Projekte zum tieferen Untergrund im Wesentlichen zu „Potenzialabschätzungen“ oder „Potenzialbewertungen“. Solche durch Interpretation und Abschätzung abgegrenzte Flächen und Räume im Untergrund weisen also nicht zwingend Eignungen oder im Detail günstige Voraussetzungen für bestimmte Nutzungen aus, sondern sind in der Regel Bereiche, die für bestimmte Nutzungen als „weiter untersuchungswürdig“ bewertet werden. Flächen- oder raumdeckende Potenzialdarstellungen für Nutzungen des unterirdischen Raumes sind auf Grundlage der heutigen Kenntnislage daher nur kleinmaßstäblich möglich. Nur bei bereits vorhandenen Nutzungen sind auf Grund von lokal vorliegenden geowissenschaftlichen Erkenntnissen regional begrenzt höhere Auflösungen möglich.

Es ist also festzustellen, dass bei den Geologischen Diensten der Länder und bei der BGR umfangreiche, teils historische Datenbestände vorhanden sind, die für das Standortauswahlverfahren unter Berücksichtigung der o.g. Einschränkungen für das Standortauswahlverfahren zur Verfügung gestellt werden müssen. Dies bezieht nicht nur Unterlagen und Aufzeichnungen aller Art, sondern auch vorhandene Bohrkerns und Materialproben ein. Diese sind im Hinblick auf die geowissenschaftlichen Kriterien sinnvoll

⁷⁶ BGR (2014). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland. Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen. K-MAT 11.

auszuwerten. Gleichzeitig bleibt festzuhalten, dass die Informationsdichte und –qualität geowissenschaftlicher Daten sowie deren räumliche Verteilung bzgl. einzelner geowissenschaftlicher Kriterien (v.a. der Abwägungskriterien) und/oder bzgl. der Wirtsgesteine inhomogen ist und es sowohl im Datenbestand als auch in der Datenaufarbeitung (digital/analog) erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern bzw. einzelnen Regionen gibt.

Moderne Verfahren erlauben heute eine sehr differenzierte Beschreibung des tieferen geologischen Untergrundes, aber flächen- oder gar raumfüllende Informationen mit der für den Suchprozess in Phase 1 gebotenen Auflösung und Qualität liegen nur aus begrenzten Gebieten der Bundesrepublik, insbesondere in den Regionen mit Aufsuchungstätigkeiten der Industrie vor⁷⁷. Die hier vorliegenden geowissenschaftlichen Daten und Informationen bieten grundsätzlich eine gute und umfängliche Grundlage für die Anwendung geologischer Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen.

Mit Blick auf die Phasen des Standortauswahlverfahrens steht aber zur Diskussion, ob bei Zugrundelegung allein der vorhandenen Daten über Schritt 1 und ggf. 2 der Phase I (vgl. Kapitel 6.3.1.1 des Kommissionsberichts) hinauszukommen ist. Für die weitere Einengung mit Blick auf Standortregionen für übertägigen Erkundung unter Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wäre also fallweise zu prüfen, inwieweit die vorliegende Daten- und Informationsgrundlagen für alle verbliebenen Areale durch zusätzliche Daten- und Bohrkernauswertungen oder durch Untersuchungen an vorhandenen Materialproben, unter Hinzuziehung archivierter Rohdaten sowie der Bohrkernarchiven der Geologischen Dienste der Länder oder der Industrie. erweitert werden kann, um hierauf aufbauend eine hinreichend begründete Auswahl an Standortregionen für die nachfolgende untertägige Erkundung treffen zu können. Dabei bezieht sich der Anspruch, Standortregionen in der Phase 1 aus den vorhandenen Informationen heraus im Sinne des Standortauswahlverfahrens zu charakterisieren, ausschließlich auf Vorkommen der potenziellen Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein oder Kristallingestein. Die Aufgabe in Phase 1 ist es daher, die geologische Beschreibung potenzieller Wirtsgesteinsvorkommen in Deutschland zu schärfen und dazu eine umfassende Sichtung und Auswertung vorhandener, auch lediglich archivierter Informationen aus Dokumenten, Datenaufzeichnungen und Bohrkernen durchzuführen und daraus eine schlüssige, den Kriterien des Standortauswahlverfahrens zugängliche dreidimensionale Beschreibung des tieferen Untergrunds im Bereich der Wirtsgesteinsvorkommen zu erarbeiten. Dabei sind in Phase 1 der Standortauswahl auch Möglichkeiten der Extrapolation räumlicher Beschreibung und der Analogieschlüsse aus vergleichbaren geologischen Prozessen zu nutzen, um auch für Gebiete mit geringerer Informationsdichte begründete Aussagen in Bezug auf Wirtsgesteinsvorkommen und auf die geowissenschaftlichen Kriterien treffen zu können.

9.2. Umgang mit Gebieten mit nicht ausreichender geowissenschaftlicher Datenlage, Beteiligung des Nationalen Begleitemiums

Die Kommission ist sich dessen bewusst, dass im Standortauswahlverfahren, das ja zum Ziel hat, einen Standort für ein Endlager mit der bestmöglichen Sicherheit zu finden, in der Phase 1 keine bundesweit gleich gute Datenqualität hinsichtlich des tieferen Untergrundes im Bereich der potenziellen Wirtsgesteinsvorkommen hergestellt werden kann. Der Weg dahin würde jeden Zeitrahmen sprengen. Es ist daher, neben dem normalen Verfahrensablauf, auch damit zu

⁷⁷ Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2012). Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. Papier, erarbeitet für den Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Wittenberg, September 2012.

rechnen, das der Vorhabenträger im Rahmen seiner Untersuchungen in einigen Regionen zu dem Schluss kommt, dass hier nicht genügend geowissenschaftliche Daten zur Verfügung stehen, um diese Gebiete hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung als Standortregion für ein Endlager beurteilen zu können.

Im Sinne der gebotenen Transparenz muss der Vorhabenträger derartige Informationsdefizite klar benennen und dabei Regionen ausweisen, in den er sich aufgrund fehlender Informationen nicht in der Lage sieht, die geforderte schlüssige Beschreibung des tieferen Untergrunds im Hinblick auf potenzielle Wirtgesteinsvorkommen durchzuführen, bzw. nach Anwendung der geowissenschaftlichen Kriterien zu einer Empfehlung hinsichtlich Erkundung, Rückstellung oder Ausschluss der betreffenden Region zu kommen.

Er hat weiterhin zu bewerten, ob in einem solchen Gebiet Wirtgesteinsvorkommen ausgeschlossen werden können, oder ob es trotz Kenntnisdefizits ein Potenzial für ein untersuchungswürdiges Vorkommen gibt, das eine Untersuchung durch geologische Erkundungsmaßnahmen rechtfertigt. Ist ein solches Potenzial gegeben, ist das betreffende Gebiet bei der Ausweisung von Regionen zur übertägigen Erkundung zu berücksichtigen.

Die Kommission ist sich darin einig, dass ein Ausschluss einer Standortregion aus den weiteren Verfahren trotz Kenntnisdefiziten in der Phase 1 des Verfahrens nur dann nachvollziehbar zu begründen ist, wenn in der betreffende Region nach Beurteilung aller Informationen und ggf. Analogieschlüssen nicht mit dem Vorhandensein eines die Mindestanforderungen erfüllenden Wirtgesteinsvorkommen gerechnet werden kann. Die Kommission ist auch der Auffassung, dass die Begründung einer solchen Einschätzung auch Gegenstand einer öffentlichen Erörterung sein muss. Dem Vorhabenträger ist also aufzugeben, in Bezug auf Standortregionen, die er trotz Kenntnisdefiziten für ungeeignet für das weitere Verfahren hält, seinen Verzichtsvorschlag dem Nationalen Begleitgremium zur Erörterung vorzulegen. In Abstimmung mit dem Nationalen Begleitgremium soll dann darüber entschieden werden, ob eine solche Standortregion begründet aus dem Verfahren ausscheiden kann, ob sie bis zum Abschluss des Gesamtverfahrens als Rücksprungoption zurückgestellt werden soll oder ob, abweichend vom Vorschlag des Vorhabenträgers, ein Erkundungsprogramm zur Klärung offener Fragen aufgestellt werden soll.

Im Ergebnis der Diskussion der AG 3 am 19.05.2016 ergaben sich zwei einander ähnliche, im Detail unterschiedliche Thesen zur weiteren Vorgehensweise. Es wurde vereinbart, dass diese beiden Thesen von Mitgliedern der AG 3 weiter ausgeführt werden, soweit sich ein über den oben beschriebenen Text hinaus gehender Ergänzungsbedarf ergibt:

These 1:

Bereits in der Phase 1 werden Gebiete mit Kenntnisdefiziten frühzeitig benannt, bewertet und ggf. erkundet. Hierzu erfolgt eine Abstimmung mit dem Nationalen Begleitgremium, dessen Votum bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden muss. Erkundungsmaßnahmen sollen noch in Phase 1 zu einer Bewertung der betreffenden Region führen im Hinblick auf den nächsten Verfahrensschritt führen. Diesbezügliche Erkundungsprogramme sollen zum Ziel haben Standortregionen, deren Eignungshöflichkeit als nicht bewertbar eingestuft wird, mit bewertbaren Informationen zu versehen um sie damit für das weitere Standortauswahlverfahren zu charakterisieren. Sie können ggf. noch in Phase 1 durchgeführt werden.

Im Sinne des Standortauswahlverfahrens ist eine solche Abstimmung für Gebiete mit Kenntnisdefiziten vom Vorhabenträger frühzeitig herbeizuführen, also nicht erst mit Vorlage seines Gesamtberichts zur Phase 1, sondern zu dem Zeitpunkt, zu dem eine Region trotz Kenntnisdefizits vom Vorhabenträger als nicht weiter zu untersuchen eingestuft wird.

These 2:

Der Vorhabenträger weist Gebiete mit Kenntnisdefiziten in seinem Bericht zur Phase 2 aus, erstellt diesbezügliche Erkundungsprogramme zur Klärung des jeweiligen Standortstatus' und führt diese parallel mit der untertägigen Erkundung potenziell geeigneter Standorte in Phase 2 des Auswahlverfahrens durch.

Der Vorhabenträger hat im Ergebnis der Phase 1 also sowohl Erkundungsprogramme für Standortregionen mit besonders günstigen geologischen Verhältnissen für die übertägige Erkundung vorzuschlagen als auch Vorschläge zur Untersuchung von Gebieten mit Wirtsgesteinspotenzialen, aber nicht ausreichendem Kenntnisstand zu unterbreiten. Das Ergebnis der Phase 1 wird mit dem Nationalen Begleitgremium erörtert, dessen Votum bei der Entscheidung über die weitere Vorgehensweise zu berücksichtigen ist. Die hierfür aufzustellenden Erkundungsprogramme für die nachfolgende Phase 2 des Standortauswahlverfahrens sind für die jeweilige Region spezifisch. Sie sollen zu der Bewertung führen, ob in der jeweils untersuchten Standortregion ein Standort für die untertägige Erkundung vorgeschlagen werden kann, ob die jeweilige Region als Rücksprungoption bis zum Abschluss des Verfahrens zurückgestellt wird oder ob sie begründet aus dem verfahren ausscheidet.

Mit Abschluss der Phase 2 steht dann auch der Status der zunächst unklaren Regionen fest.

10. Planungswissenschaftliche Kriterien

Zur Frage der planungswissenschaftlichen Kriterien hat das Öko-Institut im Januar 2016 einen Zwischenbericht⁷⁸ vorgelegt, der von der AG 3 als Vorbereitung für die Diskussionen im Rahmen des Fachworkshops am 29. und 30.01.2016 in Berlin verwendet wurde. Das nachfolgende Kapitel gibt diesen Zwischenbericht noch einmal unverändert wieder.

Es ist dabei darauf hinzuweisen, dass es sich bei dem hier dokumentierten Diskussionsstand um den Stand zum Jahresende 2016 handelt, der im Rahmen der weiteren Befassung der AG 3 mit dem Thema der planungswissenschaftlichen Kriterien mit Unterstützung durch das Öko-Institut eine iterative umfassende Weiterentwicklung⁷⁹ erfahren hat.

10.1. Hintergrund und Zielsetzung

Gemäß der Zielsetzung § 1 Abs. 1 des Standortauswahlgesetzes (StandAG) ist ein

„Standort für eine Anlage zur Endlagerung [...] zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet.“

Dies bedeutet, dass die Langzeitsicherheit Vorrang vor anderen Erwägungen hat, die ebenfalls Eingang in die Standortfestlegung finden.

Die Endlagerkommission hat gemäß § 4 Abs. 2 (2) des Standortauswahlgesetzes die Aufgabe,

„geowissenschaftliche, wasserwirtschaftliche und raumplanerische [...] Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung [...]“

für das Standortauswahlverfahren zu erarbeiten. Somit sind auch die wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Kriterien Bestandteil des gemäß den Regelungen des § 4 Abs. 5 vom Bundestag gesetzlich festzulegenden Kriteriensatzes für die Standortauswahl.

§ 13 Abs. 1 regelt für die Ermittlung der in Betracht kommenden Standortregionen und Auswahl für die untertägige Erkundung folgendes Vorgehen unter Anwendung der wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Kriterien:

„Der Vorhabenträger ermittelt zunächst ungünstige Gebiete, die nach den Sicherheitsanforderungen sowie den geowissenschaftlichen, wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Ausschlusskriterien offensichtlich ungünstige Eigenschaften aufweisen.“

Darüber hinaus finden sich verschiedene indirekte Bezüge zu den wasserwirtschaftlichen und raumplanerischen Kriterien, da diese als Teilmenge unter den gemäß § 4 Absatz 5 gesetzlich festgelegten Anforderungen und Kriterien subsumiert sind. Sie fließen demgemäß in folgende Verfahrensschritte ein:

- Erarbeitung von Vorschlägen für die standortbezogenen Erkundungsprogramme und Prüfkriterien für die übertägige Erkundung der ausgewählten Standorte (§ 15 Abs. 1 (1))
- Erstellung weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen auf der Grundlage der Erkundungsergebnisse der übertägigen Erkundungen (§ 16 Abs. 2)

⁷⁸ Öko-Institut (2016). Zwischenbericht: Beitrag zur Erarbeitung einer Workshop-Unterlage „Planungswissenschaftliche Kriterien“ im Rahmen des Gutachtens „Fragen der Standortauswahl“. 20.01.2016.

⁷⁹ siehe hierzu K-Drs. 172, 172a

- Erarbeitung eines Vorschlags für eine sachgerechte Standortauswahl für die Wirtsgesteinsarten, auf die sich die weitere Erkundung beziehen soll (§ 16 Abs. 2)
- Begründung des vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgung zu erstellenden Standortvorschlags (§ 19 Abs. 1)

Demzufolge sind planungswissenschaftliche Kriterien grundsätzlich in allen Phasen des Auswahlverfahrens relevant und können sowohl Ausschlusskriterien als auch Mindestanforderungen oder Abwägungskriterien sein.

