



## **DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission**

### **Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)**

#### **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>Ausgangslage und Vorgehen .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Politische Randbedingungen .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Fachliche Rahmenbedingungen .....</b>	<b>6</b>
3.1	Schutzziele .....	6
3.2	Radioaktive Abfälle .....	7
3.3	Endlagerung in tiefen geologischen Formationen .....	8
3.4	Isolationszeitraum .....	8
3.5	Rückholbarkeit .....	9
3.6	Endlagerkonzepte .....	10
3.7	Bedeutung geologischer und technischer Barrieren .....	11
<b>4</b>	<b>Bewertungsgrundsätze .....</b>	<b>11</b>
4.1	Vorrang der Sicherheit .....	12
4.2	Festlegen der Bewertungsgrundlagen .....	12
4.3	Informationsbedarf .....	13
4.4	Umgang mit Untersuchungsbefunden .....	14
4.5	Umgang mit Unsicherheiten .....	14
4.6	Irrtumsvorbehalt .....	15
4.7	Abwägungsgebot .....	15
<b>5</b>	<b>Ausschlusskriterien .....</b>	<b>16</b>
5.1	Großräumige Vertikalbewegung .....	17
5.2	Aktive Störungszonen .....	17
5.3	Seismische Aktivität .....	18
5.4	Vulkanische Aktivität .....	18
5.5	Grundwasseralter .....	19

<b>6</b>	<b>Mindestanforderungen .....</b>	<b>20</b>
6.1	Gebirgsdurchlässigkeit .....	20
6.2	Mächtigkeit .....	20
6.3	Minimale Teufe .....	21
6.4	Maximale Teufe bzw. Gebirgsmechanische Voraussetzungen .....	22
6.5	Flächenmäßige Ausdehnung .....	22
6.6	Gebirgsschlaggefährdung .....	23
6.7	Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen .....	23
<b>7</b>	<b>Abwägungskriterien.....</b>	<b>24</b>
7.1	Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau.....	24
7.2	Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich .....	25
7.3	Gute räumliche Charakterisierbarkeit .....	26
7.4	Gute Prognostizierbarkeit.....	27
7.5	Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen .....	28
7.6	Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten.....	28
7.7	Gute Gasverträglichkeit .....	29
7.8	Gute Temperaturverträglichkeit .....	30
7.9	Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden .....	31
7.10	Günstige hydrochemische Verhältnisse .....	31
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>34</b>

## 1 Ausgangslage und Vorgehen

Am 27.07.2013 ist das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG) in Kraft getreten. Ziel des Standortauswahlverfahrens nach Standortauswahlgesetz ist es, für insbesondere hoch radioaktive Abfälle den Standort für eine Anlage zur Endlagerung zu finden. In diesem Endlager sollen insbesondere bestrahlte Brennelemente und Abfälle aus der Wiederaufarbeitung eingelagert werden. Das Auswahlverfahren für den Standort dieses Endlagers soll bis zum Jahr 2031 abgeschlossen sein.

Basis eines vom StandAG geforderten wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahrens sind die darin angewendeten Auswahlkriterien. Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandort (AkEnd) war im Februar 1999 durch das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) eingerichtet worden, um als fachlich-wissenschaftliches Gremium ein nachvollziehbares Verfahren für die Suche und die Auswahl von Standorten zur Endlagerung aller Arten radioaktiver Abfälle in Deutschland zu entwickeln. Das Verfahren sollte die Beteiligung der Öffentlichkeit in geeigneter Form vorsehen und fundierte Kriterien beinhalten. Die Entwicklung sollte auf wissenschaftlicher Basis sachorientiert und ohne Ausschluss relevanter Aspekte erfolgen. Dabei sollten die Vorgehensweisen und Erfahrungen in anderen Ländern berücksichtigt werden. Die Auswahlkriterien des AkEnd wurden als Teil des Endberichts [1] im Dezember 2002 veröffentlicht.

Die ESK sieht es im Lichte des durch das StandAG neu gestarteten Standortauswahlverfahrens als sinnvoll an, die damals veröffentlichten Auswahlkriterien auf ihre Aktualität zu hinterfragen. Der Ausschuss ENDLAGERUNG RADIOAKTIVER ABFÄLLE (EL) hat in seiner 38. Sitzung am 27.08.2014 beschlossen, die Kriterien des AkEnd dahingehend zu betrachten, ob die ihnen zugrunde gelegte fachliche Argumentation noch dem Stand von Wissenschaft und Technik und den Anforderungen des StandAG entspricht. Die fachliche Diskussion der AkEnd-Vorgaben fand in der 40., 41., 42., 44., 46., 47. und 48. EL-Sitzung statt, das Dokument wurde in der 51. ESK-Sitzung am 10.12.2015 verabschiedet.

Gemäß Nationalem Entsorgungsprogramm (Stand August 2015, [2]) sollen im zukünftigen Endlager insbesondere hoch radioaktive Abfälle aufgenommen werden. Das Entsorgungsprogramm sieht bei der Standortsuche für dieses Endlager auch die Berücksichtigung derjenigen radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung vor, die gegebenenfalls nicht im Endlager Konrad eingelagert werden können (radioaktive Abfälle, die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkts ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind), die radioaktiven Abfälle, die aus der Schachanlage Asse II zurückgeholt werden sollen, sowie angefallenes und anfallendes abgereichertes Uran aus der Urananreicherung (Urantails) ohne weitere Verwertung vor.

Die ESK geht davon aus, dass einzelne Abfallarten zur Vermeidung von ungewollten und die Sicherheit beeinträchtigenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Lagerteilen am Standort räumlich voneinander zu trennen sind. In den folgenden Ausführungen wird auf die Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle fokussiert.

Im Standortauswahlgesetz werden als mögliche Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin genannt. Zu allen drei Wirtsgesteinen liegen in Deutschland bereits langjährige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten vor. Die ESK nimmt bezüglich des Wirtsgesteins keine Einschränkungen vor. Die Betrachtungen sollen dem StandAG entsprechend keines der diskutierten Wirtsgesteine Kristallin, Salz und Ton von vorneherein ausschließen. Der in den Sicherheitsanforderungen für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle [3] aufgenommene Gedanke eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) kann in einem kristallinen Wirtsgestein in Deutschland möglicherweise nicht umgesetzt werden, dem Einschlussprinzip kann jedoch mit einem entsprechend gestalteten Lagerkonzept möglicherweise entsprochen werden: In kristallinen Wirtsgesteinen, in denen die Einschlusswirkung der geologischen Barriere mit hoher Wahrscheinlichkeit weder den AkEnd-Kriterien [1] noch den BMU-Sicherheitsanforderungen [3] qualitativ genügt, müsste der Einschluss daher durch technische Barrieren erreicht werden. Im schwedisch-finnischen KBS-3-Konzept wäre dies z. B. der kupferummantelte Behälter im Verbund mit einem den Behälter umschließenden Bentonitpuffer.

Die ESK hat sich im Folgenden bemüht, die Hinterfragung der Auswahlkriterien unvoreingenommen bezüglich der Wirtsgesteine vorzunehmen, um das Auswahlverfahren möglichst breit anzugehen. Entsprechend wurde vom Konzept „einschlusswirksamer Bereich“ („ewB“) ausgegangen, für den der Einschluss auch durch technische Barrieren gewährleistet werden kann. Analog zu den Anforderungen des AkEnd und der BMU-Sicherheitsanforderungen wäre für diesen ewB die Integrität, d. h. der Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften über den Nachweiszeitraum, zu fordern. Weiterhin müsste eine Aussage zur Qualität des Einschlusses erfolgen.

Davon ausgehend müsste eine Anpassung des Textes der BMU-Sicherheitsanforderungen erfolgen. Die Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG müssten diesen angepassten Anforderungen entsprechend erfolgen.

Die ESK weist darauf hin, dass die AkEnd-Kriterien als in sich stimmiges Gesamtkonzept entwickelt worden sind. Die Kriterien stützen sich aufeinander ab und ergänzen einander. Änderungen an einem Kriterium müssen daher sorgfältig mit den anderen Kriterien abgestimmt werden. Änderungen an Bemessungsgrößen können zu Änderungen an weiteren Kriterien und deren Bemessungsgrößen führen. Dieser interne Abgleich ist ein wichtiger Prozess bei der Erstellung eines zukünftigen Kriterienkatalogs zur Standortsuche. Die ESK hat diesen Abgleich nicht geleistet, sondern weist auf Aspekte hin, die aus ihrer Sicht und mit Blick auf den Stand von Wissenschaft und Technik modifiziert werden sollten. Auf mögliche Änderungen an Bemessungsgrößen wird in diesem Papier an einigen Stellen hingewiesen.