Die AG 3 hat daher das Ziel, zu folgenden Aspekten planungswissenschaftlicher Kriterien Empfehlungen zu erarbeiten:

- Inhaltliche Definition planungswissenschaftlicher Kriterien:
 - Definition der planungswissenschaftlichen Kriterien in einem Detaillierungsgrad, der die Betrachtungsschwerpunkte als Cluster mit ihren jeweiligen Subthemen abbildet
 - Differenzierung nach obertägigen und untertägigen Einflussgrößen
 - Identifizierung relevanter Kriterienkategorien (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien)
- Prozedurale Aspekte der Anwendung planungswissenschaftlicher Kriterien
 - Identifikation der für die Anwendung relevanten Phasen des Auswahlverfahrens
 - Verhältnis geowissenschaftlicher und planungswissenschaftlicher Kriterien in den verschiedenen Phasen des Auswahlverfahrens
 - Gewichtung der planungswissenschaftlichen Kriterien untereinander

Es ist nicht das Ziel der AG 3, eine vollständige Methodik zur Anwendung der planungswissenschaftlichen Kriterien im Verfahren im Sinne von Vorgaben für den multikriteriellen Vergleich verschiedener Regionen bzw. Standorte zu erarbeiten.

Die vorliegende Unterlage fasst den aktuellen Diskussionsstand der AG 3 zu den planungswissenschaftlichen Kriterien zusammen und ergänzt diesen um einen ersten Vorschlag für einen möglichen Kriteriensatz, der hier als Kapitel 10.5 enthalten ist.

Anhand von Fragen und Thesen sowie des Vorschlags für einen Kriteriensatz zeigt die Unterlage mögliche Schwerpunkte für die Diskussion des Themas in der Arbeitsgruppe 5 bei der Fachtagung am 29./30. Januar 2016 auf.

10.2. Begriffsbestimmungen

Planungswissenschaftliche Kriterien

In der AG 3 wird derzeit – in Übereinstimmung mit dem Vokabular des AkEnd – mehrheitlich von „Planungswissenschaftlichen Kriterien“ gesprochen. Im StandAG finden sich die Begriffe „wasserwirtschaftliche“ und „raumplanerische“ Kriterien. Sie stellen nach derzeitigem Verständnis jeweils eine Teilmenge der „Planungswissenschaftlichen Kriterien“ dar.

Zu klären ist, ob auch sozio-ökonomische Faktoren, die im Stand AG nicht erwähnt sind, als Teilmenge der planungswissenschaftlichen Kriterien zu betrachten sind, oder ggf. eine eigene Gruppe sozialwissenschaftlicher Aspekte darstellen.

Kriterienkategorien

Im Zuge der Diskussion geowissenschaftlicher Kriterien hat die AG 3 für die Systematisierung der Kriterienentwicklung ein einheitliches Verständnis der Kategorien "Ausschlusskriterium", Mindestanforderung und "Abwägungskriterium" entwickelt, das zu folgenden Begriffsbestimmungen führte⁸⁰:

Ausschlusskriterium:

Ein Ausschlusskriterium ist ein Kriterium, bei dessen Erfüllung eine Standortregion bzw. ein Standort nicht für ein Endlager geeignet ist und daher aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen wird. Die Ausschlusskriterien bleiben während des gesamten Auswahlverfahrens gültig.

Mindestanforderung:

Eine Mindestanforderung für die Auswahl einer Endlagerregion bzw. eines Endlagerstandortes ist eine Anforderung, die auf jeden Fall eingehalten werden muss. Sofern sie nicht eingehalten wird, ist der Standort nicht geeignet und wird daher aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen. Die Mindestanforderungen bleiben während des gesamten Auswahlverfahrens gültig.

Abwägungskriterium:

Durch Abwägungskriterien sollen Standortregionen bzw. Standorte, die nach Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Verfahren verblieben sind, untereinander verglichen werden (zusammen mit den Ergebnissen von Sicherheitsuntersuchungen).

Es erscheint zielführend, diese Begriffsdefinitionen, sofern sich die jeweilige Kategorie als einschlägig erweist, auch bei der Entwicklung planungswissenschaftlicher Kriterien zu verwenden, um ein einheitliches Verständnis sicherzustellen.

⁸⁰ siehe hierzu K-Drs. AG3-63, Kap. 2

10.3. Grundlage für die inhaltliche Definition planungswissenschaftlicher Kriterien

10.3.1. Exemplarische Kriteriensätze

Die AG 3 hat bisher keinen eigenen abgestimmten Kriteriensatz für die planungswissenschaftliche Bewertung von Standorten entwickelt. Daher werden nachfolgend die Kriteriensätze des AkEnd (AkEnd 2002)⁸¹ und des Schweizer Sachplanverfahrens Geologische Tiefenlager (BFE 2008)⁸² als Diskussionsgrundlage in leicht verkürzter Form wiedergegeben.

10.3.1.1. Kriteriensatz des AkEnd

AkEnd (2002)⁸³ schlägt folgende Liste planungswissenschaftlicher Ausschlusskriterien vor:

Tabelle 10-1: Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien, gemäß (AkEnd (2002)⁸⁴ Tabelle 4.8)

Beurteilungsfeld	Kriterium	Begründung	Anmerkung
Natur- und Landschaftsschutz	diverse aufgrund des Bundesnaturschutzgesetzes geschützte Gebietsarten	geschützt gemäß §§ 23 - 25, 28 – 30 BNatschG	Einzelfallprüfung für Schutzgebiete nach §§ 24, 25, 28 – 30 BNatschG
Land- und Forstwirtschaft	Schutz- und Bannwälder, Naturwaldreservate	Forstgesetze d. Länder, z. B. § 22 Hess. Forstgesetz	länderspezifische Regelungen, Einzelfallprüfung
Wassernutzung	festgesetzte, vorläufig sichergestellte und geplante Trinkwasserschutzgebiete und Heilquellenschutzgebiete	§ 19 Abs. 2 WHG, Wassergesetze der Länder	zumindest Schutzzonen I und II
Überschwemmungsgebiete	festgesetzte, vorläufig sichergestellte und geplante Überschwemmungsgebiete	§ 32 Abs. 2 WHG, Wassergesetze der Länder	

Einzelfallprüfung bedeutet: Prüfen, ob bzw. welche Flächenanteile der entsprechenden Gebiete so stark geschützt sind, dass sie ausgeschlossen werden müssen.

Hinweise zu Tabelle 10-1.

- Die in (AkEnd 2002)⁸⁵ entsprechend den verschiedenen Paragraphen des BNatschG einzeln aufgeführten Kriterien im ersten Beurteilungsfeld wurden zusammengefasst. Die zitierten Rechtsgrundlagen entsprechen dem Stand 2002.
- Der AkEnd schränkt im Bereich des Natur- und Landschaftsschutzes sowie der Forstwirtschaft die Klassifizierung als Ausschlusskriterium dahingehend ein, dass dies nur gilt, wenn in einer qualitativen Einschätzung eine sehr starke Schutzbedürftigkeit anzunehmen ist. Insofern ist auch hier neben dem Ausschluss- auch bereits ein Abwägungsgedanke verankert. Die entsprechenden Kriterien finden sich daher auch in der Liste der Abwägungskriterien des AkEnd.

⁸¹ AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁸² BFE (2008). Schweizer Bundesamt für Energie (BFE). Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bern, 2008

⁸³ a.a.O.

⁸⁴ a.a.O.

⁸⁵ a.a.O.

Als Abwägungskriterien schlägt AkEnd⁸⁶ die Kriterien gemäß Tabelle 10-2 vor:

Tabelle 10-2: Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien, gemäß (AkEnd 2002 Tabelle 4.9)

Beurteilungsfeld	Kriterium	Begründung
Natur- und Landschaftsschutz	Landschaftsschutzgebiete, Naturparks, Biosphärenreservat etc., Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für Natur und Landschaft	§§ 26, 27 BNatschG, §§ 25, 29 und 30 BNatschG *) Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Land- und Forstwirtschaft	Waldflächen mit besonderen Funktionen, Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für Land- und Forstwirtschaft, Gebiete landwirtschaftlich wertvoller Flächen (z. B. Sonderkulturen)	Bundeswaldgesetz, Wald- und Forstgesetze der Länder *) Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Erholung	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für die Erholung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Denkmalschutz	Bau-, Kultur- oder archäologische Denkmale, Bodendenkmale, bewegliche Denkmale	Denkmalschutzgesetze der Länder *)
Wassernutzung	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für die Wassergewinnung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
[Reststoffgewinnung] (gemeint war „Rohstoffgewinnung“)	Vorranggebiete und Vorsorgegebiete für oberflächennahe und tiefliegende Rohstoffe	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Konkurrierende Nutzung des untertägigen Raumes	Vorranggebiete Infrastruktur, Energieversorgung, Abfallentsorgung	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Infrastruktur	Verkehrsanbindung, Ver- und Entsorgungsmöglichkeiten, Vorrangstandorte für bestimmte Nutzungen (z. B. Energieerzeugung, Abfallbehandlung), Schutzzonen um Flughäfen, militärische Anlagen u. ä.	Vorgaben der Raumordnung und Landesplanung
Mensch und Siedlung	Abstand zu Wohn- und Siedlungsgebieten	z. B. Abstandserlass NRW

*) Sofern die **Einzelfallprüfung** ergibt, dass sie nicht unter die Ausschlusskriterien fallen.

Mindestanforderungen sieht der AkEnd im Kontext planungswissenschaftlicher Kriterien nicht vor.

⁸⁶ AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

10.3.1.2. Kriteriensatz im Schweizerischen Sachplan geologische Tiefenlager

Die Grundalgen für die Auswahl eines Endlagerstandorts in der Schweiz sind im Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil (BFE 2008) geregelt. Die planungswissenschaftlichen Aspekte sind dort folgendermaßen zusammengefasst (s. Tabelle 10-3):

Tabelle 10-3: Raumplanerische Aspekte: Sachbereiche und Indikatoren, gemäß BFE (2008)⁸⁷, Anhang II

Sachbereiche	Indikatoren
1. GESELLSCHAFT	
1.1 Siedlungsentwicklung	1.1.1 Bestehende Siedlungsgebiete, 1.1.2 Geltende unüberbaute Bauzonen 1.1.3 Vorgesehene weitere Entwicklungsgebiete
1.2 Naherholungsgebiete	1.2.1 Bestehende Naherholungsgebiete
1.3 Erschließungsinfrastruktur	1.3.1 Beanspruchte, neu versiegelte Flächen 1.3.2 Konflikt- oder Synergiepotenzial mit anderen Erschließungsvorhaben
1.4 Transportwege	1.4.1 Bahn- und Straßennetz
1.5 Landes-, Kantons- und Gemeindegrenzen	1.5.1 Betroffene Gebietskörperschaften
2. WIRTSCHAFT	
2.1 Wirtschaftlichkeit	2.1.1 Investitionskosten 2.1.2 Kosten für formelle/materielle Enteignung
2.2 Standortattraktivität Wirtschaft und Wohnen	2.2.1 Chancen und Risiken zur Stärkung der Wertschöpfung 2.2.2 Chancen und Risiken der Ab- und Zuwanderung 2.2.3 Wohnungs- und Baulandmarkt 2.2.4 Bevölkerungsstruktur 2.2.5 Arbeitsmarkt und regionale Wirtschaftsstruktur
2.3 Tourismus/Freizeit	2.3.1 Betroffene Tourismusgebiete und -routen, Thermalbäder
2.4 Landwirtschaft/ Bodenversiegelung	2.4.1 Beanspruchte Fruchtfolgeflächen 2.4.2 Tangierte Sonderkulturen mit Herkunftsbezeichnung
2.5 Nutzung des Untergrunds	2.5.1 Mineralquellen und Thermen 2.5.2 Tangierte Rohstoffabbaugebiete und -vorkommen, Geothermie 2.5.3 Erdverlegte Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen

⁸⁷ BFE (2008). Schweizer Bundesamt für Energie (BFE). Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bern, 2008

Fortsetzung: Tabelle 10-3: Raumplanerische Aspekte: Sachbereiche und Indikatoren, gemäß BFE (2008), Anhang II

Sachbereiche	Indikatoren
3. ÖKOLOGIE	
3.1 Natur- und Landschaftsschutz	3.1.1 Konflikte mit gebietsspezifischen Schutzziele - Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler von nationaler Bedeutung (BLN) - Inventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz (ISOS) - Moorlandschaften, Flach- und Hochmoore - Auengebiete - Wildkorridore/Rote Listen der gefährdeten Arten - Kantonale Natur- und Landschaftsschutzgebiete - Weitere Bundesinventare und Schutzgebiete
3.2 Wald	3.2.1 Betroffene Flächen, aufgeteilt nach Waldfunktionen
3.3 Gewässerschutz	3.3.1 Betroffene Grundwasserschutzzonen S1-S3 sowie Grundwasserschutzareale 3.3.2 Betroffene Gewässerschutzbereiche 3.3.3 Betroffene Oberflächengewässer 3.3.4 Betroffene wasserrechtliche Konzessionen
3.4 Altlasten	3.4.1 Altlastenkataster
3.5 Störfälle	3.5.1 Gefahrenpotenzial Betriebe, Verkehrswege
3.6 Luft- und Lärmbelastung	3.6.1 Betroffene Personen am Wohnort (Immissionsgrenzwerte Tag und Nacht) 3.6.2 Betroffene Personen am Arbeitsort (Immissionsgrenzwerte Tag)
3.7 Naturgefahren	3.7.1 Hochwassergefährdete Gebiete 3.7.2 Erosionsgefährdete Gebiete
3.8 Ausbruchmaterial	3.8.1 Deponiestandorte/Verwertung/Transportwege

Hinweise zu Tabelle 10-3:

- Der Kriteriensatz des Sachplans differenziert nicht zwischen verschiedenen Kriterienkategorien (Ausschluss- oder Abwägungskriterien)
- Aufgrund der Ausführungen zur Umsetzung des Sachplans ergibt sich, dass es sich um Abwägungskriterien handelt, wobei der Abwägungsprozess im Wesentlichen zwischen dem für den Sachplan geologische Tiefenlagerung zuständigen Bund und dem jeweiligen Kanton mit seinen Zuständigkeiten für die Raumplanung erfolgt.
- Der Sachbereich „3.5 Störfälle“, unter dem gemäß 3.5.1 die Gefährdung des Endlagers durch externe Einwirkungen aus benachbarten Betrieben oder Verkehrswegen zu betrachten ist, ist in Deutschland üblicherweise Bestandteil der Sicherheitsnachweise für kerntechnische Anlagen. Unter raumplanerischen Gesichtspunkten wäre er insofern nur dann zu betrachten, wenn sich aufgrund eines unzulässigen Gefahrenpotenzials das Erfordernis einer Verlegung oder Nutzungsänderung entsprechender Betriebe oder Verkehrswege ergäbe.

Sowohl die AkEnd- als auch die BFE-Kriterien weisen verschiedene Überschneidungen mit den Untersuchungsgegenständen der strategischen Umweltprüfung bzw.

Umweltverträglichkeitsprüfung auf. Dies sollte bei der Integration planungswissenschaftlicher Prüfungen in den Prozessablauf sowohl hinsichtlich der Frage der zeitlichen Einordnung beider Prüfprozeduren als auch hinsichtlich der koordinierten Nutzung von Daten und Untersuchungsergebnisse sowie der Entwicklung und Anwendung von Bewertungsmaßstäben berücksichtigt werden.