Das Diskussionspapier greift den Gedanken der Hinterfragung der Vorgaben und Resultate des AkEnd strukturell auf, in dem die einzelnen Aspekte des AkEnd-Berichts knapp zusammengefasst und dazu konkrete Fragen gestellt werden. In den Kapiteln 2 bis 7 werden zu den einzelnen Rand- und Rahmenbedingungen sowie den Kriterien des AkEnd in einzelnen Kapiteln Fragen formuliert und deren Aktualität anschließend diskutiert. Die wichtigsten Erkenntnisse daraus werden in Kapitel 8 zusammengefasst. Alle Zitate wurden dem Endbericht des AkEnd [1] entnommen.

## 2 Politische Randbedingungen

Die politischen Randbedingungen des AkEnd sind in [1] im Kapitel 1.2 (S. 7/8) beschrieben. Als Randbedingungen für die Verfahrensentwicklung hatte das damalige BMU die folgenden Vorgaben gemacht:

- Alle radioaktiven Abfälle sollen in tiefen geologischen Formationen in Deutschland endgelagert werden. Dazu soll ein einziges Endlager verwendet werden. Das Ein-Endlager-Konzept wird in [1] im Kapitel 2.1.5 (S. 27-28) weiter thematisiert.
- Für die Endlagerung aller Arten und Mengen radioaktiver Abfälle reicht ein Endlager aus, das ab 2030 betriebsbereit sein soll.

Fragen:

### 1 Sind diese politischen Randbedingungen heute noch gültig?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK kann für die zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik nur eine Endlagerung in tiefen geologischen Formationen die notwendige Langzeitsicherheit garantieren. Die Randbedingungen hinsichtlich des Ein-Endlager-Konzepts haben sich u. a. durch die Genehmigung des Endlagers Konrad für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung geändert. Gleichwohl stellt auch bereits der AkEnd fest, dass die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten unter Sicherheits- und Nachweisaspekten unerlässlich ist. Dieser Aussage schließt sich die ESK an. Bestrebungen, die für nicht Konrad-gängige vernachlässigbar Wärme entwickelnde Abfälle (verpresste technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung, graphithaltige Abfälle, sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, sowie die Abfälle, die aus der Schachanlage Asse II rückgeholt werden sollen und Urantails aus der Urananreicherung) einen gemeinsamen Standort für die Endlagerung suchen, haben zu berücksichtigen, dass eine sinnvolle Trennung der Abfallarten notwendig ist, was sich auf den Platzbedarf für das Endlager auswirken wird.

Die Diskussion der AkEnd-Kriterien zur Auswahl eines Endlagerstandortes fokussiert auf die Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle. Die Thematik der Entsorgung nicht Konrad-gängiger radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung sowie die entsprechenden Kriterien für die Standortauswahl für die Endlagerung dieser Abfälle werden in einem noch zu erstellenden Diskussionspapier betrachtet.

Das StandAG gibt für den Abschluss des Auswahlverfahrens ein Zeitfenster bis 2031 vor. Dem Auswahlverfahren ist jedoch aus Sicht der ESK grundsätzlich die Zeitdauer einzuräumen, die notwendig ist, um das Primat der Sicherheit umzusetzen. Die Erfahrungen aus dem Standortauswahlverfahren der Schweiz zeigen, dass tendenziell mit längeren Zeiträumen zu rechnen ist, wenn im Verfahren Nachforderungen oder Rückschritte erforderlich werden und den dazu notwendigen fachlichen Abklärungen die nötige Zeit eingeräumt werden soll.

## 2 Welche zusätzlichen politische Randbedingungen gelten heute?

Antwort ESK: Die politischen Randbedingungen sind in das Nationale Entsorgungsprogramm [2] eingeflossen. Zusätzliche politische Randbedingungen könnten sich im Zusammenhang mit Festlegungen zur Partizipation der betroffenen Bevölkerung im Standortauswahlverfahren ergeben.

## 3 Fachliche Rahmenbedingungen

Die fachlichen Rahmenbedingungen des AkEnd sind in [1] im Kapitel 2.1 (S. 11-39) beschrieben. Diese fachlichen Rahmenbedingungen umfassen die folgenden Punkte:

### 3.1 Schutzziele

Die Schutzziele werden in [1] im Kapitel 2.1.1 (S. 11-14) behandelt. Sie können in den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Mensch und Umwelt angemessen vor radiologischer und sonstiger Gefährdung (insbesondere vor potenziell schädlichen Auswirkungen durch Schadstofffreisetzungen aus den Abfallgebinden) geschützt werden.
- Die potenziellen Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt sollen das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen.
- Für zukünftige Generationen sollen unzumutbare Lasten und Verpflichtungen vermieden werden (Nachsorgefreiheit).
- Die potenziellen Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen nicht größer sein als dies innerhalb Deutschlands zulässig ist.
- Stoffe dürfen nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.

Die Schutzziele müssen durch eine Kombination von geologischen und technischen Barrieren möglichst zuverlässig und langfristig erreicht werden.

Fragen:

## 3 Sind diese Schutzziele heute noch gültig?

Antwort ESK: Die ESK verweist auf die in [3] formulierten Schutzziele, die mit den AkEnd-Schutzzielen weitgehend identisch sind. Aus Sicht der ESK sind diese Schutzziele auch heute noch gültig, gegenüber [3]

ergeben sich keinerlei Konflikte.

In den Schutzziele des AkEnd fallen zwei Begriffe auf, die einer näheren Erläuterung bedürfen, weil sie sich abhängig vom gesellschaftlichen Umfeld (und seiner Entwicklung) ebenfalls in ihrer Bedeutung entwickeln können. Der Begriff der „Unzumutbarkeit“ bezieht sich auf zukünftige Lasten und Verpflichtungen. Diese stehen im Spannungsfeld mit der Flexibilität: Eine höhere Flexibilität bezüglich Endlagerkonzepten geht auch mit grundsätzlich höherer Verantwortung und Belastung der Gesellschaft einher. Die Grenze zwischen Zumutbarkeit und Unzumutbarkeit muss in einem gesellschaftlichen Prozess festgelegt werden.

Der Begriff der „Nachsorgefreiheit“ geht davon aus, dass ein Endlager im geologischen Untergrund passiv sicher ist, d. h. kommende Generationen keine aktive Bewirtschaftung oder Überwachung des Lagers vorzunehmen haben (passive Sicherheit). Nachsorgefreiheit schließt jedoch nicht aus, dass künftige Generationen Maßnahmen treffen können oder sollten, um im eigenen Interesse die Dokumentation der Information zum Endlager so langfristig wie möglich zu erhalten und deren Archivierung aktiv fortzuführen. Zusätzliche Schritte könnten in einem kontinuierlichen Monitoring der Region um das Endlager (Messung der natürlichen Radioaktivität, Seismizität und Hebung etc.) oder in der Umsetzung eines raumplanerischen Schutzbereiches um das Lager umgesetzt werden.

4 Wären aus Sicht der ESK heute weitere/andere Schutzziele zu ergänzen?

Antwort ESK: Nein.

### **3.2 Radioaktive Abfälle**

Die radioaktiven Abfälle werden in [1] im Kapitel 2.1.2 (S. 14-19) angesprochen. Zur Abschätzung der Platzverhältnisse in einem zukünftigen Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle wurde seitens AkEnd eine Abfallmenge von 24.000 m<sup>3</sup> angegeben, für ein Endlager für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung wurde eine Abfallmenge von 290.000 m<sup>3</sup> angegeben (vgl. Tabelle 2.1 auf S. 15).

Frage:

5 Ergeben sich aus der heutigen Situation andere Rahmenbedingungen in Bezug auf die radioaktiven Abfälle an den nach Standortauswahlgesetz (StandAG) für ein Endlager zu bestimmenden Standort?

Antwort ESK: Die ESK verweist auf das aktuelle Nationale Entsorgungsprogramm [2]. Darin sind verschiedene Optionen der Entsorgung festgehalten. Die Abfallmengen der einzelnen Kategorien haben sich aufgrund der Restlaufzeiten der Kernkraftwerke, der rechtsgültigen Planfeststellung für das Endlager Konrad und der gesetzlich angestrebten Rückholung der radioaktiven Abfälle aus der Asse verändert. Mit dem bis 2022 erfolgenden Abschalten aller Kernkraftwerke sind insbesondere die Mengen der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle in den kommenden Jahren genau bestimmbar und daraus auf der Basis eines Lagerkonzeptes die notwendigen Platzverhältnisse für ein Endlager abschätzbar.

Für das Standortauswahlverfahren sind die Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle (abgebrannte Brennelemente, hochradioaktive verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) bezüglich ihres radiologischen Inventars verfahrensführend, auch wenn andere zu entsorgenden Abfallströme volumenbezogen einen größeren Teil der Menge der zu berücksichtigenden radioaktiven Abfälle ausmachen. Es ist jedoch zu beachten, dass die weiteren zu entsorgenden Abfallströme mit ihren spezifischen Eigenschaften gegebenenfalls andere grundlegende Anforderungen an die Wirtsgesteine stellen können. Die Menge der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung hängt von den folgenden Randbedingungen ab, für die mögliche Änderungen erkennbar sind:

- 1 von der Menge der tatsächlich aus der Schachtanlage Asse II rückzuziehenden Abfälle und dem dazu anzuwendenden Konditionierungsverfahren,
- 2 von der Entsorgungslösung für die Urantails aus der Urananreicherung,
- 3 von der Produktion radioaktiver Abfälle aus dem Bereich nichtkerntechnischer Anlagen.

Mit dem Nationalen Entsorgungsprogramm [2] werden die vorhandenen Abfallströme regelmäßig auf ihre Entwicklung hin überprüft.

Wie bereits oben erläutert, wird in den folgenden Ausführungen auf die Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle fokussiert.

### **3.3 Endlagerung in tiefen geologischen Formationen**

Diese Rahmenbedingung wird in [1] im Kapitel 2.1.4 (S. 20-26) behandelt. Für den AkEnd hat die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen „gegenüber den anderen Beseitigungsoptionen auf der Erde entscheidende Vorteile“ (S. 25). Diese werden vom AkEnd aufgelistet und auch deren Nachteile diskutiert. Konsequenz sind hohe Anforderungen an ein Standortauswahlverfahren.

Frage:

- 6 Ist die klare Präferenz des AkEnd für die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen aus Sicht der ESK weiterhin gültig?

Antwort ESK: Diese klare Präferenz ist aus Sicht der ESK weiterhin gültig.

### **3.4 Isolationszeitraum**

Der Isolationszeitraum wird in [1] im Kapitel 2.1.6 (S. 28-30) diskutiert. Der AkEnd kommt zum Schluss, dass „nach wissenschaftlichen Erkenntnissen praktisch vernünftige Prognosen über die geologische Standortentwicklung in günstigen Gebieten über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million



Jahren erstellt werden können“ und daher „der Isolationszeitraum der gesuchten Endlagerstandorte in der Größenordnung von einer Million Jahren liegen soll.“

Frage:

7 Ist ein solcher Isolationszeitraum weiterhin Stand der Wissenschaft?

Antwort ESK: Ein Isolationszeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahre ist aus Sicht der ESK für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle weiterhin gültig.

„Der Zeitrahmen von einer Million Jahren für die Beurteilung der Langzeitsicherheit hochradioaktiver Abfälle erscheint als ein angemessener Kompromiss zwischen den ethisch begründeten Forderungen nach Langzeitverantwortung und den Grenzen der praktischen Vernunft.“ [4].

So ist für diesen Zeitrahmen eine wissenschaftlich vertretbare Abschätzung über die Entwicklung des geologischen Untergrundes, d. h. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, möglich (nicht aber der Verhältnisse an der Oberfläche). Die Ungewissheiten über die Entwicklung des Endlagersystems bleiben beschränkt und daher können für eine solche Zeitdauer entsprechend belastbare Sicherheitsanalysen auch mit eingrenzbarer Ungewissheit durchgeführt werden. Dazu werden sich langsam entwickelnde Systeme benötigt, deren Dynamik und die sie beeinflussenden Faktoren über den Zeitraum abgeschätzt werden können. Die Prognose über eine Million Jahre muss standortspezifisch erbracht werden. Im Fall eines Konzeptes mit einem Einschluss durch technische Barrieren in einem kristallinen Wirtsgestein ist zu fordern, dass die Prognose bezüglich des Einschlusses über denselben Zeitraum erfolgt. Außerdem erreicht nach einer Million Jahre zerfallsbedingt die Radiotoxizität Werte, die einem Uranerz nahe kommen.

Der Begriff „Isolationszeitraum“ wäre aus Sicht der ESK eher durch den Begriff „Einschlusszeitraum“ zu ersetzen. Gemäß [3] ist der Einschluss eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems, die bewirkt, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen.

### **3.5 Rückholbarkeit**

Die Rückholbarkeit wird in [1] im Kapitel 2.1.7 (S. 30-32) behandelt. Zum Schutz der geologischen Barriere und für das möglichst frühzeitige Erreichen eines passiv sicheren Endlagerzustandes sieht der AkEnd keinen Anlass, die Rückholbarkeit von Abfällen aus dem Endlager bei der Verfahrensentwicklung zu berücksichtigen.

Frage:

8 Ist die klare Nicht-Beachtung einer Rückholung bei einem Standortauswahlverfahren durch den AkEnd aus Sicht der ESK weiterhin sinnvoll?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK ist heute sinnvoll, eine Rückholbarkeit und Bergbarkeit in dem Maß zu

berücksichtigen, wie es in den Sicherheitsanforderungen des BMU niedergelegt ist [3]. Hier ist zu unterscheiden zwischen einer Rückholbarkeit, die eine Umkehr des Einlagerungsprozesses ermöglicht und damit bis zum Ende des Einlagerungsbetriebs dauert, und einer Bergbarkeit, für die in [3] die Handhabbarkeit der Behälter für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle für einen Zeitraum von 500 Jahren gefordert wird. Im Gegensatz zur Bergbarkeit hat der Antragsteller für die Rückholbarkeit ein umsetzbares technologisches Konzept vorzulegen und dessen Sicherheit zu belegen. Die Bergbarkeit geht von einem bereits verschlossenen Endlager aus, zu dem entsprechende Informationen vorliegen, so dass eine Bergung der Abfälle von einer detaillierten Kenntnis der Lagergeometrie und der Verteilung der Abfälle ausgehen kann. Beide Anforderungen sind insbesondere durch technische Maßnahmen umzusetzen, die die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen.

### 3.6 Endlagerkonzepte

Endlagerkonzepte werden in [1] im Kapitel 2.1.8 (S. 32-34) diskutiert. Für den AkEnd ist das Isolationsvermögen des Gesamtsystems entscheidend. Der AkEnd spricht eine Präferenz für die Endlagerung in einem Bergwerk (im Unterschied zur Einlagerung in tiefen Bohrlöchern oder Kavernen) aus, da nur damit die Einlagerung unter kontrollierten Bedingungen stattfinden kann. „Für den Fall, dass eine längere Überwachung und Kontrolle der Abfälle angestrebt oder sogar eine Rückholung der Abfälle für die Zukunft nicht ausgeschlossen wird, ist unter sicherheitstechnischen Aspekten nur das Bergwerkskonzept geeignet.“ In Abbildung 2.1 [1] wird außerdem eine Präferenz für ein „reines Endlagerbergwerk“ (im Unterschied zur Einlagerung in einem ehemaligen Gewinnungsbergwerk) angedeutet.

Frage:

- 9 Sind die Aussagen des AkEnd zu Endlagerkonzepten aus Sicht der ESK weiterhin als Stand der Wissenschaft und Technik anzusehen?