Sozio-ökonomische Aspekte sind sowohl beim AkEnd als auch im Schweizer Sachplanverfahren Bestandteil des Auswahlprozesses und werden von beiden in relativ engem Zusammenhang mit den planungswissenschaftlichen / raumplanerischen Aspekten behandelt. Bei der Festlegung der planungswissenschaftlichen Kriterien sollten ggf. relevante Zusammenhänge berücksichtigt werden.

10.3.2. Differenzierung nach obertägigen und untertägigen Planungsaspekten

Die Raumordnung ist traditionell ein Instrument, das sich auf die Planung obertägiger Räume bezieht, um Raumsprüche unterschiedlicher bestehender oder geplanter Vorhaben zu koordinieren und zu regeln.

Der AkEnd stellt diesbezüglich im Hinblick auf ein Endlagerprojekt fest:

Bei jeder raumbedeutsamen Maßnahme – und dazu gehört auch die Endlagerung – kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Konflikten mit bestehenden oder geplanten Flächennutzungen oder Schutzgebietsausweisungen. In der Regel wird sich diese Konfliktsituation auf die für die oberirdischen Einrichtungen des Endlagers benötigten Flächen beschränken, da sich die meisten raumordnerischen Flächen bzw. Schutzgebietsausweisungen auf die Nutzung der Erdoberfläche selbst oder oberflächennaher Ressourcen bzw. Schutzgüter, einschließlich Oberflächenwasser und Grundwasser, beziehen. (AkEnd (2002)⁸⁸, S.191)

In den letzten Jahren hat sich darüber hinaus auch verschiedentlich die Frage untertägiger Nutzungskonkurrenzen gestellt. Die geologische Endlagerung konkurriert in dieser Hinsicht grundsätzlich mit Vorhaben zur Rohstoffgewinnung, zur Nutzung von Tiefenwärme (tiefe Geothermiebohrungen) oder zur Verbringung von Kohlendioxid in den Untergrund (Carbon Capture and Storage, CCS).⁸⁹

Bei der Aufstellung planerischer Kriterien ist daher zu differenzieren zwischen

- Kriterien, die sich auf Nutzungskonkurrenzen oder -konflikte im Untergrund beziehen und daher in Bezug auf die Lage der untertägigen Einlagerungsbereiche zu betrachten sind, und
- Kriterien, die sich auf obertägige Nutzungskonkurrenzen oder -konflikte beziehen und daher in Bezug auf die Lage der obertägigen Anlagen eines Endlagerbergwerks zu betrachten sind.

Hinsichtlich der obertägigen Planungskriterien ist zu berücksichtigen, dass

- der Zugang zu einem Endlager – und damit die Anordnung der obertägigen Anlagen – nicht zwangsläufig über einen Schacht in unmittelbarer Nähe der Einlagerungsbereiche erfolgen muss. Es ist auch möglich, den Zugang über eine Rampe herzustellen, deren Einfahrtbereich in

⁸⁸ AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

⁸⁹ zur Raumplanung im Untergrund siehe auch: Nicolai, H.: Vorschlag für eine Bundesfachplanung Endlager, 07. Januar 2016. K-Drs. / AG3-82.

einem Radius von wenigen Kilometern um den untertägigen Einlagerungsbereich angeordnet sein kann.

- vom Einlagerungsbereich selber, der in mehreren hundert Metern Tiefe liegt, keine Wirkung auf die oberhalb davon an der Tagesoberfläche vorhandenen Nutzungen ausgeht, so dass sich in dieser Hinsicht kein Nutzungskonflikt beispielsweise mit Siedlungsflächen, Naturschutzgebieten oder forst- und landwirtschaftlichen Nutzungen ergibt.

10.3.3. Identifizierung relevanter Kriterienkategorien

Im Bereich der geowissenschaftlichen Kriterien hat sich die Verwendung der Kriterienkategorien

- Ausschlusskriterien
- Mindestanforderungen
- Abwägungskriterien

etabliert, die bereits vom AkEnd vorgeschlagen wurde.

Mindestanforderungen

Betrachtet man exemplarisch die in Kapitel 10.3.1 dargestellten Kriteriensätze, so wird deutlich, dass bei der planerischen Bewertung im Wesentlichen „Negativkriterien“ zur Anwendung kommen, d.h. solche, die die Nutzung eines Standorts aufgrund bestimmter Randbedingungen, insbesondere konkurrierender Nutzungen, in Frage stellen. Mindestanforderungen verfolgen hingegen den Zweck, bestimmte Eigenschaften zu konstatieren, die einen Standort für die gewünschte Nutzung unter Anwendung absoluter Indikatoren (wie z.B. der maximal zulässigen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers) besonders geeignet erscheinen lassen. Es geht somit bei der Anwendung von Mindestanforderungen nicht um die Bewältigung konkurrierender Belange mittels Abwägungsverfahren, wie sie der Raumordnung eigen ist. Die Einführung von Mindestanforderungen ist daher aus derzeitiger Sicht bei der Entwicklung planungswissenschaftlicher Kriterien für ein Endlager nicht zielführend.

Es verbleiben somit die Kategorien Ausschluss- und Abwägungskriterien.

Ausschlusskriterien und Abwägungskriterien

Die Entscheidung, ob im Kontext planungswissenschaftlicher Kriterien auch Ausschlusskriterien zu definieren sind, bedarf einer sorgfältigen Abwägung, bei der die Forderung nach dem Primat der Sicherheit des Endlagers über eine Million Jahre eine zentrale Rolle spielt.

Für das Standortauswahlverfahren für ein geologisches Tiefenlager in der Schweiz ist der Ausschluss von Flächen aufgrund planungswissenschaftlicher Kriterien nicht möglich (BFE (2008)⁹⁰, S. 37):

„Während Entscheide zur Sicherheit für sehr lange Zeiträume relevant sind, haben die sozioökonomischen und raumplanerischen Aspekte einen kurz- bis mittelfristigen Einfluss; d.h. sie sind vor allem für die Projekt-, Bau- und Betriebsphase wie auch für die Nachbetriebsphase bis zum Verschluss des Lagers wichtig. Raumnutzung und sozioökonomische Aspekte sollen bei der Standortwahl berücksichtigt werden, wenn sicherheitstechnisch gleichwertige Standorte zur Auswahl stehen.“

Eine Entscheidung für die Anwendung planungswissenschaftlicher Ausschlusskriterien könnte bei zugespitzter Betrachtung beispielsweise dazu führen, dass eine geologische Formation, die aus

⁹⁰ BFE (2008). Bundesamt für Energie (BFE). Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bern, 2008

naturwissenschaftlich-technischer Sicht die bestmögliche Sicherheit bieten würde, nicht in Frage kommt, weil die obertägigen Anlagen innerhalb eines Naturschutzgebietes (mit Schutzstatus nach der FFH-Richtlinie) oder eines Trinkwasserschutzgebietes angeordnet werden müssten.

Grundsätzlich denkbar ist auch der Fall, dass sich die bevorzugte Geologie im Bereich einer großen Industrieanlage oder eines dicht besiedelten Ballungsgebietes befindet. Auch in diesen Fällen wäre eine wesentliche Frage, ob die obertägigen Anlagen des Endlagers durch Errichtung einer Rampe mit hinreichendem Abstand zur vorhandenen Bebauung und Nutzung positioniert werden können. Sollte dies nicht gelingen, wäre ein solcher Standort nur unter massiven Eingriffen in Eigentumsrechte sowie die sozialen und wirtschaftlichen Zusammenhänge der Region denkbar.

Das Primat der Langzeitsicherheit setzt hinsichtlich der Definition nicht primär sicherheitsbezogener Ausschlusskriterien enge Grenzen. Wie eng diese Grenzen im Hinblick auf planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien zu ziehen sind, ist im Wesentlichen gesellschaftlich und politisch zu entscheiden. Aus naturwissenschaftlich-technischer Perspektive kann diese Entscheidung durch Informationen z.B. über die mögliche räumliche Entkopplung ober- und untertägiger Anlagen oder ihre umweltrelevanten Aus- und Wechselwirkungen untersetzt werden.

Die Abwägungskriterien sind in ihrer Wirkung naturgemäß nicht so weitreichend wie mögliche Ausschlusskriterien. Gleichwohl sind auch diese vor Beginn des Standortauswahlprozesses sorgfältig zu definieren, um eine solide Entscheidungsgrundlage und ein möglichst transparentes Vorgehen zu gewährleisten.

10.4. Prozedurale Aspekte der Anwendung planungswissenschaftlicher Kriterien

10.4.1. Übergeordnete Aspekte

Das Auswahlverfahren gemäß StandAG beruht auf dem Prinzip, dass eine größere Zahl potenziell geeigneter Gebiete schrittweise auf eine kleine Anzahl kleinerer Standortregionen und Standorte sowie letztendlich auf einen Standort eingegrenzt wird. Gemäß StandAG erfolgt diese Eingrenzung in folgenden Phasen:

Phase 1: Ermittlung in Betracht kommender Standortregionen und Auswahl für übertägige Erkundung (Ergebnis: eine größere Anzahl von Standortregionen) (§§ 13 und 14 StandAG)

Phase 2: Auswahl für untertägige Erkundung (Ergebnis: eine kleine Zahl von Standorten) (§§ 16 und 17 StandAG)

Phase 3: Abschließender Standortvergleich und Standortvorschlag (Ergebnis: ein Standort) (§ 19 StandAG)

Ein Überblick über den aktuellen Diskussionsstand der AG 3 zu den in den Phasen 1 – 3 durchzuführenden Schritten und ihren jeweiligen Zielen findet sich in der Kommissionsdrucksache AG 3-40A⁹¹. Bei den folgenden phasenbezogenen Betrachtungen in den Kapiteln 10.4.2 bis 10.4.4 werden zur Kennzeichnung des Einengungsprozesses die Begrifflichkeiten entsprechend der K-Drs. /AG3-40A verwendet.

⁹¹ Kleemann, U.(2015). Ablauf des Standortauswahlverfahrens. Synopse des Diskussionsstandes in der AG3, 17.12.2015. K-Drs. /AG3-40A.

Bezüglich der Einbindung planungswissenschaftlicher Kriterien in diesen Prozess ist zu klären,

- in welchen Phasen des Auswahlverfahrens diese anzuwenden sind,
- wie sie in der jeweiligen Phase im Verhältnis zu den geologischen Kriterien stehen,
- welche Schnittstellen zu anderen Untersuchungen, insbesondere zur Umweltverträglichkeit sich ergeben (ggf. auch zu sozio-ökonomischen Betrachtungen, die hier aber nicht näher thematisiert werden) und
- ob den einzelnen Phasen jeweils spezifische Kriterien oder Kriteriengruppen sowie Gewichtungen der Kriterien zuzuordnen sind oder ob einheitliche Kriterien und Gewichtungen für alle Phasen anzuwenden sind. (Dieser Aspekt kann sinnvollerweise erst behandelt werden, wenn ein erster Entwurf planungswissenschaftlicher Kriterien vorliegt und wird daher hier nicht näher thematisiert).

Mit der Einrichtung des Bundesamtes für Entsorgung, das die Zuständigkeiten als Genehmigungsbehörde für ein Endlager nach StandAG einschließlich der berg- und wasserrechtlichen Zulassungen, Erlaubnisse etc. auf Bundesebene bündelt, wurde den Randbedingungen eines Bundesland übergreifenden Auswahlverfahrens Rechnung getragen. Aufbauend auf diesem Ansatz liegt es nahe, auch die Zuständigkeit für die planungswissenschaftlichen Belange auf der Bundesebene anzusiedeln, weil auch in diesem Kontext Bundesland übergreifende Vergleiche, Abwägungen und Bewertungen erforderlich sein werden.

Ein in diesem Zusammenhang diskutierter Ansatz ist die Etablierung einer „Bundesfachplanung Endlager“, die eine bundeseinheitliche Abwägung der planungswissenschaftlichen Belange z.B. unter Nutzung des Instrumentariums der Raumordnung vornimmt (nähere Ausführungen hierzu siehe in K-Drs./ AG3-82)⁹². Der Ansatz der Bundesfachplanung wird in der Bundesnetzplanung verwendet und ist im „Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG)“ definiert.

10.4.2. Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 1

In der Phase 1 des Auswahlprozesses (vgl. Kapitel 6.3.1 des Kommissionsberichts) findet folgende Einengung statt

Schritt 1: von der *weißen Deutschlandkarte* zu *geologischen Suchräumen* durch Anwendung geowissenschaftlicher Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

Schritt 2: von *geologischen Suchräumen* zu *Teilgebieten* unter Anwendung geowissenschaftlicher Abwägungskriterien

Schritt 3: von *Teilgebieten* zu *Standortregionen* für übertägige Erkundung durch Anwendung planungswissenschaftlicher Abwägungskriterien, vertiefender geowissenschaftlicher Abwägung und Sicherheitsbetrachtungen.

Die Einengung in Schritt 3 kann – zumindest bei geologischen Formationen, bei denen potenziell günstige geologische Voraussetzungen relativ großflächig vorliegen – nicht allein aufgrund geologischer Kriterien getroffen werden. Planungswissenschaftliche Kriterien kommen daher sinnvollerweise bereits in dieser Phase zur Anwendung, um aus Gebieten voraussichtlich gleicher geologischer Eignung kleinere Regionen unter Berücksichtigung raumordnerischer und wasserwirtschaftlicher Belange als Standortregionen für eine übertägige Erkundung auszuwählen.

⁹² von Nicolai, H.: Vorschlag für eine Bundesfachplanung Endlager, 07. Januar 2016. K-Drs / AG3-82, 4. ff.

Gemäß § 11 Abs. 3 StandAG ist vor der Entscheidung über die übertägig zu erkundenden Standorte auch eine Strategische Umweltprüfung (SUP) durchzuführen. Auch dieses Instrument dient der frühzeitigen Abwägung verschiedener Alternativen auf der Basis der mit verschiedenen Vorhabensvarianten verbundenen Umweltauswirkungen. Eine sorgfältige Schnittstellendefinition zwischen der SUP und planungswissenschaftlichen Untersuchungen und Bewertungen erscheint sinnvoll.

10.4.3. Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 2

Die Phase 2 (vgl. Kapitel 6.3.2 des Kommissionsberichts) dient der Durchführung der übertägigen Erkundung von *Standortregionen* und endet mit der Auswahl der *Standorte für die untertägige Erkundung*. Aufgrund vorliegender und durch die übertägige Erkundung gewonnener Informationen erfolgen vertiefte Sicherheitsbewertungen der ausgewählten Standortregionen anhand von vorläufigen Sicherheitsanalysen.

Planungswissenschaftliche Betrachtungen können in dieser Phase grundsätzlich folgende Ziele verfolgen:

- a) Sie können, im Rahmen der flächenmäßigen Erstreckung einer potenziell geeigneten geologischen Formation, zur Eingrenzung von Standortregionen auf kleinräumigere Standorte beitragen,
- b) sie können, unter Berücksichtigung potenziell möglicher Abstände der obertägigen Anlagen zu einem möglichen untertägigen Einlagerungsbereich (Zugang zum Endlager über Rampe), erste Hinweise zu möglichen Positionen der obertägigen Anlagen im Fall der Standortauswahl geben und
- c) sie können, bei voraussichtlich gleicher Eignung verschiedener Standorte (aus unterschiedlichen Standortregionen), einen Beitrag zur Abwägung bei der Auswahl der untertägig zu erkundenden Standort leisten.

Entsprechend der Ziele und des zu erwartenden Kenntnisstandes über planungswissenschaftliche Faktoren in den betroffenen Regionen wäre zu entscheiden, ob für die Phase 1 und Phase 2 ein jeweils angepasster Kriteriensatz für die planungswissenschaftlichen Bewertungen anzuwenden ist. In jedem Fall sind die gültigen Kriteriensätze vor Beginn des Auswahlverfahrens (oder vor Beginn der jeweiligen Phase) verbindlich festzulegen.

Auch in der Phase 2 ist gemäß § 11 Abs. 3 StandAG eine Strategische Umweltprüfung (SUP) durchzuführen. Die sorgfältige Definition der Schnittstellen zwischen der SUP und den planungswissenschaftlichen Untersuchungen und Bewertungen erscheint sinnvoll.

10.4.4. Anwendung Planungswissenschaftlicher Kriterien in der Phase 3

Phase 3 (vgl. Kapitel 6.3.3 des Kommissionsberichts) dient der untertägigen Erkundung und der darauf basierenden vergleichenden Sicherheitsanalyse der Endlagerkonzepte für die untersuchten Standorte.

Planungswissenschaftliche Betrachtungen können in dieser Phase grundsätzlich folgende Ziele verfolgen:

- a) Sie liefern, unter Berücksichtigung potenziell möglicher Abstände der obertägigen Anlagen zu untertägigen Einlagerungsbereich (Zugang zum Endlager über Rampe), wesentliche

Hinweise zur Festlegung der Position der obertägigen Anlagen im Fall der Standortauswahl und

- b) sie können, bei voraussichtlich gleicher Eignung verschiedener untertägig erkundeter Standorte und der dort realisierbaren Endlagerkonzepte einen Beitrag zur Auswahl des Endlagerstandorts leisten.

In der Phase 3 müssen für alle Standorte die aus planungswissenschaftlicher Sicht relevanten Daten und Informationen vollständig vorliegen. Es wäre zu entscheiden, ob für die Phase 3 ein gegenüber den Phasen 1 und 2 angepasster Kriteriensatz für die planungswissenschaftlichen Bewertungen und Vergleiche anzuwenden ist.

In der Phase 3 ist gemäß § 19 Abs. 1 StandAG eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen. Diese hat in der Erhebung und Bewertung der umweltbezogenen Belange in der Regel noch einen deutlich größeren Tiefgang als die SUP, legt dafür weniger Gewicht auf den Alternativenvergleich als die SUP. Mit ihrem Schutzgut bezogenen Ansatz weist die UVP viele Schnittstellen zu planungswissenschaftlichen Betrachtungen auf, die im Vorfeld sorgfältig zu definieren sind.

10.5. Vorschlag für einen Kriteriensatz

Auf Basis der vorhergehenden Ausführung wird nachfolgend ein Vorschlag für eine Kriteriensatz unterbreitet, der in einem iterativen Prozess weiterentwickelt werden soll. Bei den Kriterien ist gemäß den Ausführungen in Kapitel 10.3.2 zwischen obertägigen und untertägigen Planungsaspekten zu unterscheiden und die mögliche räumliche Entkopplung der obertägigen Anlagen vom untertägigen Einlagerungsbereich durch Zugang über eine Rampe zu berücksichtigen. Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 10.3.3 kommen nur die Kategorien Ausschluss- und Abwägungskriterien zur Anwendung, keine Mindestanforderungen.

10.5.1. Planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien - obertägig

10.5.1.1. Wohngebiete und Mischgebiete

Der Bau obertägiger Anlagen innerhalb der ausgewiesenen Grenzen von bebauten Wohn- und Mischgebieten wird ausgeschlossen. Dagegen ergibt sich aus anders ausgewiesenen Gebieten (z.B. Gewerbegebiete, Industriegebiete) kein Ausschluss.

Für den untertägigen Bereich werden planungswissenschaftliche Ausschlusskriterien nicht für erforderlich gehalten.

10.5.2. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – ober- und untertägig

In Anlehnung an die Systematik der geowissenschaftlichen Kriterien wird innerhalb der Abwägungskriterien zwischen verschiedenen Gewichtungsgruppen differenziert. Ziel der Gewichtungsgruppen ist es, die Abwägungskriterien hierarchisch zu gliedern und damit ihrer unterschiedlichen Bedeutung in der Abwägung gerecht zu werden. Dem Schutz des Menschen soll dabei die höchste Bedeutung zukommen, womit sich folgender Vorschlag für Gewichtungsgruppen ergibt:

Gewichtungsgruppe 1: Schutz des Menschen und der menschlichen Gesundheit

Gewichtungsgruppe 2: Schutz einzigartiger Natur- und Kulturgüter vor irreversiblen Beeinträchtigungen

Gewichtungsgruppe 3: Sonstige konkurrierende Nutzungen und Infrastruktur

Hinsichtlich der Wertungsgruppen „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ sind bisher nur bei einem Teil der Kriterien Vorschläge enthalten, bei anderen Kriterien müssten diese noch festgelegt werden.

10.5.2.1. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 1

Tabelle 10-4: Kriterien für obertägige Planungsaspekte - Gewichtungsgruppe 1

Nr.	Kriterium	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
1.1	Abstand zu bebauter Fläche von Wohngebieten und Mischgebieten	Abstand > 1000 m	Abstand 500 – 999 m	Abstand < 500 m
1.2	Emissionen (Lärm, radiologisch und konventionelle Schadstoffe)	Unterschreitung der Vorsorgewerte		Überschreitung der Vorsorgewerte in bestimmten Phasen bei Einhaltung der Grenzwerte
1.3	oberflächennahe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung	keine	Nutzung potenziell möglich, aber Ausweichpotenzial	Bestehende Nutzung, Ausweichpotenzial nur aufwändig erschließbar

Für den untertägigen Bereich sind keine planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien der Gewichtungsgruppe 1 zuzuordnen.

10.5.2.2. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 2

Tabelle 10-5: Kriterien für obertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 2

Nr.	Kriterium	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
2.1	Naturschutz- und FFH-Gebiete	keine		
2.2	Kulturgüter	keine		

Tabelle 10-6: Kriterien für untertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 2

Nr.	Kriterium	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
2.3	Tiefe Grundwasservorkommen zur Trinkwassergewinnung	keine	Nutzung potenziell möglich, aber Ausweichpotenzial	Bestehende Nutzung, Ausweichpotenzial nur aufwändig erschließbar

10.5.2.3. Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien – Gewichtungsgruppe 3

Tabelle 10-7: Kriterien für obertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 3

Nr.	Kriterium	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
3.1	Land- und forstwirtschaftliche Nutzung			
3.2	Verkehrsinfrastruktur			
3.2. a	Straßenanbindung	gute Straßenanbindung vorhanden	gute Straßenanbindung leicht herstellbar	gute Straßenanbindung nur aufwändig herstellbar
3.2. b	Schiienenanbindung	gute Schiienenanbindung vorhanden	gute Schiienenanbindung leicht herstellbar	gute Schiienenanbindung nur aufwändig herstellbar
3.3	Anlagen nach Störfallverordnung	keine Anlagen mit Störfallrisiko	Vorhandene Anlagen mit Störfallrisiko sind verlegbar	Vorhandene Anlagen mit Störfallrisiko sind nicht verlegbar

Tabelle 10-8: Kriterien für untertägige Planungsaspekte – Gewichtungsgruppe 3

Nr.	Kriterium	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
3.4	Abbau von Bodenschätzen, einschließlich Fracking	keine Vorkommen	keine Nutzung bestehender Vorkommen / ungünstige Abbaubedingungen	bestehende oder geplante Nutzungen / günstige Abbaubedingungen
3.5	Geothermische Nutzung des Untergrundes	kein Potenzial		bestehende oder geplante Nutzung
3.6	Nutzung geologischer als Erdspeicher (Druckluft, CO ₂ -Verpressung, Gas, ...)	kein Potenzial		bestehende oder geplante Nutzung

11. Sozioökonomische Potentialanalyse

Die Kommission macht sich hinsichtlich der erforderlichen Analyse des sozioökonomischen Entwicklungspotenzials und der hierfür zu prüfenden Indikatoren die bereits vom AkEnd⁹³ vorgeschlagene Methodik zu Eigen.

Im Prozessablauf werden sozioökonomische Potenzialanalysen nach der Einengung der Auswahl auf die Ebene der Standortregionen, also mit Beginn der Phase 2, erstmals erforderlich. Sie sind in den Standortregionen durchzuführen, die für die übertägige Erkundung ausgewiesen sind. Bei der Eingrenzung dieser Regionen sind die räumlich-funktionalen Bezüge und Verflechtungen zu berücksichtigen⁹⁴.

In Phase 3 werden die sozioökonomischen Potenzialanalysen in denjenigen Regionen vertieft, in denen Standorte zur untertägigen Erkundung ausgewiesen sind. Auf Basis dieser Analysen können Strategien zur Regionalentwicklung erarbeitet werden.

Träger der sozioökonomischen Potenzialanalyse sind die jeweiligen Regionalkonferenzen (vgl. Kap. 7.3.2 des Kommissionsberichts), die hierzu mit den erforderlichen Mitteln für eine Begutachtung und wissenschaftliche Begleitung auszustatten sind.

Die bei der Analyse zu berücksichtigenden sozioökonomischen Kriterien fußen auf der Überlegung, dass die langfristige Entwicklung einer Standortregion durch die Errichtung eines Endlagers keinen Schaden nehmen soll. Die einzelnen Kriterien beziehen sich auf die potenzielle Entwicklung des Arbeitsmarktes, der regionalen Investitionen, des regionalen Tourismus' und des Wohnungsmarktes unter der Annahme, dass ein Endlager errichtet wird. Die Durchführung einer Potenzialanalyse wird die notwendigen allgemeinen und ortsspezifischen Daten gewinnen, um Abweichungen feststellen zu können.

Grundsätzlich soll das Entwicklungspotenzial einer Standortregion als das Ergebnis mentaler und materieller Bestimmungsfaktoren verstanden werden, d. h. eine sinkende oder steigende regionale Identität wirkt sich als mentaler Faktor, die Entwicklung der natürlichen Umwelt oder der Verkehrsinfrastruktur als materieller Faktor auf die potenzielle Entwicklung aus. Diese zum Teil quantifizierbaren, zum Teil auch qualitativen Faktoren, die das Entwicklungspotenzial bestimmen, sind durch eine Potenzialanalyse für die einzelnen Standortregionen zu spezifizieren.

Grundlage bilden Entwicklungsgutachten, die von einschlägigen Instituten anzufertigen und wissenschaftlich zu begleiten sind. Die Potenzialanalyse soll einen allgemeinen, für alle Standortregionen standardisierten Teil enthalten, um sowohl eine Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten Standortregionen herzustellen als auch die Besonderheiten jeder individuellen Standortregion zu erfassen. Darüber hinaus sollen für die einzelnen Standortregionen spezifische Potenziale erfasst werden. Es könnte sich dabei um prägende historische Entwicklungen und Erfahrungen handeln, die mentale Strukturen formen. Es kann sich aber auch um regional spezifische wirtschaftliche Sektoren handeln, wie etwa das Brauereiwesen, oder um regionale landschaftliche Besonderheiten, die für die weitere Entwicklung von Bedeutung sind. Ein sowohl mentale als auch wirtschaftliche Strukturen betreffendes Potenzial stellt das Image einer Region dar, welches durch ein potenzielles Endlager beeinflusst wird. Bei der Beauftragung der Forschungsinstitute, durch die die Potenzialanalysen durchgeführt werden, ist es geboten,

⁹³ AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. K-MAT 1, Kap. 4.2.3.

⁹⁴ AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. K-MAT 1, Kap. 6, S. 218.

Einvernehmen zwischen Verfahrensbetreiber und der betroffenen Standortregion unter Einbeziehung in der Regionalkonferenz herzustellen.

Tabelle 11-1: Untersuchungsgegenstände für den standardisierten Teil der sozioökonomischen Potenzialanalyse

Entwicklungsbereich	Indikatoren	Methode
Arbeitsmarkt	<ul style="list-style-type: none"> • erwartete Entwicklung der Arbeitslosigkeit • erwarteter Wanderungssaldo • erwartete Kaufkraftentwicklung 	Analyse des regionalen Entwicklungspotenzials
Investitionen	<ul style="list-style-type: none"> • erwartete Entwicklung der Investitionen • erwartete Strukturstärkung oder -schwächung durch die Entwicklung wichtiger Branchen 	Analyse des regionalen Entwicklungspotenzials
Tourismus	<ul style="list-style-type: none"> • erwartete Entwicklung des Tourismussektors • erwartete Auswirkung auf den für Tourismus spezifischen regionalen Charakter 	Analyse des regionalen Entwicklungspotenzials
Wohnungsmarkt	<ul style="list-style-type: none"> • Erwartete Belegung der Wohnungen • Erwartete Entwicklung der Baulandpreise bzw. Pachtpreise 	Analyse des regionalen Entwicklungspotenzials

In den Potenzialanalysen sind, soweit möglich, auch quantitative Schwellenwerte anzusetzen, die auf positive oder negative Abweichungen in Bezug auf eine vorher vereinbarte Vergleichsregion hinweisen. Dieser Vergleich kann beispielsweise auf die durchschnittliche Entwicklung des Regierungsbezirkes, zu dem die Standortregion gehört, oder auch der des Landes oder Bundes abheben. In der Regel sollte zum Vergleich eine geographisch in der Nähe des Standortes liegende Region herangezogen werden, z. B. der Regierungsbezirk. Aus sozialwissenschaftlichen Studien bieten sich für das Maß der Abweichung folgende Schwellenwerte an:

- signifikante Abweichung (+/-10 %)
- relevante Abweichung (+/-15 %)
- gravierende Abweichung (+/-20 %)

Über die standardisierte Potenzialanalyse hinaus müssen auch die Potenziale erfasst werden, die spezifisch für eine Standortregion sind. Die Potenzialanalyse sollte folgende Bereiche behandeln:

- Beschreibung der sozioökonomischen Ausgangslage
- Identifizierung regional- bzw. standortspezifischer Entwicklungspotenziale
- Entwicklungsprognose des Standortes ohne Endlager
- Darstellung der positiven und negativen Faktoren, die mit einer Ausweisung als Endlagerstandort und der Errichtung des Endlagers entstehen können
- Szenario der möglichen Entwicklung in Folge einer Standortentscheidung für die Errichtung eines Endlagers
- Repräsentative Befragung der Bürgerinnen und Bürger zu ihren Vorstellungen über eine wünschenswerte Regionalentwicklung
- Ergebnisse eines mit Bürgerinnen und Bürgern durchgeführten Workshops zu zukünftigen Entwicklungen
- Ergebnisse einer öffentlichen Diskussionsveranstaltung zu den Aussagen der Potenzialanalyse

Die Potenzialanalyse soll zu einer qualitativ gewichteten und, wo immer möglich, quantitativ gestützten Aussage darüber kommen, ob die Realisierung eines Endlagers in der Standortregion positive, negative oder neutrale Entwicklungschancen erwarten lässt.