Antwort ESK: Die ESK unterstützt die damals vom AkEnd formulierten Aussagen weiterhin. Sie spricht sich außerdem für eine Einlagerung hoch radioaktiver Abfälle in einem reinen Endlagerbergwerk aus. Eine Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in den Grubenbauen eines Gewinnungsbergwerks kann mit diversen technischen und sicherheitsnachweislichen Problemen verbunden sein. Der Abbaubetrieb in einem wirtschaftlich genutzten Bergwerk erfolgt nach wirtschaftlichen Grundsätzen und folgt in aller Regel nicht den Anforderungen, die an ein Endlagerbergwerk gestellt werden. Während in einem Gewinnungsbergwerk das oberste Ziel die Maximierung der Ausbeute ist und dafür die Schädigung der Geosphäre in Kauf genommen wird, soll in einem Endlager die Schädigung der Geosphäre, insbesondere des ewG bzw. der geogenen Komponenten des ewB, minimiert werden. Die Schwierigkeiten einer Nachweisführung in Gewinnungsbergwerken können darin liegen, zu erfassen, welche Perforationen und andere Schädigungen der Geosphäre vor einer Umwidmung stattgefunden haben. Daher wird die vom AkEnd formulierte Einschränkung für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle weiterhin unterstützt. Der Dokumentationsbedarf für ein Endlagerbergwerk (im Hinblick auf eine Rückhol- und Bergbarkeit) ist möglicherweise durch die existierende Dokumentation eines auf den Abbau eines Rohstoffes ausgerichteten Bergwerkes nicht gedeckt.

### **3.7 Bedeutung geologischer und technischer Barrieren**

Die Bedeutung der geologischen und technischen Barrieren wird in [1] im Kapitel 2.1.9 (S. 35-39) erläutert. Der AkEnd misst der Langzeitsicherheit ein besonderes Gewicht zu. Aus diesem Grund ist für den AkEnd in einem Auswahlverfahren zunächst eine günstige geologische Situation zu suchen. Das geologische Umfeld und der Schachtverschluss übernehmen den Hauptteil der Barrierewirkung und diese kann durch angepasste technische Barrieren ergänzt werden.

Frage:

10 Ist die geologische Barriere auch aus Sicht der ESK die wichtigste Barriere?

Antwort ESK: Die ESK ist ebenfalls der Ansicht, dass die geologische Barriere – im Verbund mit den geotechnischen Barrieren – die wichtigste Barriere darstellt. Es ist insbesondere diese Barriere, für die ein Standortsuchverfahren gestartet werden muss, da dieser Teil des gestaffelten Barrierensystems nicht technisch erstellt werden kann, sondern natürlich vorhanden sein muss. Dieser Barriere muss auch bei Bau und Betrieb des Endlagers am meisten Sorge getragen werden, da sie nicht ersetzbar ist.

In verschiedenen Wirtsgesteinen und Konzepten werden der geologischen Barriere unterschiedliche Sicherheitsfunktionen in unterschiedlichem Maße zugewiesen. Mit Bezug auf die Sicherheitsfunktion „Einschluss“ weist die ESK darauf hin, dass ein ewG im Sinne des AkEnd und der Sicherheitsanforderungen für kristalline Wirtsgesteine womöglich nicht ausgewiesen werden kann. Natürliche Analoga zeigen, dass die Wirtsgesteine Tonstein und Steinsalz einen Einschluss für lange Zeiträume bewirken können. Entsprechende Einschlusseigenschaften für einen konkreten Endlagerstandort sind im Rahmen der Standorterkundung zu belegen und ihr Erhalt über den Nachweiszeitraum ist zu prognostizieren. In einem kristallinen Wirtsgestein hingegen läge die Hauptaufgabe des Einschlusses auf dem Behälter (der gegebenenfalls von einem Puffer bzw. Versatz geschützt wird, vgl. Kapitel 1). Für die Langzeitstabilität der Behälter oder anderer technischer Barrieren können keine natürlichen Analoga und Erkundungsergebnisse herangezogen werden. In diesem Sinne hält die ESK fest, dass für Standorte in Kristallingestein ein klarer Nachteil bezüglich der Sicherheit und ihres Nachweises gegenüber Standorten mit Sedimentgesteinen vorhanden ist.

## **4 Bewertungsgrundsätze**

Die Bewertungsgrundsätze des AkEnd sind in [1] im Kapitel 3.1 (S. 65-69) dargelegt. Diese Grundsätze umfassen die folgenden sieben Aspekte (Kapitel 4.1 bis 4.7).

Frage:

11 Sind die vom AkEnd diskutierten Bewertungsgrundsätze aus Sicht der ESK vollständig?

Antwort ESK: Die vom AkEnd aufgelisteten Bewertungsgrundsätze sind aus Sicht der ESK vollständig. Die ESK stellt fest, dass es für einen über deutlich mehr als ein Jahrzehnt laufenden Prozess ein Gremium braucht,

das sich institutionell und fortlaufend mit diesen Bewertungsgrundsätzen auseinandersetzt und dafür Sorge trägt, dass die Bewertungsgrundsätze und deren Anwendung im Standortsuchprozess überprüft werden.

Die ESK regt an, im Standortauswahlverfahren das Gesellschaftliche Begleitgremium gemäß § 8 StandAG damit zu betrauen.

#### **4.1 Vorrang der Sicherheit**

Die Sicherheit und deren Vorrang werden in [1] im Kapitel 3.1 (S. 65) angesprochen. Für den AkEnd hat beim Auswahlverfahren die Sicherheit den Vorrang vor allen anderen Aspekten, denn eine langfristige und größtmögliche Sicherheit ist das bei der Endlagerung angestrebte Hauptziel.

Frage:

12 Ist der Vorrang der Sicherheit durch den AkEnd aus Sicht der ESK korrekt?

Antwort ESK: Der Vorrang der Sicherheit steht aus Sicht der ESK nicht zur Disposition. Sicherheitsaspekten ist gegenüber ökonomischen und politischen Aspekten immer der Vorrang zu geben. Der Vorrang der Sicherheit entspricht auch den Sicherheitsanforderungen [3] und internationalen Vorgaben. Das Anliegen des AkEnd soll durch das nach § 8 StandAG einzurichtende gesellschaftliche Begleitgremium unterstützt werden, die Umsetzung des Primats der Sicherheit zu überwachen (vgl. Antwort zu Frage 11).

#### **4.2 Festlegen der Bewertungsgrundlagen**

Das Festlegen der Bewertungsgrundlagen wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 65-66) thematisiert. Für den AkEnd sind die Kriterien in ihrer Funktion (Ausschlusskriterium, Mindestanforderung oder Abwägungskriterium) vor der jeweiligen Anwendung eindeutig festzulegen. Bei der Berücksichtigung mehrerer Kriterien ist das Vorgehen bezüglich Priorisierung und Abwägung festzulegen (vgl. auch Antwort zu Frage 14). Subjektive Einstellungen sind als solche zu benennen.

Frage:

13 Ist das Vorgehen des AkEnd aus Sicht der ESK weiterhin sinnvoll?

Antwort ESK: Die ESK befürwortet das Vorgehen des AkEnd. Der AkEnd hat richtig erkannt, dass ein Teil der Bewertungen auf Expertenaussagen abzustützen ist und nicht durch klar messbare Kriterien vorgegeben werden kann. Der Wert dieser „expert judgements“ ist abhängig von den dahinter stehenden Personen, deren Erfahrung sowie von der Gestaltung des Bewertungsprozesses. Bei besonders wichtigen Entscheiden ist aus Sicht der ESK frühzeitig vorzusehen, dass für solche Entscheide gegebenenfalls mehrere Expertenmeinungen einzuholen sind, dass Experten auch in Gruppen gebündelt werden können (die Experten müssen gemeinsam zu einer Lösung kommen) oder mehrere Expertengruppen eingesetzt und die Variation unter den Meinungen

dieser Gruppen als Ergebnis des „expert judgements“ herangezogen werden können. Die Argumente sollten dabei öffentlich zugänglich sein.

Das StandAG erwähnt Abwägungskriterien in § 4 (Bericht der Kommission und Umsetzung der Handlungsempfehlungen), in § 13 werden in Zusammenhang mit der Auswahl für die überträgige Erkundung jedoch nur Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen genannt. Der AkEnd hat vorgeschlagen, für diese Auswahl auch Abwägungskriterien heranzuziehen. Darüber hinausgehend ist anzumerken, dass das StandAG in den einzelnen Schritten Sicherheitsuntersuchungen und deren Bewertung vorsieht. Das bedeutet nach Auffassung der ESK, dass unter Annahme eines vom jeweiligen Wirtsgestein abhängigen Sicherheits- und (vorläufigen) Endlagerkonzepts durch den Vorhabenträger die Funktionen (Sicherheits- und andere Funktionen) der geogenen Teile des Systems („Geosphäre“) zu benennen sind. Es ist dann zu prüfen, in welchem Maße diese Funktionen am jeweils betrachteten Standort (bzw. Standort in der jeweils betrachteten Region) erfüllt werden können. Diese Betrachtung schließt die Berücksichtigung von Standort- bzw. regionstypischen Entwicklungen sowie Angaben zur Aussagesicherheit und Robustheit ein. Die Kriterien sind vor dem Hintergrund dieser Sicherheitsbewertungen einzuordnen und ihre Bedeutung für die Funktionen darzulegen. Letztlich bildet dies die Basis für die qualitative oder quantitative Priorisierung und Abwägung der Kriterien.

Traditionell werden bei Sicherheitsbetrachtungen auch Freisetzungsberechnungen und daran anschließende Dosisberechnungen vorgenommen, die dann zur Bewertung anhand entsprechender Kriterien herangezogen werden. Die ESK verweist in diesem Zusammenhang auf die Aussagen der ICRP zum indikativen Charakter solcher Rechnungen [6]. Die diesbezüglichen Ungewissheiten sind naturgemäß in den frühen Phasen einer Standortauswahl besonders groß. Die ESK ist daher der Auffassung, dass Dosisrechnungen während der Standortauswahl allenfalls eine Aussage zulassen, ob ein Endlager an einem Standort das Potential besitzt, die in [3] festgelegten numerischen Kriterien zu erfüllen, darüber hinaus jedoch nicht zu einem Vergleich herangezogen werden sollten.

### **4.3 Informationsbedarf**

Der Informationsbedarf wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 66) angesprochen. Aus Sicht des AkEnd ist für die Umsetzung jedes einzelnen Auswahlsschrittes der mindestens erforderliche qualitative und quantitative Bedarf an Information zu bestimmen. Diese Informationen müssen für alle zu beurteilenden Gebiete oder Standorte verfügbar sein oder aus Erfahrungen und aus anderen Gebieten übertragen bzw. abgeleitet werden können.

Frage:

14 Ist der seitens AkEnd formulierte Bedarf an Informationen aus Sicht der ESK weiterhin zu unterstützen?

Antwort ESK: Die ESK unterstützt diese Forderung des AkEnd. Pro Auswahlsschritt ist frühzeitig zu definieren, welche Informationen vorliegen müssen, um die in der entsprechenden Etappe vorzunehmenden Entscheidungen fällen zu können. Dabei ist jedoch eine sorgfältige Abwägung zwischen dem

Informationsbedarf und der mit der Beschaffung dieser Information verbundenen Verletzung des geologischen Untergrundes vorzunehmen.

#### **4.4 Umgang mit Untersuchungsbefunden**

Der Umgang mit Untersuchungsbefunden wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 67) erläutert. Der AkEnd kommt zum Schluss, dass bei Untersuchungsbefunden, die zu kontroversen fachlichen Interpretationen führen, eine Klärung herbeizuführen ist. Eine solche kann durch zielgerichtete zusätzliche Untersuchungen geschehen. Informationslücken zu verfahrensrelevanten Aspekten sind zu schließen. Falls diese aus methodischen Gründen oder wegen eines völlig unangemessenen Zeit- und Kostenaufwandes nicht geschlossen werden können, können im Einzelfall begründete Annahmen getroffen werden, die nicht zu einer Überschätzung des Isolationsvermögens führen.

Frage:

15 Ist der vom AkEnd vorgegebene Umgang mit Untersuchungsbefunden aus Sicht der ESK weiterhin zu unterstützen?

Antwort ESK: Die ESK ist mit der vom AkEnd vorgeschlagenen Vorgehensweise einverstanden. Dieser Umgang stellt sicher, dass Sicherheitsaspekte in einem Standortauswahlverfahren fortwährend oberste Priorität haben. Es ist aus Sicht der ESK wichtig, dass kontroverse Interpretationen von Untersuchungsbefunden und deren Klärung transparent gemacht werden. Es ist aus Sicht der ESK jedoch genauso wichtig, dass Verfahren entwickelt werden, mit denen Klärungsprozesse beendet werden können. Auch hier kann das gemäß § 8 StandAG einzurichtende gesellschaftliche Begleitgremium dafür vorgesehen werden, diese Klärungsprozesse aufzunehmen, zu leiten und abzuschließen (vgl. Antworten zu den Fragen 11 und 12).

#### **4.5 Umgang mit Unsicherheiten**

Der Umgang mit Unsicherheiten wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 67-68) diskutiert. Bei der Umsetzung eines Auswahlverfahrens sind für den AkEnd am Ende eines jeden Verfahrensschrittes die Quellen von Unsicherheiten zu identifizieren und der Umgang mit ihnen festzulegen. Unsicherheiten sind durch zielgerichtete Untersuchungen angemessen und stufengerecht zu verringern. Verbleibende Unsicherheiten können dann akzeptiert werden, wenn sie die Bewertung, ob ein Standort die geforderten Eigenschaften aufweist, nachweislich nicht beeinflussen. Die Konsequenzen verbleibender Unsicherheiten auf die Entscheidungsprozesse im Auswahlverfahren sind in jedem Fall darzustellen.

Frage:

16 Ist der vom AkEnd dargelegte Umgang mit Unsicherheiten aus Sicht der ESK weiterhin sinnvoll?

Antwort ESK: Die ESK ist mit diesem Umgang einverstanden. Sie verweist auf die heute gebräuchliche Terminologie, eher von „Ungewissheiten“ als von „Unsicherheiten“ zu reden. Diese Ungewissheiten sind in jedem Verfahrensschritt auszuweisen und deren Tragweite für die Bewertung der Eigenschaften eines Standortes bzw. für die in einem Standortauswahlverfahren vorgenommene Auswahl aufzuzeigen. Für den Fall, dass über einen sicherheitsrelevanten Sachverhalt nicht ausreichendes Wissen vorhanden ist, müssen die für den Schritt notwendigen Forschungsaktivitäten initiiert werden. Dies gilt insbesondere in den Fällen, in denen Langzeitentwicklungen eines Endlagers, die den menschlichen Erfahrungsbereich deutlich überschreiten, prognostiziert werden müssen. In einer institutionalisierten Dualität zwischen einem Betreiber einerseits und der Regulierungsbehörde andererseits sind Mechanismen einzusetzen, mit denen die Forschungsprogramme des Betreibers zur Minimierung von Ungewissheiten und zum Aufbau von neuem Wissen (wo noch nicht vorhanden) regelmäßig durch die Regulierungsbehörde bewertet werden.

#### **4.6 Irrtumsvorbehalt**

Der Aspekt des Irrtumsvorbehalts wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 68-69) angesprochen. Für den AkEnd sind die Ergebnisse aus der Anwendung von Kriterien in frühen Verfahrensschritten auch durch Modellvorstellungen und Annahmen gekennzeichnet. Die darauf beruhenden Entscheidungen unterliegen daher einem Irrtumsvorbehalt. Damit sind die in frühen Verfahrensschritten formulierten Anforderungen im Verfahren fortlaufend auf ihre Einhaltung zu überprüfen. Der Irrtumsvorbehalt gilt aus Sicht des AkEnd jedoch nicht für die Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe, sondern nur für die zu beurteilenden Befunde.

Frage:

17 Ist der vom AkEnd formulierte Umgang mit Irrtümern aus heutiger Sicht der ESK noch gerechtfertigt?

Antwort ESK: Die ESK ist mit der Aussage des AkEnd zu einem Irrtumsvorbehalt bezüglich getroffener Entscheidungen einverstanden. Eine kategorische Ausklammerung eines Irrtumsvorbehalts bei Anforderungen und Bewertungsmaßstäben wird jedoch kritisch gesehen. Ein Verfahren, das der Sicherheit als oberstem Prinzip verpflichtet ist, muss sich kontinuierlich am Stand von Wissenschaft und Technik messen. Sollten technische Entwicklungen oder wissenschaftliche Erkenntnisse anzeigen, dass die in früheren Schritten angewandten Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe nicht korrekt gewesen sind oder durch bessere ersetzt werden können („besser“ im Sinne einer Optimierung der wissenschaftlichen Grundlagen und der Optimierung der Sicherheit), dann ist aus Sicht der ESK auch hier eine Korrektur im Verfahren mit den notwendigen Konsequenzen vorzusehen. Erneut schlägt die ESK dazu vor, das einzurichtende gesellschaftliche Begleitgremium nach § 8 StandAG als übergeordnete Instanz vorzusehen, um die Einhaltung regelmäßig zu überprüfen und gegebenenfalls notwendige Änderungen der Kriterien in breitem Konsens erfolgen zu lassen.