Die Ergebnisse der Potenzialanalyse werden von den Bürgerinnen und Bürgern und dem Verfahrensbetreiber bewertet. Sollten diese Bewertungen stark voneinander abweichen, so schlägt die Kommission vor, dass unter der Verantwortung des Rates der Regionen oder des nationalen gesellschaftlichen Begleitgremiums ein weiteres Gutachten die strittigen Fragen klärt.

Damit dies nicht zu einer endlosen Reihe von weiteren Gutachten führt, sollten sowohl der Verfahrensbetreiber als auch das Bürgerforum und die Gemeinde bei der Definition der strittigen Fragen und der Auswahl der Gutachter beteiligt werden. Kommt es dennoch zu keiner Einigung, so entscheidet das Kontrollgremium.

12. Anforderungen an eine Einlagerung weiterer radioaktiver Abfälle

12.1. Priorität: Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle

Gesetzesziel⁹⁵ des Standortauswahlverfahrens ist die Auswahl eines Standortes für ein Endlager insbesondere für hoch radioaktiver Abfälle, aber nicht ausschließlich für hoch radioaktive Abfälle. Die Kommission kam daher, auch mit Blick auf das von der Bundesregierung am 12. August 2015 beschlossene Nationale Entsorgungsprogramm⁹⁶ und den dort beschriebenen Bedarf, neben den hoch radioaktiven Abfällen auch bestimmte schwach- und mittelradioaktive Abfälle an dem auszuwählenden Standort endzulagern, darin überein, auch notwendige Randbedingungen für eine Endlagerung von schwach-, mittel- und hoch radioaktiven Abfällen an einem Endlagerstandort zu formulieren (s. a. Kapitel 1.3 des Kommissionsberichts). Die Kommission hat diesbezüglich in ihrer 17. Sitzung am 19.11.2015 folgenden Beschluss gefasst:

"Im Bericht werden insbesondere die Auswahlkriterien für einen Standort für HAW-Abfälle dargestellt. Er wird sich auch mit Empfehlungen für die Lagerung der Asse-Abfälle, von Abfällen aus der Urananreicherung sowie der sonstigen „nicht Konrad-gängigen“ schwach- und mittelradioaktiven Abfälle beschäftigen. Dazu gehören auch Aussagen, welche Randbedingungen erfüllt sein müssen, damit sie mit den HAW-Abfällen endgelagert werden können."⁹⁷

Mithin genießt nach Auffassung der Kommission die Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle Priorität: Der Lösung dieses Problems gegenüber betrachtet die Kommission die zusätzliche Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am gleichen Standort als nachrangig. Sie darf insbesondere nicht zu einer Verringerung des Sicherheitsniveaus für die hoch radioaktiven Abfälle führen.

Hieraus folgt, dass im Standortauswahlverfahren primär die Eignung von Standorten für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle geprüft und die Standortoptionen schrittweise auf die Standortentscheidung hin eingeengt werden. Das in den Kapiteln 6.3 bis 6.5 des Kommissionsberichts beschriebene Verfahren und die hierfür anzuwendenden Kriterien dienen primär diesem Zweck. Im Rahmen der Abwägung von Standorten, die sich für eine Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle eignen, ist dann zusätzlich zu prüfen, ob ein Standort auch die Randbedingungen für ein zusätzliches Endlager oder einen Endlagerbereich für schwach und mittelradioaktive Abfälle erfüllt.

Die Entsorgungskommission (ESK) hat im Ergebnis ihrer Beratungen im Mai 2016 ein Diskussionspapier⁹⁸ zum gleichen Thema veröffentlicht, das sich mit den technisch-wissenschaftlichen Ansprüchen an die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle am Standort des Endlagers für hoch radioaktive Abfälle auseinandersetzt. Die Kommission hat dieses Diskussionspapier zur Grundlage ihrer diesbezüglichen Beratungen gemacht und schließt sich den hierin getroffenen Bewertungen und Schlussfolgerung grundsätzlich an.

⁹⁵ Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013. BGBl. I S. 2553. § 1 Absatz 1.

⁹⁶ BMUB (2015). Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), Stand August 2015.

⁹⁷ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Beschluss der Kommission vom 19. November 2015. Weiteres Vorgehen im Hinblick auf das Nationale Entsorgungsprogramm. K.-Drs. 145.

⁹⁸ Entsorgungskommission (2016). Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuholenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort. K-MAT 60.

12.2. Schwach- und mittelradioaktive Abfälle zur potenziellen Endlagerung am gleichen Standort

Im Nationalen Entsorgungsprogramm und im Diskussionspapier der ESK sind folgende Abfallarten und grob abgeschätzte Mengen an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen angegeben, für die das Endlager Konrad nicht zur Verfügung steht und für die daher eine Endlagerung am Standort des Endlagers für hoch radioaktive Abfälle geprüft werden soll⁹⁹:

- Abfälle aus der Urananreicherung (> 100.000 m³)
- rückzuziehende Abfälle aus der Schachanlage Asse II (bis zu 220.000 m³)
- sonstige Abfälle, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können (> 6.000 m³)

Die oben angegebene Schätzwerte geben die Größenordnung der zu erwartenden Abfallmengen wieder. Im Detail sind sie aus heutiger Sicht unbestimmt: Die Abfallmenge aus der Urananreicherung ist abhängig davon, wie lange die Urananlage in Gronau noch betrieben wird, und außerdem davon, welcher Anteil des dort anfallenden abgereicherten Urans vom Anlagenbetreiber einer Verwertung zugeführt wird. Erst mit dem Ende des Anlagenbetriebs wird hier die Abfallmenge feststehen. Der tatsächliche Anfall der Abfälle aus der Schachanlage Asse, sowohl hinsichtlich ihrer Menge als auch ihrer Charakteristika, ist ebenfalls nur mit sehr großer Unsicherheit zu prognostizieren und wird erst nach der Bergung und Konditionierung feststehen. Letztlich wird sich auch die Menge der sonstigen nicht für das Endlager Konrad geeigneten Abfälle erst im Zuge der Produktkontrolle ergeben.

Es handelt sich also um eine volumenmäßig noch unbestimmte, aber sicher große Menge, ein Vielfaches des für die hochradioaktiven Abfälle anzusetzenden Volumens. Sie wird sich auf den Platzbedarf des Endlagers maßgeblich auswirken, sowohl was die Einlagerungsbereiche unter Tage als auch die Betriebseinrichtungen über Tage betrifft.

Zudem ist sie stofflich sehr komplex zusammengesetzt. Von den Abfällen können durch Reaktion untereinander und mit ihrer Umgebung Auswirkungen ausgehen, die vom Eintrag von CO₂ aus der Zersetzung organischer Bestandteile, dem Eintrag von Wasserstoff aus der Metallkorrosion, Veränderungen des pH-Wertes bis hin zum Eintrag löslicher Salze, Komplexbildner und ggf. weiterer, bis dato noch nicht näher bestimmter Stoffe reichen können¹⁰⁰. Umgekehrt können die eingelagerten Abfälle unter den Einfluss des von den hoch radioaktiven Abfällen ausgehenden Wärmeeintrags geraten und hierauf mit sich ändernden chemischen Reaktionen und/oder Reaktionsgeschwindigkeiten reagieren. Von diesen Auswirkungen gehen Risiken für das Endlager aus, die so zu minimieren sind, dass sie die Betriebs- und Langzeitsicherheit in keiner Weise beeinträchtigen.

⁹⁹ weiter aufgeschlüsselt in: Entsorgungskommission (2016). Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuziehenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort. Tabelle 1. K-MAT 60.

¹⁰⁰ a.a.O. K-MAT 60, Tabelle 1.

12.3. Ausschluss von Quereinflüssen der sicheren Endlagerung: Anforderungen an den Standort und an die Konditionierung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle

Die Entsorgungskommission nennt in ihrem Diskussionspapier zwei zentrale Maßnahmenkategorien¹⁰¹ die dazu dienen, negative Wechselwirkungen zu minimieren oder zu vermeiden: Konditionierung der schwach- und mittelradioaktive Abfälle und räumliche Trennung der Einlagerungsbereiche. Beide Maßnahmenkategorien sind auch aus Sicht der Kommission unverzichtbar, wenn eine Endlagerung von hochradioaktiven sowie schwach- und mittelradioaktiven Abfällen am gleichen Standort realisiert werden soll.

Insbesondere an die erforderliche Konditionierung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle sind hierbei sehr hohe Anforderungen zu stellen, die zudem für das den Standort jeweils prägende Wirtsgestein und das zugehörige Endlagerkonzept spezifisch sein werden. Grundsätzlich muss dabei eine weitgehende Inertisierung erreicht werden, mit der insbesondere eine die Einschlussqualität in Frage stellende Gasbildung weitgehend vermieden wird. Das Diskussionspapier der ESK¹⁰² nennt hier als relevante Parameter die Beständigkeit und Korrosionsresistenz der Abfallbehälter, die Fixierung der Radionuklide in der Abfallmatrix sowie den Wassergehalt und den Gehalt an organischen Verbindungen in den Abfällen. Entsprechende Konditionierungsmaßnahmen wären Trocknung, Pyrolyse o.ä. für organische Substanzen, Einschmelzen metallischer Bestandteile bis hin zur Verglasung mineralischer Substanzen oder Einbindung in keramische Werkstoffe. Hinzu käme ggf. eine vorherige Abtrennung von Salzen (insbesondere für die Abfälle aus der Schachtanlage Asse II) unter Rückgewinnung und separater Konditionierung leicht löslicher Radionuklide.

Der Preis für eine gemeinsame Endlagerung wäre also eine sehr umfangreiche Konditionierung. Die Kommission ist wie die ESK¹⁰³ der Auffassung, dass die hierfür erforderlichen Anlagen die Kapazitäten heute üblicher Konditionierungseinrichtungen bei weitem übertreffen würden. Damit ist nicht ausgesagt, dass diese Konditionierungseinrichtungen am gleichen Standort wie das Endlager entstehen müssten, dennoch ergäbe sich selbstverständlich auch für die übertägigen Anlagen des Endlagerstandorts mindestens ein zusätzlicher Bedarf an Lager- und Handhabungs-Kapazitäten.

In Abhängigkeit von der Konditionierung ergäbe sich am Ende des Prozesses das erforderliche Volumen der endzulagernden Abfallgebände, für das am gemeinsamen Standort ein oder mehrere geeignete Endlagerbereiche auszuweisen wären. Zwar ist bei der Endlagerung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle kein thermisch bedingter Mindestabstand der Gebände wie bei den hoch radioaktiven Abfällen zu berücksichtigen. Dennoch wird der Raumbedarf dieser Abfälle das erforderliche Volumen des Endlagerbergwerks deutlich vergrößern, wahrscheinlich vervielfachen.

Die außerdem erforderliche räumliche Trennung der hoch radioaktiven Abfälle von den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen wird zum einen durch die Minimierung des Wärmeeinflusses der hochradioaktiven Abfälle bestimmt. Zum anderen betrachtet die Kommission hinsichtlich der hoch radioaktiven Abfälle das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) als das zu bevorzugende Konzept (siehe Kapitel 5.5.4 des Kommissionsberichts). Der Nachweis der Integrität des ewG wird dabei eine gemeinsame Endlagerung aller Abfälle in einem einzigen ewG kaum

¹⁰¹ Entsorgungskommission (2016). Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachtanlage Asse II rückzuholenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort. Tabelle 1. K-MAT 60, Kap. 7

¹⁰² a.a.O. K-MAT 60, S. 12.

¹⁰³ a.a.O. K-MAT 60, S. 13.

ermöglichen, jedenfalls würde ein solches Ziel die Standortauswahl maßgeblich einschränken. Realistischer wäre die Einlagerung in, bezogen auf die Einschlussqualität, voneinander unabhängigen Endlagerbereichen am gleichen Standort. Dies böte auch die Möglichkeit, für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle Einlagerungsbereiche auszuweisen, die besser auf die spezifischen Eigenschaften dieser Abfälle (z.B. Korrosion und Gasbildungspotenzial) ausgerichtet sind als der für die hochradioaktiven Abfälle ausgewiesene ewG. Dabei wäre im konkreten Fall auch zu prüfen, ob die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle in gleicher Tiefenlage oder auch in geringere Tiefe, mithin auch in einem gänzlich anderen Wirtsgestein, eingelagert werden können. Unabhängig davon hat diese Form der konsequenten Trennung der Einschlussbereiche in jedem Fall Einfluss auf den Platzbedarf des Endlagers.

Letztlich berührt eine Endlagerung aller Abfallarten an einem Standort die Frage nach der Bergbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle nach Verschluss des Endlagers¹⁰⁴. Lässt sich die Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle während des Betriebs durch entsprechende betriebliche Maßnahmen, insbesondere die Trennung der Materialströme bei der übertägigen und untertägigen Handhabung, wahrscheinlich darstellen, so schränkt der Bergbarkeitsanspruch über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers die Ausweisung von Einlagerungsbereichen für schwach und mittelradioaktive Abfälle deutlich ein: am Standort muss das Auffahren eines Bergungsbergwerks möglich sein, ohne dass die benachbart oder auch in geringerer Tiefe darüber lagernden schwach- und mittelradioaktiven Abfälle dies behindern.

12.4. Transparentes Verfahren: Berücksichtigung und Kommunikation der möglichen Einlagerung weiterer radioaktiver Abfälle von Beginn an

Obwohl das Standortauswahlverfahren prioritär auf einen für hoch radioaktive Abfälle geeigneten Standort ausgerichtet ist, ist die Möglichkeit, dass an dem letztendlich bestimmten Standort zusätzlich auch eine große Menge an schwach- und mittelradioaktiven Abfällen endgelagert werden soll, im Sinne der Transparenz des Verfahrens von vorneherein auch bei der Kommunikation über den Standortauswahlprozess und bei der Öffentlichkeitsbeteiligung zu berücksichtigen. Es wäre dem Verfahren nicht angemessen, einen Endlagerstandort für hoch radioaktive Abfälle auszuwählen und erst dann über die Möglichkeiten zur Einlagerung weiterer Abfälle zu diskutieren. Schließlich entstehen in der Konsequenz für die betroffene Region zusätzliche Belastungen, die sich aus der Errichtung des Endlagers inklusive Übertageeinrichtungen sowie aus Transport, Lagerung und Handhabung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle ergeben.

Im Standortauswahlverfahren ist daher von Beginn an eine klare Aufgabenstellung zu formulieren, die die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle einschließt, und die über die im Standortauswahlgesetz enthaltene Öffnungsklausel "insbesondere"¹⁰⁵ hinausgeht: Auszuwählen ist ein Standort, der sich vorrangig für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle eignet, und an dem optional zusätzlich schwach- und mittelradioaktive Abfälle endgelagert werden können ohne die Langzeitsicherheit des Endlagers für hoch radioaktive Abfälle zu beeinträchtigen.