#### **4.7 Abwägungsgebot**

Die Bedeutung eines Abwägungsgebots wird in [1] im Kapitel 3.1 (S. 39) thematisiert. Ein Abwägungsgebot gilt dem möglichst frühzeitigen Interessenausgleich zwischen unterschiedlichen Belangen sowie der

Konfliktminimierung zur Erreichung von nachvollziehbaren Entscheidungen und Rechtssicherheit. Für den AkEnd sind dazu vergleichende Standortbewertungen durchzuführen.

Frage:

18 Ist ein Abwägungsgebot im Sinne des AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll?

Antwort ESK: Die ESK sieht die Notwendigkeit eines Abwägungsgebots. Erste Richtschnur bei der Abwägung muss sein, dass die gesetzlichen Sicherheitsanforderungen eingehalten werden (vgl. z. B. die vom AkEnd genannten Schutzziele) und dass vorab alle Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen eingehalten wurden. Bei vergleichenden Standortbewertungen müssen die zu vergleichenden Standorte bezüglich Sicherheit allen Sicherheitsanforderungen, Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen genügen, bevor Abwägungskriterien herangezogen werden.

## **5 Ausschlusskriterien**

Die Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten werden in [1] in Kapitel 4 behandelt. Die Ausschlusskriterien des AkEnd sind in [1] in Kapitel 4.1.2 (S. 84-95) dargelegt.

Fragen:

19 Sind die vom AkEnd aufgelisteten Ausschlusskriterien aus Sicht der ESK vollständig?

Antwort ESK: Die Ausschlusskriterien sind vollständig. Es ist aus Sicht der ESK jedoch sinnvoll, die Anwendung dieser Ausschlusskriterien auch in den weiteren Schritten eines Standortauswahlverfahrens mit Blick auf einen eventuell geänderten Stand von Wissenschaft und Technik erneut zu überprüfen. Dies betrifft ausschließlich die im jeweiligen Verfahrensschritt verbliebenen Regionen bzw. Standorte.

In jenen Fällen, in denen die ESK Abweichungen vom Vorgehen des AkEnd formuliert, geschieht dies mit Hinweisen, in welche Richtung eine Verbesserung erreicht werden könnte. Eine sorgfältige Neuformulierung kann durch die ESK nicht vorgenommen werden.

20 Ist die Unterteilung zwischen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen nachvollziehbar?

Antwort ESK: Die Unterteilung ist nachvollziehbar. Die ESK sieht die Ausschlusskriterien als Kriterien zur Bewertung der geologischen Entwicklung an. „Ausschlusskriterien dienen dazu, Gebiete, die offensichtlich ungünstige geologische Voraussetzungen aufweisen, zu ermitteln“ [1] und aus dem weiteren Standortauswahlverfahren auszuschließen. Für die Ausschlusskriterien sind jeweils Karten über ganz Deutschland zu betrachten. In jedem folgenden Schritt ist erneut aufzuzeigen, dass die Information dieser Karten noch aktuell ist und nicht zusätzliche Gebiete aus dem Verfahren zu nehmen sind.



Die Mindestanforderungen beziehen sich hauptsächlich auf die Merkmale des ewG. Gebiete, die die Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden aus dem weiteren Verfahren ausgeschlossen.

## **5.1 Großräumige Vertikalbewegungen**

Die großräumigen Vertikalbewegungen werden in [1] im Kapitel 4.1.2 (S. 85) bzw. im Kapitel 4.1.2.1 (S. 86-87) thematisiert. Als Anforderung legt der AkEnd fest, dass in einer Endlagerregion die großräumige Hebung nicht mehr als ein Millimeter im Mittel pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum aufweisen darf.

Frage:

21 Ist die für die großräumige Vertikalbewegung vom AkEnd formulierte Anforderung aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Die Hebungsraten im Mittel von 1 mm pro Jahr im prognostizierbaren Zeitraum wird kaum in Deutschland erreicht. Somit ist dieses Ausschlusskriterium in der Praxis verzichtbar.

## **5.2 Aktive Störungzonen**

Das Ausschlusskriterium „aktive Störungzonen“ wird in [1] im Kapitel 4.1.2 (S. 85) bzw. im Kapitel 4.1.2.2 (S. 87-88) beschrieben. Für den AkEnd dürfen im Endlagerbereich keine aktiven Störungzonen vorliegen. Als „aktive Störungzonen“ gelten solche Zonen, entlang derer seit der Rupel-Stufe (vor 33,9 bis 28,1 Mio. Jahren) Bewegungen stattgefunden haben, die eindeutig mit seismischen Ereignissen in Zusammenhang stehen und an denen nachweislich Fluidtransport stattfindet.

Frage:

22 Ist das Ausschlusskriterium „aktive Störungzonen“ des AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll definiert worden?

Antwort ESK: Die ESK ist mit diesem Ausschlusskriterium einverstanden. Eine Bewegungsfreiheit seit dem Rupel bedeutet, dass eine entsprechende Störungzone seit ca. 30 Millionen Jahren nicht mehr bewegt worden ist. Diese Definition entspricht nur bedingt den Aussagen, wie sie in aktuellen Dokumenten der IAEA (z. B. NS-R-3 [5], Paragraph 3.5-3.7, Begriff „capable fault“) formuliert werden. Aufgrund der sehr beschränkten Möglichkeiten, Bewegungen an geologischen Störungsflächen zu datieren, muss der Nachweis solcher Bewegungen fast ausschließlich mittels indirekter Evidenzen geführt werden (u. a. verstellte geologische und geomorphologische Horizonte, Stufen in Flussterrassen (detektiert z. B. mit hochauflösenden LiDAR-Daten), seismische und paläoseismische Evidenzen, Datierung von Fluideinschlüssen entlang der Störungzone oder von austretenden Wässern).

Die Möglichkeit aseismischer Bewegungen ist zusätzlich zu berücksichtigen, insbesondere in ton- oder

salzreichen Bewegungshorizonten, denn solche Bewegungen können langfristig genauso in spröde, seismisch reagierende Gesteine propagieren. Als wichtige Rahmenbedingung muss auch das gegenwärtig vorhandene Spannungsfeld im geologischen Untergrund betrachtet werden. Die vorhandenen Spannungsrichtungen lassen abschätzen, inwiefern eine bereits über längere Zeiträume inaktive Störungszone zum gegenwärtigen Zeitpunkt reaktiviert werden könnte und wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass sich dieses Spannungsfeld im geologischen Untergrund über die nächste Million Jahre verändern wird.

### **5.3 Seismische Aktivität**

Das Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ wird in [1] im Kapitel 4.1.2 (S. 85) bzw. im Kapitel 4.1.2.3 (S. 89-90) angesprochen. Für den AkEnd dürfen im Endlagerbereich die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.

Frage:

23 Ist das seitens AkEnd formulierte Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Die ESK ist mit dem Ausschlusskriterium einverstanden. In einem seismisch mehrheitlich ruhigen Land wie Deutschland ist das seitens AkEnd formulierte Ausschlusskriterium als konservativ anzusehen. Aufgrund der Tatsache, dass ein Endlager im geologischen Untergrund nach Verschluss ein voll verfülltes System darstellt, wird eine weitere Verschärfung unter Einbeziehung der Zone 1 als nicht sinnvoll angesehen.

Die ESK hat das Verständnis, dass bei diesem Kriterium die gültige DIN in der jeweils aktuellen Fassung anzuwenden ist.