Mit der Betonung der Priorität der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle kann dabei das Standortauswahlverfahren im Hinblick auf die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle durchaus zu folgenden unterschiedlichen Ergebnissen und daraus folgenden Konsequenzen führen:

¹⁰⁴ Die Sicherheitsanforderungen des BMU aus dem Jahr 2010 für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle verzichten darauf, im Falle einer Mitendlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle auch für diese Abfallfraktionen Anforderungen an Rückholbarkeit oder Bergbarkeit zu formulieren. (siehe BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. K-MAT 10.)

¹⁰⁵ Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013. BGBl. I S. 2553. § 1 Absatz 1, Satz 1.

- Es wird ein Standort ausgewählt, an dem neben den hoch radioaktiven Abfällen auch die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle, wie im nationalen Entsorgungsprogramm vorgesehen, endgelagert werden sollen. Hiermit wäre das Ziel des Standortauswahlgesetzes und des Nationalen Entsorgungsprogramms vollständig erreicht.
- Es wird ein Standort ausgewählt, an dem neben den hoch radioaktiven Abfällen nur ein Teil der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle ebenfalls endgelagert werden kann, sei es aufgrund räumlicher Beschränkungen oder aufgrund der Beschränkung auf bestimmte Abfallarten. Für die verbleibenden Abfälle oder Abfallarten ist dann ein anderer Standort auszuwählen.
- Es wird kein Standort für die Endlagerung aller Abfallarten gefunden, statt dessen wird ein Standort ausschließlich für hoch radioaktive Abfälle ausgewählt. In der Konsequenz ist dann für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle ein anderer Standort auszuwählen.

Mit diesen möglichen Ergebnissen des Standortauswahlverfahrens hat die Berücksichtigung der im Nationalen Entsorgungsprogramm genannten schwach- und mittelradioaktiven Abfälle nicht zuletzt auch Auswirkungen auf den Status von Standortregionen, die im Verlauf des Verfahrens als Rücksprungoption zurückgestellt werden: Je nach Ergebnis kann es notwendig werden, die zurück gestellten Standorte daraufhin zu überprüfen, ob sie sich als Endlager für schwach- und mittelradioaktive Abfälle eignen, jedenfalls wäre der Kenntnisstand über diese Standorte hierbei heranzuziehen.

12.5. Empfehlung

Die Auswahl eines Standorts für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle sollte im Standortauswahlverfahren Priorität vor einer zusätzlichen Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle haben. Grundsätzlich ist denkbar, an einem Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle auch Bereiche zur Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle auszuweisen. Hierfür ist eine gegenseitige negative Beeinflussung der Sicherheit, einerseits durch die Wärmeleistung der hoch radioaktiven Abfälle, andererseits durch die chemische Zusammensetzung und die Gasbildung aus den schwach- und mittelradioaktiven Abfällen, auszuschließen. Zentrale Maßnahmen hierfür sind die langfristig wirksame räumliche Trennung der Lagerbereiche und eine Konditionierung der Abfälle, mit der diese im Hinblick auf Gasbildungspotenzial, chemische Gradienten und Temperaturstabilität weitgehend inertisiert werden. Gleichzeitig darf die Bergbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle nicht beeinträchtigt werden. Die Einhaltung dieser Randbedingung hat erhebliche Auswirkungen auf die Größe des Endlagers unter Tage, die Geometrie und Lage der Einlagerungsbereiche, die Konditionierung der schwach- und mittelradioaktiven Abfälle und die am Standort über Tage erforderlichen Anlagen.

Es ist auch nicht auszuschließen, dass im Zuge des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für insbesondere hoch radioaktive Abfälle ein für alle Abfälle geeigneter Standort nicht gefunden wird. Stellt sich im Laufe des Standortauswahlverfahrens heraus, dass voraussichtlich keine Standorte in die engere Wahl genommen werden, an denen auch Endlagerkapazitäten für schwach- und mittelradioaktive Abfälle realisiert werden können, so muss der Vorhabenträger das Vorhaben einer Endlagerung an einem gemeinsamen Standort aufgeben. Die Realisierung eines Endlagers für die hoch radioaktiven Abfälle hat in jedem Fall Priorität. Für die schwach- und mittelradioaktiven Abfälle muss dann eine hiervon unabhängige Endlagerung herbeigeführt werden, ggf. unter Rückgriff auf bereits untersuchte Standorte.

Die Entscheidung, ob oder inwieweit an einer Endlagerung am gleichen Standort festgehalten werden kann, kann in jeder Phase des Standortauswahlverfahrens fallen, daher muss diese

Fragestellung auch regelmäßig Gegenstand der Berichterstattung des Vorhabenträgers und von Beginn an Gegenstand der Öffentlichkeitsbeteiligung sein.

13. Anforderungen an Behälter zur Endlagerung

Der Behälter stellt eine wesentliche technologische Barriere dar, die in den verschiedenen Stadien der Endlagerung unterschiedliche Bedeutung hat. Die Kommission hat sich daher mit den Anforderungen an die Behälter zur Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle intensiv befasst und sich in diesem Zusammenhang u.a. durch Vorträge von zwei Experten^{106,107,108,109} über den aktuellen Sachstand informiert.

Während der Einlagerung in das zu diesem Zeitpunkt offene Endlager kommt dem Behälter die maßgebliche Schutzfunktion zu. Im verschlossenen Einlagerungsbereich muss die Schutzfunktion des Behälters erhalten bleiben, um über einige Dekaden die Rückholbarkeit zu ermöglichen. In der Nachbetriebsphase muss die Behälterintegrität mindestens über einige hundert Jahre bestehen bleiben, um für den Fall einer notwendigen Fehlerkorrekturmaßnahme eine Bergung durchführen zu können.

13.1. Schutzziele

Regulatorische Anforderungen an Abfallbehälter für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle finden sich in Deutschland in generischer Form in den Sicherheitsanforderungen des BMU von 2010¹¹⁰. Die Sicherheitsanforderungen enthalten bislang aber keine detaillierte Definition der Anforderungen. Diese Aufgabe kann erst mit der Entwicklung und Definition eines Endlagerkonzeptes und der Erstellung einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung für den jeweiligen Standort abgeschlossen werden, da Teile der Behälteranforderungen abhängig vom Konzept zu spezifizieren sind.

Unabhängig vom Standort lassen sich aber die grundsätzlichen Anforderungen an die Schutzfunktionen eines Abfallbehälters herleiten, mit denen während der verschiedenen Stadien der Endlagerung die Einhaltung der Schutzziele "Einschluss der radioaktiven Stoffe", "Vermeidung unnötiger Strahlenexpositionen", "Begrenzung und Kontrolle der Strahlenexposition des Betriebspersonals und der Bevölkerung", "Abfuhr der Zerfallswärme" und "Einhaltung der Unterkritikalität" sichergestellt werden kann:

Die Anforderung „Einschluss der radioaktiven Stoffe“ muss die langfristige Dichtheit des Behälters gewährleisten und insbesondere den Austritt radioaktiver Gase sowie einen direkten Kontakt der Abfälle mit ihrer Umgebung sicher verhindern. Durch die Abschirmungsfunktion des Behälters wird die von den radioaktiven Abfällen ausgehende Strahlung zu einem großen Teil in der Behälterwand absorbiert und damit auf das erforderliche Maß reduziert.

¹⁰⁶ Völzke, Holger (2015). Stellungnahme zur Rückholung und Bergung von Behältern im Rahmen der 14. Arbeitsgruppensitzung der AG3 am 24.11.2015; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-47.

¹⁰⁷ Völzke, Holger (2015). Technische Anforderungen an Endlagerbehälter hinsichtlich ihrer Rückholbarkeit und Bergbarkeit; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-49.

¹⁰⁸ Schneider-Eickhoff, Ralf. Rückholbarkeit / Bergbarkeit von Endlagerbehältern - Anforderungen an das Behälterdesign; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-51.

¹⁰⁹ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Wortprotokoll der 14. Sitzung der Arbeitsgruppe 3

¹¹⁰ BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010

Das Wärmeabfuhrvermögen des Behälters sorgt dafür, dass die Zerfallswärme in ausreichendem Maß und möglichst gleichmäßig verteilt an die Umgebung abgeführt wird. Die Einhaltung der Unterkritikalität steht dafür, dass durch Konstruktion und Beladung des Behälters der die enthaltenen Kernbrennstoffe sicher im unterkritischen Zustand gehalten werden.

13.2. Anforderungen in der Betriebsphase des Endlagers

Bei der Einlagerung wird der Endlagerbehälter, ggf. in zusätzlichen Transportbehältern, durch das Betriebspersonal in das Endlagerbergwerk und untertage bis zum Einlagerungsort transportiert. Die Behälterhandhabung untertage umfasst das Be- und Entladen auf/von Transportfahrzeugen sowie das Platzieren am endgültigen Einlagerungsstandort, was beispielsweise Kipp-, Dreh- und Aufrichtvorgänge beinhaltet. Nach der Einlagerung eines oder mehrerer Behälter wird der jeweilige Einlagerungsort verfüllt.

Aus diesen betrieblichen Vorgängen folgen Anforderungen an die Handhabbarkeit und Transportierbarkeit unter den Randbedingungen des Endlagers, die auch die ggf. erforderliche Rückholung und Reparatur umfassen. Eine grundsätzlich wichtige Anforderung ist die Minimierung der Strahlenexposition des Betriebspersonals. Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem Wirtsgestein. So beeinflusst die Hohlraumstabilität eines Wirtsgesteins die spätere Ausgestaltung des Einlagerungsbergwerks und der möglichen Handhabungstechniken untertage. Diese beschränken ggf. Behälterabmessungen und Masse des Behälters und sind bei der Auslegung zu berücksichtigen.

Bezogen auf die Bauteile eines Endlagerbehälters sind Anforderungen insbesondere an den Behälterkörper ausreichende Stabilität, Korrosionsbeständigkeit, Abschirmwirkung und Wärmeabfuhr. Erfüllt werden diese Anforderungen durch geeignete Materialwahl, an das Wirtsgestein bzw. das Verfüllmaterial angepasste Oberflächenbeschichtung, Wanddicke und Geometrie des Behälterkörpers. Die Anforderungen an das Verschlussystem resultieren vor allen Dingen aus dem sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe in jeder Handhabungsphase sowie im Störfall. Die (Gas-)Dichtheit muss in jedem Fall gewährleistet sein. Behältereinbauten müssen Anforderungen an die Stabilität erfüllen und das Abfallinventar fixieren. Die Anforderungen betreffen aber auch die Wärmeabfuhr und die Unterkritikalität. Geometrischer Aufbau und Materialwahl (z.B. borierter Edelstahl) müssen dies gewährleisten.

Diese grundsätzlichen Anforderungen gelten sowohl im Normalbetrieb als auch unter auslegungsrelevanten Störfällen wie beispielsweise Brand, Behälterabsturz, radiolytische Reaktionen, unerwarteten Druck- oder Temperaturbedingungen oder Kollision.

13.3. Anforderungen an das Langzeitverhalten der Behälter im Endlager

Für jeden Behälter beginnt nach seiner Einlagerung und der Verfüllung des Einlagerungshohlraums das Stadium der eigentlichen Endlagerung. Spezifische Anforderungen an das Langzeitverhalten der Behälter resultieren dabei insbesondere aus dem Wirtsgestein und seinen Eigenschaften sowie dem Endlagerkonzept. Ganz wesentlich ist dabei die Anforderung, wie lange die Barrierefunktion der Behälter im Endlagersystem erhalten bleiben muss.

Je nach Wirtsgesteinstyp und Endlagerkonzept sind unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich des Wärmeabfuhrvermögens zu berücksichtigen. Tonstein weist eine schlechtere Wärmeleitfähigkeit als Salz auf, entsprechend muss bei der Behälterauslegung im Tonstein dem absoluten Wärmeeintrag und dem Wärmeübergang von Behälter zu Verfüllmaterial und Wirtsgestein in größerem Umfang Rechnung getragen werden. Im Salz konvergieren

Einlagerungshohlräume schneller, was zu einem früheren Auflaufen des Gebirgsdrucks auf den Behälter führt und im Zusammenhang mit der Hohlraumverfüllung hinsichtlich des Integritätserhalts zu bewerten ist.

Abhängig von Wirtsgestein und Verfüllmaterial wirken unterschiedliche geochemische Milieus auf die Behälteroberfläche und infolge dessen tritt Korrosion auf. Um Korrosionsvorgänge minimal zu halten, muss ggf. wirtsgesteinsspezifisch auf unterschiedliche Materialien oder Oberflächenbeschichtungen zurückgegriffen werden. Eine Folge von Korrosion ist Gasbildung, die im Hinblick auf die Sicherheit des Endlagers zu bewerten ist.

Die genannten Schutzfunktionen und daraus abgeleiteten Anforderungen sind an jedem Endlagerstandort einzuhalten, wobei jedes Wirtsgestein andere quantitative Anforderungen stellt. In angepasster Form gelten sie bereits für die vorgeschaltete Zwischenlagerphase. Die konkrete Behälterauslegung ist aber standortspezifisch insbesondere in Abhängigkeit vom Wirtsgestein und dem Endlagerkonzept vorzunehmen.

13.4. Anforderungen der Rückholbarkeit und der Bergbarkeit

Rückholbarkeit während des Endlagerbetriebs (bis zu dessen Verschluss) und Bergbarkeit aus dem verschlossenen Endlager erfordern eine deutlich verlängerte Langzeitstabilität und damit Handhabbarkeit und Transportierbarkeit der Behälter gegenüber einer Endlagerung ohne diese Anforderungen. Die Behälterfunktionen müssen über den hierfür geforderten Zeitraum ganz oder teilweise erhalten bleiben.

Die BMU-Sicherheitsanforderungen von 2010 fordern, dass die Behälter in der Betriebsphase des Endlagers bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen rückholbar sind. Hierbei handelt es sich um Zeiträume von voraussichtlich bis zu etwa 100 Jahren¹¹¹.

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein.¹¹² Nähere Ausführungen hierzu machen die Sicherheitsanforderungen des BMU nicht.

Im Falle einer Rückholung kann angenommen werden, dass auf die Technologie der Einlagerung zurückgegriffen werden kann. Diese ist am Einlagerungsstandort verfügbar.

Im Hinblick auf den Erhalt seiner Schutzfunktionen bedeutet dies, dass der Behälter den Belastungen durch radioaktive Strahlung, Gebirgsdruck, Temperaturverhältnisse im und am Behälter, Korrosion und den abgelaufenen Handhabungsvorgängen über 100 Jahre standhalten muss. Die standortspezifischen Beanspruchungen sind vom Wirtsgestein und dem Endlagerkonzept abhängig und müssen möglichst genau prognostiziert werden. Daraus resultieren Randbedingungen, die die mechanische Stabilität des Behälters und seine Korrosionsbeständigkeit betreffen. Abhängig vom Wirtsgestein und den zu erwartenden Endlagerbedingungen sind geeignete Behältermaterial und das Behälterdesign festzulegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Anforderungen einer größeren Stabilität (Wanddicke) der Behälter nachteilig in Bezug auf andere Anforderungen des Lagersystems (Gasbildung durch Stahlkorrosion) sein können.