### **5.4 Vulkanische Aktivität**

Das Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“ wird in [1] im Kapitel 4.1.2 (S. 85) bzw. im Kapitel 4.1.2.4 (S. 91-93) erläutert. Der AkEnd formuliert dazu, dass in einer Endlagerregion kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen darf. Beim Ausschluss von Gebieten mit vulkanischer Aktivität soll zusätzlich ein Sicherheitssaum von 10 km um potenziell gefährdete Bereiche berücksichtigt werden.

Frage:

24 Ist das vom AkEnd definierte Ausschlusskriterium „vulkanische Aktivität“ aus Sicht der ESK sinnvoll?

Antwort ESK: Die ESK unterstützt das Ausschlusskriterium samt zusätzlichem Sicherheitssaum von 10 km um potenziell gefährdete Bereiche. Die Darstellung des AkEnd wird als noch heute gültig angesehen.

Der auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland auftretende Vulkanismus ist ausschließlich als so genannter Intra-Platten-Vulkanismus zu bezeichnen. Am Oberrhein und Egergraben steht er beispielsweise im Zusammenhang mit größeren extensiven Störungssystemen in der kontinentalen Platte. Ohne anhaltende Aktivität der begleitenden Störungssysteme sind die vulkanischen Zentren von beschränkter Lebensdauer. So sind beispielsweise die süddeutschen Vulkangebiete (Kaiserstuhl, Urach, Hegau) nur über wenige Millionen Jahre aktiv gewesen und es lässt sich mit manteltomographischen Methoden zeigen, dass unterhalb der Kruste heute keine thermischen Anomalien mehr existieren.

Als Folge einer vulkanischen Aktivität können die lokale Geologie und damit auch die geologische Prognose verkompliziert werden. Ein geophysikalischer Nachweis vulkanischer Gänge ist hinsichtlich Tiefe und Größe beschränkt. Entlang der Gänge können Wasserfließwege vorhanden sein. Darum sollte aus Sicht der ESK solchen Gebieten im Sinne einer Risikominimierung grundsätzlich ausgewichen werden.

## **5.5 Grundwasseralter**

Das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ wird in [1] im Kapitel 4.1.2 (S. 85-86) bzw. im Kapitel 4.1.2.5 (S. 94-95) präsentiert. Der AkEnd fordert, dass in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich keine jungen Grundwässer vorliegen dürfen, d. h. dass diese kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 enthalten dürfen. Der AkEnd weist jedoch darauf hin, dass die Erfüllung dieses Kriteriums allein kein hinreichender Beleg für ein ausreichend hohes Grundwasseralter und damit eine günstige geologische Gesamtsituation darstellt.

Frage:

25 Ist das vom AkEnd geforderte Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Das vom AkEnd formulierte Kriterium ist aus Sicht der ESK sinnvoll. Mit dem Hinweis des AkEnd, dass die Erfüllung dieses Kriteriums kein hinreichender Beleg für ein ausreichend hohes Grundwasseralter ist, ist die ESK einverstanden.

Einschränkend ist anzumerken, dass Informationen zu Tritium- und Kohlenstoff-14-Gehalten in Grundwässern flächendeckend a priori nicht vorhanden sind. Das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ ist daher u. U. erst nach Erkundungsbohrungen und Probenahmen anwendbar. Selbst wenn solche Daten zur Verfügung stehen, könnte der Fall eintreten, dass in einer vertikalen Abfolge von wasserführenden und -stauenden Gesteinsschichten nur einzelne Schichten mit Daten belegt sind. Aus Sicht der ESK ist damit fragwürdig, ob eine Anwendung dieses Ausschlusskriteriums über größere Flächen im ersten Schritt eines Auswahlverfahrens sinnvoll ist, oder ob das Kriterium „Grundwasseralter“ eher unter den Mindestanforderungen aufgelistet werden sollte.

## 6 Mindestanforderungen

Die Kriterien zur Auswahl von Endlagerstandorten werden in [1] in Kapitel 4 behandelt. Die Mindestanforderungen des AkEnd sind in [1] in Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) formuliert. Bei Nichteinhaltung der Mindestanforderungen wird ein Gebiet aus dem Verfahren ausgeschlossen. Wenn keine ausreichende Datenbasis vorhanden ist, verbleibt ein Gebiet vorerst im Verfahren.

Frage:

26 Sind die vom AkEnd aufgelisteten Mindestanforderungen aus Sicht der ESK vollständig?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK sind die Mindestanforderungen des AkEnd thematisch vollständig.

### 6.1 Gebirgsdurchlässigkeit

Die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) erläutert. Als Mindestanforderung legt der AkEnd fest, dass der ewG aus Gesteinstypen bestehen muss, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit  $< 10^{-10}$  m/s zugeordnet werden kann.

Frage:

27 Ist die für die Gebirgsdurchlässigkeit durch den AkEnd gewählte Mindestanforderung von  $< 10^{-10}$  m/s aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Die ESK ist mit der gewählten Mindestanforderung und deren Quantifizierung in Ton- und Salinalgesteinen einverstanden. Für kristalline Wirtsgesteine, für die der AkEnd keine Kriterien entwickelt hat, ist die Anwendung dieser Mindestanforderung nicht sachgerecht. Wie in Kapitel 1 beschrieben müsste in kristallinen Wirtsgesteinen, in denen die Einschlusswirkung der geologischen Barriere mit hoher Wahrscheinlichkeit weder den AkEnd-Kriterien [1] noch den BMU-Sicherheitsanforderungen [3] qualitativ genügt, der Einschluss daher durch technische Barrieren erreicht werden. Hierzu müssten separate Mindestanforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit für das kristalline Wirtsgestein entwickelt werden.

### 6.2 Mächtigkeit

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) festgelegt. Der AkEnd formuliert, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich mindestens 100 m mächtig sein muss.

Frage:

28 Ist die seitens AkEnd formulierte Mindestanforderung „Mächtigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Sicht der ESK sinnvoll definiert worden?

Antwort ESK: Die ESK ist mit einer Mindestanforderung durch eine minimale Mächtigkeit von 100 m einverstanden. Sie verweist darauf, dass die Abmessungen des ewG je nach Wirtsgestein und Konzept unterschiedliche Bedeutung haben. Sofern mit einer Migration von Radionukliden durch das Wirtsgestein zu rechnen ist, ist die Mächtigkeit im Hinblick auf mögliche Migrationszeiten und -raten von Bedeutung. Dabei ist zu beachten, dass die beiden Mindestanforderungen Gebirgsdurchlässigkeit und Mächtigkeit in direkter Abhängigkeit zueinander sowie zum hydraulischen Gradienten stehen. Ist mit einer solchen Migration nicht zu rechnen, stehen Integritätsbetrachtungen sowie eine mögliche Migration durch geotechnische Barrieren bei der Ausweisung des ewG im Vordergrund. Soll der Einschluss durch technische Barrieren erfolgen, so ist eine Wirtsgesteinsformation auszuweisen, die die entsprechend zu definierenden einschlusswirksamen Bereiche (ewB) über den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren schützt.

### 6.3 Minimale Teufe

Die Mindestanforderung „minimale Teufe“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) besprochen. Für den AkEnd muss die Teufe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches mindestens 300 m betragen.

Frage:

29 Ist die seitens AkEnd definierte Mindestanforderung an die Teufe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Sicht der ESK vernünftig?

Antwort ESK: Die ESK ist mit einer minimalen Teufe von 300 m für einen Standort mit einem Isolationszeitraum von einer Million Jahre einverstanden. Aus verschiedenen Gründen könnte die Angabe einer generellen Mindestteufe für ganz Deutschland für sich allein als ein zu undifferenziertes Kriterium angesehen werden:

- Je nach Hebungs- oder Subsidenzrate kann eine minimale Teufe von 300 m als genügend bis deutlich zu wenig angesehen werden.
- In stratigraphischen Abfolgen kann für die obersten ca. 200 m eine gegen oben zunehmende Dekompaktion der Gesteine und damit zunehmende hydraulische Durchlässigkeit beobachtet werden.
- In Gebieten wiederholter Vergletscherung (z. B. in der norddeutschen Tiefebene) finden sich glaziale Rinnen mit maximaler Tiefe von 500 m für die in zukünftigen Eiszeiten mit einem Ausräumen des Lockermaterials und einer möglichen Vertiefung und lateralen Verbreiterung zu rechnen ist.