¹¹¹ Völzke, Holger (2015). Stellungnahme zur Rückholung und Bergung von Behältern im Rahmen der 14. Arbeitsgruppensitzung der AG3 am 24.11.2015; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-47, S. 3.

¹¹² BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010, S. 18.

Die Machbarkeit der Rückholung muss durch ein Rückholkonzept untersetzt und mit einem Sicherheitsnachweis belegt werden. Das Rückholkonzept muss eventuell auch Ertüchtigungsmaßnahmen oder Reparaturkonzepte für die Behälter vorsehen.

Von der Rückholung von Abfallbehältern aus dem noch zugänglichen Endlager ist eine Bergung aus dem verschlossenen Endlager zu unterscheiden. Eine Bergung der Abfallbehälter wird bislang¹¹³ grundsätzlich als Notfalloption betrachtet. Bei einer Bergung ist davon auszugehen, dass die Einlagerungstechnologie nicht mehr vorhanden ist. Daher muss das Know-How, das Konzept der Bergungstechnik und das Wissen über die Abfälle verfügbar gehalten werden.

Ferner ist der Konstruktion des Behälters im Hinblick auf die Bergbarkeit zugrunde zu legen, dass die Behälter zum Zeitpunkt einer Bergung über 500 Jahre radioaktiver Strahlung, der aus der Wärmeleistung des Inventars resultierenden Temperatur und dem Gebirgsdruck ausgesetzt waren.

Chemische Wechselwirkungen mit dem Behältermaterial resultieren aus Mineralien der Versatzstoffe und des Wirtsgesteins, ggf. unter Wasserangebot und in Verbindung mit Mikroorganismen. Hinsichtlich Korrosion ist die im Langzeitsicherheitsnachweis beschriebenen wahrscheinlichen Entwicklungen zu berücksichtigen. Um eine Bergung zu ermöglichen, müssen die wesentlichen Schutzfunktionen des Behälters für den Zeitraum der Bergbarkeit (nachderzeitigem Stand der BMU-Sicherheitsanforderungen 500 Jahre) erhalten bleiben. Das sind der Einschluss des radioaktiven Inventars (Aufrechterhaltung der Behälterintegrität) und die Sicherstellung der Unterkritikalität. Der Behälter muss so ausgelegt sein, dass die Auswirkungen von Korrosionsschäden unter erwartbaren Bedingungen möglichst gering bleiben. Als weitere Anforderung ist Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole in den BMU-Sicherheitsanforderungen genannt¹¹⁴.

Mit der Verlängerung des Betrachtungszeitraums im Hinblick auf die Bergbarkeit geht ein Mehr an erforderlichen Sicherheitsmargen einher. Zu den Anforderungen an die Behälterstabilität kommen insbesondere Anforderungen an das Behälterverschlussystem und seine Dichtwirkung. Es ist zu definieren, welche Dichtheit des Behälters und seiner Komponenten für die Bergbarkeit ausreichend ist. Rückholbarkeit und Bergbarkeit des Abfallbehälters sind jeweils nachzuweisen. Dies stellt aufgrund der Zeiträume, die zu prognostizieren sind, eine Herausforderung dar. Aus den unterschiedlichen Wirtsgesteinen werden zudem unterschiedliche Anforderungen resultieren, so dass ggf. für jedes Wirtsgestein ein eigenes Behälterkonzept erforderlich sein kann.

13.5. Stand der Technik

Erfahrungen mit Behälterentwicklungen für Transport und oberirdische Lagerung sind in Deutschland umfangreich vorhanden.

Für die Zwischenlagerung wärmeentwickelnder Abfälle werden aktuell eine Bandbreite unterschiedlicher Behälter genutzt. Transport- und Lagerbehälter der Typenfamilien Castor® und TN® finden Verwendung für Transport und Zwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle aus deren Wiederaufarbeitung. Außerdem wurden in den 1980er Jahren in Deutschland Behälterkonzepte für die Endlagerung vom Typ Pollux® sowie als Alternative hierzu das Konzept der Brennstabkokille (BSK3) für die Endlagerung entwickelt. Die Behälterkonzepte orientierten sich an den zum Entwicklungszeitpunkt vorgegebenen Referenzkonzepten.

¹¹³ BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010, S. 5.

¹¹⁴ a.a.O., S. 18.

Sowohl das Referenzkonzept Pollux® als auch das Alternativkonzept BSK3 wurden für eine Endlagerung im Steinsalz entwickelt. Für andere Wirtsgesteine wären Anpassungen oder vollkommen neue Bauarten für Behälter zu entwickeln. Die vorhandenen Referenzkonzepte entsprechen nicht mehr dem Stand von Wissenschaft und Technik und müssten überarbeitet werden, insbesondere vor dem Hintergrund aktueller oder zusätzlicher Sicherheitsanforderungen. Eine Anpassung an aktuelle Anforderungen wurde im Rahmen der Anhörung für prinzipiell machbar, aber nicht unbedingt für sinnvoll für alle Konzepte gehalten.

Eine Neuentwicklung von Abfallbehältern böte den Vorteil, das oder die Behälterkonzept(e) den aktuellen Sicherheitsanforderungen exakt anpassen zu können. Insbesondere die Anforderungen zu Rückholbarkeit und Bergbarkeit wären in ein entsprechendes Behälterdesign umzusetzen. Aufgrund der wirtsgesteinsspezifischen Anforderungen wird zudem zunächst die Entwicklung von mindestens drei Abfallbehälterkonzepten, eines für jedes Wirtsgestein, ggf. modifiziert für Strecken- und Bohrlochlagerung, erforderlich sein. Die Verwendung eines neuen Behälters erfordert außerdem eine entsprechende Konditionierungs- bzw. Umladeeinrichtung. Zusätzliche Sekundärabfälle sowie die benutzten Transport- und Lagerbehälter wären zu entsorgen.

Neben den Erfahrungen in Deutschland kann für die Behälterentwicklung in verschiedenen Wirtsgesteinen auf internationale Kenntnisse (z.B. auf skandinavische oder Schweizer Behälterkonzepte) zurückgegriffen werden.

So ist das schwedische Behälterkonzept¹¹⁵ weitgehend entwickelt. Der Endlagerstandort einschließlich Konzept befindet sich in der Genehmigungsphase. Der Endlagerbehälter wurde für die Endlagerung in Kristallingestein entwickelt. Im sog. KBS-3-Konzept wird der abgebrannte Brennstoff in einen inneren Behälter aus sog. Kugelgraphitguss eingebracht, der wiederum in einen dickwandigen Kupferbehälter eingeschweißt wird. Der Kupferbehälter soll den Inhalt vor Korrosion schützen. Am Einlagerungsort wird das Gebinde in Bentonit eingebettet, der den Einlagerungsort gegen zutretendes Wasser abdichtet.

In der Schweiz wird als Anforderung an den Lagerbehälter ein vollständiger Einschluss der Radionuklide während tausend Jahren ab deren Einlagerung¹¹⁶ definiert. Der entsprechende Nachweis ist durch die Entsorgungspflichtigen zu erbringen. Favorisiert wird derzeit, unter den Randbedingungen einer Endlagerung in Tonstein, ein Behälter aus sog. Kohlenstoffstahl. Die Schweizer Regulierungsbehörde hält dieses Material für geeignet¹¹⁷, fordert aber weitere Untersuchungen zur Gasbildung. Als Alternative zum Stahlbehälter wird auch in der Schweiz über eine Adaption des schwedischen Kupferbehälters nachgedacht.¹¹⁸

13.6. Terminierung und Umsetzung der Behälterentwicklung

Die Entwicklung geeigneter Behälterkonzepte erfordert Zeit. In K-Drs. /AG3-51 werden mindestens fünf bis sieben Jahre veranschlagt. Mit einer Erprobungsphase sowie dem erforderlichen

¹¹⁵ SKB (2016). Svensk Kärnbränslehantering AB, The barriers in the KBS-3 repository in Forsmark, Public Report, 18.01.2016.

¹¹⁶ ENSI (2009). Eidgenössisches Nuklearinspektorat ENSI, Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-G03, Ausgabe April 2009.

¹¹⁷ HSK (2005). Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen.; Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), HSK 35/99.

¹¹⁸ <http://www.ensi.ch/de/technisches-forum/behaeltermaterial-fuer-radioaktive-abfaelle/>

Eignungsnachweis wird sich der Zeitraum bis zur Zulassung der Behälter deutlich verlängern. So kann ein Zeitbedarf von einigen Dekaden entstehen.

Die Kommission sieht die Notwendigkeit, im Rahmen des Standortauswahlverfahrens frühzeitig wirtsgesteinsspezifische Endlagerkonzepte verfügbar zu haben. Hierzu gehören auch entsprechende Behälterkonzepte, die im Verlauf des Standortauswahlverfahrens iterativ weiter zu entwickeln sind. Die Kommission empfiehlt daher, diesen Prozess baldmöglichst anzustoßen. Dabei ist klar darzulegen, welcher Akteur welche Rolle übernehmen wird.

Zentraler Akteur ist dabei der Vorhabensträger, der zu Beginn zunächst Annahmen für sein Entsorgungskonzept entwickelt und daraus konkrete Anforderungen an den Behälter ableitet. Die Umsetzung, d.h. die Entwicklung und der Bau der Behälter erfolgt dann durch den Ablieferungspflichtigen. Der Ablieferungspflichtige muss dabei den Nachweis erbringen, dass sein Behälter den Anforderungen genügt, und auch nach 500 Jahren bergbar sein wird.

Voraussetzung für jede Behälterentwicklung oder -anpassung ist das Vorliegen möglichst konkreter Anforderungen auf Basis der aktuellen Sicherheitsanforderungen und der zu ihrer Einhaltung notwendigen Auslegung, die wiederum aus den vorgesehenen Endlagerkonzepten resultieren. Es ist Aufgabe des Vorhabensträgers, wirtsgesteinsspezifische Endlagerkonzepte vorzulegen und mit der Regulierungsbehörde abzustimmen. Die daraus resultierenden Auslegungen der Behälter sind dann so weit zu spezifizieren, dass deren Entwicklung und Konstruktion erfolgen kann. Parallel sollte auch geprüft werden, inwieweit Erfahrungen mit vorhandenen Transport- und Lagerbehältern aus der Zwischenlagerung und Erfahrungen aus internationalen Entwicklungen genutzt werden können.

Da sowohl die zukünftige Standorterkundung als auch die Behälterentwicklung zu weiterführenden Erkenntnissen führen werden, sollte das Verfahren als iterativer Prozess angelegt werden, der eine Weiterentwicklung konkreter Behälterkonzepte entsprechend des sich entwickelnden Kenntnisstandes von Wissenschaft und Technik auch nach einer erfolgten Standortentscheidung ermöglicht.

Es ist nicht auszuschließen, dass die Entscheidung für ein Wirtsgestein erst mit der finalen Standortentscheidung fällt. Erst mit dieser Entscheidung kann die Behälterentwicklung zum Abschluss gebracht werden. Für die Entscheidung muss aber im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung ein bewertbares Behälterkonzept vorhanden sein. Auch deshalb bietet sich ein iterativer Prozess an, in dem zunächst wirtsgesteinsspezifische Anforderungen an Behälter für alle drei Gesteinsarten ggf. in drei Konzepten mitgeführt werden.

14. Anforderungen an Forschung und Technologieentwicklung

Die Kommission hat hinsichtlich der Anforderungen an die zukünftige Forschung und Technologieentwicklung ausschließlich mit Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit dem Neubeginn des Standortauswahlverfahrens und der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle befasst. Kompetenzerhaltende Grundlagenforschung oder angewandte Forschung auf anderen Gebieten der nuklearen Entsorgung, sowie kernphysikalische oder radiochemische Grundlagenforschung waren nicht Gegenstand der Diskussion.

Nach Auffassung der Kommission sind zukünftig Forschungsvorhaben im Themenfeld Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle unter der Ägide unterschiedlicher Verfahrensbeteiligter und vom Verfahren unabhängiger Institutionen notwendig.

Dabei liegt die Verantwortung zur Generierung der unmittelbar für das Standortauswahlverfahren notwendigen wissenschaftlichen Erkenntnisse und technischen Entwicklungen naturgemäß beim Vorhabenträger selbst, der hierfür mit den notwendigen Kompetenzen für eigene Forschung und Entwicklung und mit Mitteln zu Beauftragung spezifischer Fragestellung an Externe ausgestattet werden muss.

Eine weitere wesentliche Säule ist die Förderung einer vom Vorhabenträger unabhängigen Forschung, die für entsprechende vorhabenbezogene Expertise bei der Regulierungsbehörde sorgt und daher hier angesiedelt und budgetiert werden muss.

Vorhabenträger und Regulierungsbehörde sollen also jeweils eigene, voneinander unabhängige Forschungsförderung betreiben, damit der Vorhabenträger den spezifischen Bedürfnissen des Standortauswahlverfahrens Rechnung tragen kann, und gleichzeitig seitens der behördlichen Aufsicht eine eigene Expertise gepflegt wird die dafür steht, dass die Aufsicht in ihrer Tätigkeit nicht unreflektiert von den Informationen des Vorhabenträgers abhängig ist.

Grundlagenforschung im universitären Rahmen und an den Großforschungseinrichtungen (KIT, FZJ, HZDR) wird auch zukünftig erforderlich sein, um über den aktuellen Bedarf des Standortauswahlverfahrens hinaus Grundlagen- und Zukunftsfragen des nuklearen Abfallmanagements zu bearbeiten. Hierzu gehören auch Fragestellungen, die außerhalb des prioritären Prozessweges liegen, wie beispielsweise im Zusammenhang zu der in Kapitel 5.4.1 des Kommissionsberichts beschriebenen Endlagerung in tiefen Bohrlöchern.

Als weitere Initiatoren für Forschung und Entwicklung werden zukünftig auch die im Standortauswahlprozess engagierten gesellschaftlichen Gremien ihren Beitrag zur Forschungsagenda leisten wollen. Auch hier müssen Möglichkeiten geschaffen werden, unabhängige, gegenüber dem Verfahren kritische, aber sachlich objektive Kompetenzen aufzubauen und zu pflegen.

Nicht zuletzt wird es auch Aufgabe aller an der Endlagerforschung beteiligten Institutionen und Fördermittelgeber sein, attraktive Rahmenbedingungen für den Erhalt der erreichten Kompetenzen und die Ausbildung der in den kommenden Jahren dringend erforderlichen Nachwuchskräfte zu schaffen.

Der Neubeginn des Standortauswahlverfahrens stellt also auch die deutsche Endlagerforschung vor neue, die bisherigen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten deutlich erweiternde Herausforderungen. Sie haben ihren Ursprung in den Erfordernissen des Auswahlprozesses selbst:

- In dem Bekenntnis zu einer Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System, das als lernendes Verfahren Erfolge, aber auch vergangene Fehlentwicklungen analysiert und hieraus Schlüsse für die Zukunft zieht, das die Möglichkeit der Hinterfragung in sich trägt, das Rücksprünge zulässt um Fehler zu korrigieren und bei Bedarf neue Wege einzuschlagen, und das sich einer umfassenden Qualitätskontrolle, z.B. durch „peer-reviews“ von nicht in die Projekte eingebundenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unterzieht.
- In der Breite des Ansatzes mit drei Wirtsgesteinstypen mit entsprechenden Endlagerkonzepten, Behälterentwicklungen, Sicherheits- und Nachweiskonzepten und den vergleichsweise jungen Anforderungen zur Schaffung von Vorkehrungen zur Fehlerkorrektur inklusive der Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Endlagerbehältern.
- In der Dauer des Verfahrens, die einerseits zu einer zeitlichen Priorisierung von Forschungs- und Entwicklungsthemen mit heute naturgemäß vordringlichem Bedarf für die erste Phase des

Standortauswahlverfahrens führt, und die andererseits einen strukturierten Kompetenzerhalt und, damit einhergehend, eine adäquate Nachwuchsförderung erforderlich macht.

- In dem hohen Anspruch an eine breite Beteiligungskultur, in der sich Öffentlichkeit und Betroffene individuell oder über die hierfür installierten Gremien einbringen sollen, und in der Raum gegeben und Wertschätzung gezeigt wird für kritische Wissenschaft und für eine Diskussionskultur, in der gegenläufige Meinungen als notwendige fachliche Herausforderung angenommen und nicht als Störfaktoren ausgeblendet werden.

Die Kommission ist der Auffassung, dass der derzeitige Stand der Endlagerforschung in Deutschland eine gute wissenschaftliche Expertise hervorgebracht hat, und dass darauf aufbauend die wissenschaftlichen Fachfragen im Zusammenhang mit der Standortauswahl erfolversprechend angegangen werden können. Allerdings sind die notwendigen Schwerpunkte der Endlagerforschung für die kommenden Jahre neu zu definieren.

In den vergangenen 25 Jahren sind etwa 43 % der im Bereich Endlagerforschung verausgabten Projektfördermittel für Fragestellungen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Wirtsgestein Salz verausgabt worden, 20 % wurden im Themengebiet Tonstein aufgewendet und lediglich 8 % im Zusammenhang mit Kristallingestein¹¹⁹. Dementsprechend wurden die wesentlichen Forschungsfragen in Zusammenhang mit dem Wirtsgestein Steinsalz in den vergangenen Jahrzehnten in Deutschland breit adressiert. Die hierbei erworbenen Kompetenzen sind im Standortauswahlverfahren unverzichtbar. Im Zusammenhang mit Tonstein als Wirtsgestein für entsprechende Endlagersysteme liegen Erfahrungen aus der Zusammenarbeit mit französischen, belgischen und Schweizer Forschern in den dortigen Untertagelaboren Mont Terri, Mol und Bure vor, die im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für deutsche Tonsteinvorkommen genutzt werden können. Hier sieht die Kommission einen Bedarf an einer Ausweitung der Forschungstätigkeiten. Endlagerforschung in Zusammenhang mit Endlagerkonzepten im Wirtsgestein Kristallin wurde in Deutschland bis dato hingegen nicht systematisch, sondern nur ausschnittsweise gefördert. Hier sieht die Kommission Nachholbedarf insbesondere für die im Kristallin in Deutschland denkbaren Endlagersysteme und die für eine entsprechende Bewertung und Abwägung erforderlichen Informationen zu den Kristallinvorkommen.

Die Endlagerforschung in Deutschland muss in der näheren Zukunft darauf ausgerichtet werden, Lösungsbeiträge zu den für das Standortauswahlverfahren noch nicht hinreichend geklärten Sachverhalten zu erarbeiten. Dabei werden die naturwissenschaftlich-technischen Fragestellungen Antworten auf konkrete Forschungsfragen geben müssen

- zur Charakterisierung von Wirtsgesteinsvorkommen,
- zur Entwicklung von minimalinvasiven oder zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden hierfür,
- zur Entwicklung von Endlager-Referenzkonzepten für die Standortauswahl und ihrer Weiterentwicklung im Verlauf des Prozesses,
- zur Entwicklung von Vorkehrungen zur Fehlerkorrektur inklusive der Rückholbarkeit und Bergbarkeit von Endlagerbehältern und entsprechenden Anforderungen an Behälter und deren Inventare,
- zur Entwicklung von wirtsgesteinsspezifischen Sicherheits- und Nachweiskonzepten,

¹¹⁹ Pitterich, Horst (2012). Endlagerforschung in Deutschland. Vortrag anlässlich der Veranstaltung "Bis in alle Ewigkeit ... Neuausrichtung der Endlagerforschung?" des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz am 08.12.2014 in Hannover. <http://www.umwelt.niedersachsen.de/bis-in-alle-ewigkeit/bis-in-alle-ewigkeit4-129345.html>

- zur Entwicklung und Weiterentwicklung von Methoden zur Langzeitprognose von Endlagersystemen
- zur wirtsgesteinsübergreifenden Forschung für die Bereitstellung und Überprüfung geeigneter Instrumente zur Modellierung der langfristig ablaufenden und miteinander gekoppelten thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse,
- zur Entwicklung und Weiterentwicklung von Methoden zum Vergleich von Standorten, insbesondere wenn die Standorte unterschiedliche Wirtsgesteine vorweisen.

Die Dauer des Verfahrens macht es auch erforderlich, die Randbedingungen der notwendigen, aber über die bisher geplante Dauer hinaus gehenden Zwischenlagerung genauer in den Blick zu nehmen. Es ist daher zu empfehlen, den bereits von der Entsorgungskommission¹²⁰ angesprochenen Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu den folgenden Aspekten fortlaufend zu prüfen und entsprechende Arbeiten zu initiieren:

- Sicherheitstechnische Nachweise für Behälter und Inventare für eine verlängerte Zwischenlagerung.
- Untersuchung und Nachweis des Langzeitverhaltens von Behälterkomponenten (z. B. Metalldichtungen) und Inventaren (z. B. Brennstabintegrität) für eine verlängerte Zwischenlagerung.
- Brennelementverhalten in den Transport- und Lagerbehältern über längere Zwischenlagerzeiträume und Konsequenzen für die Lagerung selbst und die endlagergerechte Konditionierung.

Einen weiteren, im Vergleich zur heutigen Forschungsförderung deutlich auszuweitenden Schwerpunkt werden zukünftige sozialwissenschaftliche und sozio-technische Aspekte bilden. Forschungsaufgaben hierbei müssen die besonderen Zusammenhänge zwischen dem Problem der Endlagerung und den verschiedenen gesellschaftlichen Ebenen untersuchen, die lange, generationenübergreifende Dauer des Prozesses berücksichtigen und dabei das in seiner zeitlichen und räumlichen Dimension einzigartige Partizipationsverfahren zum Gegenstand haben. Forschungsaufgaben in diesem Feld sind

- Begleitforschung zur Partizipation und Akzeptanz in einem demokratischen Rechtsstaat, Methoden und Maßnahmen zur Herstellung von Augenhöhe zwischen den einander gegenüberstehenden Interessen,
- Inter- und transdisziplinäre Ansätze in der Zusammenarbeit von technischen und nichttechnischen Disziplinen mit gesellschaftlichen Akteuren,
- Fragen der Fehlerkultur, des gesellschaftlichen Umgangs mit Fehlentwicklungen und der Möglichkeiten der Fehlerkorrektur,
- Fragen des Wissensmanagements,
- kritische historische Analyse und Aufarbeitung der Kernenergienutzung und der Endlagerforschung in Deutschland, ihrer Gegner und Befürworter, sowie der damit verbundenen gesellschaftlichen und politischen Prozesse.

¹²⁰ Entsorgungskommission (2015). Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. K-MAT 41.

Der Anspruch an den Gesamtprozess, dass alle Akteure sich einem selbsthinterfragenden System verpflichtet fühlen, ist nur durch ein Höchstmaß an Transparenz der wissenschaftlichen Arbeiten zu erreichen. Die vollständige Veröffentlichung aller Forschungsergebnisse ist dabei eine selbstverständliche und unverzichtbare Randbedingung für die notwendige Transparenz und die gewollte Auseinandersetzung zwischen unterschiedlichen wissenschaftlich begründeten Sichtweisen. Dies gilt unabhängig davon, ob die Ergebnisse den jeweils eingeschlagenen Weg zur Realisierung eines Endlagers unterstützten oder ihm widersprechen.

Nach Auffassung einiger Mitglieder der Arbeitsgruppe 3 hat die bisherige Ressortaufteilung der Forschungsförderung im Themengebiet der Endlagerung zwischen BMWi (standortübergreifende Forschung), BMUB (standortbezogene Forschung) und BMBF (Grundlagenforschung) in der Vergangenheit eine Kultur der Selbsthinterfragung nicht gefördert, da aus den Fördermaßnahmen der Ressortforschung praktisch keine komplementären, einander im wissenschaftlichen Diskurs herausfordernden Forschungsarbeiten und Kompetenzen hervorgegangen sind. Vielmehr sei stattdessen eine Forschungslandschaft intransparenter gegenseitiger Abhängigkeiten entstanden, die eher zu einer Wagenburgmentalität denn zu einer Kultur der kritischen Selbsthinterfragung geführt habe.

Diese Auffassung wird nicht von allen Mitgliedern uneingeschränkt geteilt, sie zeigt aber, dass im Sinne einer Prozessgestaltung als selbsthinterfragendes System alle Beteiligten gut beraten sind, sich einem breiten, auch kontrovers geführten Diskurs um die wissenschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Sachverhalte im Standortauswahlverfahren zu stellen.

Es ist unverzichtbar, dass alle Forschungsvorhaben der deutschen Entsorgungs-/Endlagerforschung, seien es die Vorhabenträger initiierten F&E-Projekte zu konkreten Realisierung eines Endlagers oder unabhängig hiervon entstandene wissenschaftliche Arbeiten, in einem regelmäßig zu aktualisierenden Forschungsprogramm erfasst und erläutert werden. In Verlauf des Standortauswahlprozesses wird es dabei zukünftig auch erforderlich sein, Forschungsfragen und -projekte gemeinsam mit den jeweils betroffenen Standortregionen oder Standorten und dem nationalen Begleitgremium zu formulieren und zu erörtern.

15. Literaturverzeichnis

AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002. K-MAT 1.

BGR (2015). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Entsorgungspfade der sogenannten Kategorie C: Wissensstand und maßgebliche Aspekte zur Begründung der Einordnung, K-Drs. /AG3-75.

BGR (2014). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland. Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen. K-MAT 11.

BMU (2010). Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010.

BMUB (2015). Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm), Stand August 2015.

Brenk Systemplanung (2015). Gutachten zum Thema „Transmutation“ im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 45.

ENSI (2009). Eidgenössisches Nuklearinspektorat ENSI, Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis – Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, ENSI-G03, Ausgabe April 2009.

ENSI (2016). <http://www.ensi.ch/de/technisches-forum/behaeltermaterial-fuer-radioaktive-abfaelle/>.

Entsorgungskommission (2015). Diskussionspapier zur verlängerten Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und sonstiger Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. K-MAT 41.

Entsorgungskommission (2016). Diskussionspapier zur Endlagerung von Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen, abgereichertem Uran aus der Urananreicherung, aus der Schachanlage Asse II rückzuziehenden Abfällen und sonstigen Abfällen, die nicht in das Endlager Konrad eingelagert werden können, an einem Endlagerstandort. K-MAT 60.

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH (2001). Indikatoren für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "günstige hydrochemische Bedingungen". K-MAT 12-15.

Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH (2016). Tiefe Bohrlöcher, Februar 2016, K-Mat 52.

HSK (2005). Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), HSK 35/99.

Kleemann, U. Ablauf des Standortauswahlverfahrens. Synopse des Diskussionstandes in der AG3, 17.12.2015. K-Drs. /AG3-40A.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2015). Beschluss der Kommission vom 19. November 2015. Weiteres Vorgehen im Hinblick auf das Nationale Entsorgungsprogramm. K.-Drs. 145.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2015). Wortprotokoll der 14. Sitzung der Arbeitsgruppe 3.

Nicolai, H.. Vorschlag für eine Bundesfachplanung Endlager, 07. Januar 2016. K-Drs. / AG3-82.

Nuclear Energy Agency (OECD/NEA). The Safety Culture of an Effective Nuclear Regulatory Body. NEA No. 7247, Paris, 2016.

Öko-Institut e.V., UHH-ZNF (2015). Gutachten "Transmutation" im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-MAT 48.

Öko-Institut e.V. (2015). Zwischenbericht: Dokumentation zum Thema: Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Gutachtens „Fragen der Standortauswahl“. 05.01.2016.

Öko-Institut e.V. (2016). Zwischenbericht: Beitrag zur Erarbeitung einer Workshop-Unterlage „Planungswissenschaftliche Kriterien“ im Rahmen des Gutachtens „Fragen der Standortauswahl“. 20.01.2016.

Pitterich, Horst (2012). Endlagerforschung in Deutschland. Vortrag anlässlich der Veranstaltung "Bis in alle Ewigkeit ... Neuausrichtung der Endlagerforschung?" des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz am 08.12.2014 in Hannover. <http://www.umwelt.niedersachsen.de/bis-in-alle-ewigkeit/bis-in-alle-ewigkeit4-129345.html>.

Schneider-Eickhoff, Ralf. Rückholbarkeit / Bergbarkeit von Endlagerbehältern - Anforderungen an das Behälterdesign; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-51.

Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) (2008). Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Bern, 2008.

SKB (2016). Svensk Kärnbränslehantering AB, The barriers in the KBS-3 repository in Forsmark, Public Report, 18.01.2016.

Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2012). Geologische Informationen und Bewertungskriterien für eine Raumplanung im tieferen Untergrund. Papier, erarbeitet für den Bund-Länder-Ausschuss Bodenforschung (BLA-GEO) durch die Staatlichen Geologischen Dienste der Deutschen Bundesländer und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) sowie das Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG), Wittenberg, September 2012.

Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (2016). Datengrundlagen für die geowissenschaftlichen Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens. K-MAT 53a.

Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013. BGBl. I S. 2553.

Sträter, O., Prof. Dr. habil. (2016). Beratungsunterlage zur 20. Sitzung der AG 3 am 23. März 2016. Vortrag zum Thema „Selbsthinterfragende Systeme“. Präsentation. K-Drs./AG3-117.

TÜV Nord ENSYS, Öko-Institut e.V. (2015). Gutachten zur Langzeitzwischenlagerung abgebrannter Brennelemente und verglaste Abfälle. K-MAT 44.

Völzke, Holger (2015). Stellungnahme zur Rückholung und Bergung von Behältern im Rahmen der 14. Arbeitsgruppensitzung der AG3 am 24.11.2015; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-47.

Völzke, Holger (2015). Technische Anforderungen an Endlagerbehälter hinsichtlich ihrer Rückholbarkeit und Bergbarkeit; Unterlager zur 14. Arbeitsgruppensitzung der AG 3 am 24.11.2015. K-Drs. /AG3-49.