Das Ziel der oben formulierten Mindestanforderung ist der Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über einen Nachweiszeitraum von einer Million Jahre. Dabei ist die minimale Teufe zusammen mit der zusätzlichen Mindestanforderung „Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen“ (vgl. Kapitel 6.7) zu betrachten. Durch die gemeinsame Betrachtung werden die oben aufgelisteten Aspekte berücksichtigt und das Ziel des langfristigen Erhalts des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches wird erreicht,

so dass die ESK die seitens des AkEnd festgelegte Mindestteufe von 300 m vollumfänglich unterstützt.

#### **6.4 Maximale Teufe**

Die Mindestanforderung „maximale Teufe“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) ausgeführt. Der AkEnd ist der Meinung, dass ein Endlagerbergwerk nicht tiefer als 1.500 m liegen darf.

Frage:

30 Ist die seitens AkEnd definierte Mindestanforderung an die maximale Teufe eines Endlagerbergwerks aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Als Begründung für diese Mindestanforderung wird seitens AkEnd die mit der Teufe ansteigenden Gebirgstemperaturen und den hierdurch steigenden technischen Aufwand beim Endlagerbetrieb angeführt. Darüber hinaus ist aus Sicht der ESK auch der mit der Teufe zunehmende Gebirgsdruck zu berücksichtigen. Die Begrenzung der maximalen Teufe für ein Endlagerbergwerk auf 1.500 m ermöglicht unter Berücksichtigung der steigenden Gebirgstemperaturen und des zunehmenden Gebirgsdrucks die sichere Errichtung und den sicheren Betrieb eines Endlagers auf der Basis fundierter technischer Kenntnisse und Erfahrungen.

Die ESK ist mit der Mindestanforderung einverstanden.

#### **6.5 Flächenmäßige Ausdehnung**

Die Mindestanforderung „flächenmäßige Ausdehnung“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) dargestellt. Der AkEnd sieht vor, dass der ewG über eine flächenmäßige Ausdehnung verfügen muss, die die Realisierung eines Endlagers am Standort zulässt, d. h. eine Fläche von ca. 3 km<sup>2</sup> in Salz bzw. von 10 km<sup>2</sup> in Ton oder Granit umfasst.

Frage:

31 Ist die vom AkEnd gestellte Mindestanforderung an die flächenmäßige Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aus Sicht der ESK vernünftig?

Antwort ESK: Die flächenmäßige Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss sich aus Sicht der ESK an der einzulagernden Abfallmenge orientieren. Bei ausschließlicher Betrachtung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle stimmt die ESK der vom AkEnd vorgeschlagenen Größenordnung der flächenmäßigen Ausdehnung zu.

Ergibt sich, wie in [2] angedacht, die Notwendigkeit, radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (d. h. nicht Konrad-gängige LAW/MAW, rückgeholte Abfälle aus der Schachanlage

Asse II, Urantails, Graphit-Abfälle etc.) und Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle an einem gemeinsamen Standort mit genügend großer räumlicher Trennung der Endlagerteile zu lagern, ist darüber nachzudenken, inwieweit das ewG-Konzept auch für die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung Anwendung finden soll und ob im Falle einer solchen Übertragung eine räumliche Trennung der Lagerteile nicht automatisch auch mit einer räumlichen Trennung der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche verknüpft werden sollte. Ist dies der Fall, wäre die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für alle Lagerteile unter Berücksichtigung der zu erwartenden Mengen der entsprechenden Abfallarten, der Einlagerungskonzepte (vertikale/horizontale Lagerung, ein-/mehrsöhlige Lagerung) und der Wärmeentwicklung zu definieren.

## **6.6 Gebirgsschlaggefährdung**

Die Mindestanforderung an eine „Gebirgsschlaggefährdung“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) definiert. Für den AkEnd darf der ewG bzw. das Wirtsgestein nicht gebirgsschlaggefährdet sein.

Frage:

32 Ist die vom AkEnd formulierte Mindestanforderung an die „Gebirgsschlaggefährdung“ aus Sicht der ESK sinnvoll gewählt?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK sollen geotektonische Situationen von vornherein nicht weiter im Verfahren bleiben, bei denen großräumig instantan auftretende Verbrüche des Gebirges (im Grundsatz ohne Vorankündigung) zu besorgen sind.

## **6.7 Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen**

Die Mindestanforderung „Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen“ wird in [1] im Kapitel 4.1.3 (S. 95-97) formuliert. Der AkEnd legt fest, dass keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen dürfen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit (vgl. Kapitel 6.1), Mächtigkeit (Kapitel 6.2) und flächenmäßige Ausdehnung (Kapitel 6.5) des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen.

Frage:

33 Ist die zusätzlich für drei der Mindestanforderungen vom AkEnd formulierte Mindestanforderung „Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen“ aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK ist diese Mindestanforderung von besonderer Wichtigkeit. Bei der Betrachtung eines Standortes ist nicht nur die Frage zu stellen, inwiefern die geforderten Eigenschaften heute vorliegen, sondern es muss auch sichergestellt werden, dass diese günstigen Eigenschaften auch über die Dauer

des Isolationszeitraumes von einer Million Jahre erhalten bleiben bzw. dass deren Erhaltung mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann. Dabei werden seitens AkEnd die Mindestanforderungen bezüglich „minimaler Teufe“ (Kapitel 6.3), „maximaler Teufe“ (Kapitel 6.4) sowie „Gebirgsschlaggefährdung“ (Kapitel 6.6) ausgeklammert. Bezüglich der ersten beiden lässt sich argumentieren, dass deren Einhaltung bereits durch das Ausschlusskriterium der „großräumigen Vertikalbewegung“ oder durch erhöhte Anforderungen bezüglich minimaler Teufe abgedeckt werden kann. Gebirgsschlaggefährdete Gebirgsbereiche sind über die Mindestanforderung ausgeschlossen.

## **7 Abwägungskriterien**

Die Abwägungskriterien des AkEnd werden in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 98-100) dargestellt. Sie sind Teil eines Abwägungsprozesses.

Fragen:

34 Sind die durch den AkEnd formulierten Abwägungskriterien aus Sicht der ESK vollständig?

Antwort ESK: Die ESK ist der Meinung, dass die Abwägungskriterien des AkEnd vollständig und thematisch sinnvoll gewählt sind.

35 Ist es sinnvoll, dass gerade diese zur Abwägung benutzt werden?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK ergänzen die Abwägungskriterien thematisch die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen. Wie in der Antwort zu Frage 34 formuliert, sollten alle Aspekte und Kriterien bei der Abwägung erneut geprüft und in ihrer Wechselwirkung untereinander betrachtet werden.

### **7.1 Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau**

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert eine geringe Migration von Schadstoffen aus dem ewG, lange Grundwasserlaufzeiten und Radionuklidtransportzeiten.

Frage:

36 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die ESK ist der Meinung, dass die hier angesprochenen Forderungen eine sinnvolle Ergänzung für die Mindestanforderungen an die Gebirgsdurchlässigkeit darstellen. Wie in Kapitel 6.1 ausgeführt, sind aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften für salinare, tonige und kristalline Wirtsgesteine auch unterschiedliche Ansätze zum Nachweis und daher auch zur Exploration und Messung der Gebirgsdurchlässigkeit und den damit verknüpften Transportprozessen zu verfolgen.



## 7.2 Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Dieses Abwägungskriterium wird in Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert ein großes Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, große Sicherheitsabstände zu wasserführenden Formationen und Sicherheit bei Versagen einzelner Barrieren.

Frage:

37 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die seitens AkEnd angegebenen Zahlenwerte lassen sich in Abhängigkeit von der vorhandenen Barrieremächtigkeit wie folgt zusammenfassen (Auszug aus der Tabelle auf Seite 108 [1]):

Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100-150	50-100
Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig	keine Angabe des AkEnd
Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300-500	keine Angabe des AkEnd
Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindestflächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km <sup>2</sup> und Ton 10 km <sup>2</sup> )]	> 2-fach	2-fach	< 2-fach
Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10 <sup>-10</sup> m/s und effektiver Porosität 0,1)	<< 10 <sup>-2</sup>	etwa 10 <sup>-2</sup>	>> 10 <sup>-2</sup>

Die Zahlenwerte zur Barrierenmächtigkeit beruhen auf Angaben aus [1], Tabelle 4.6, unter Ansatz des Darcy-Gesetzes und der Berechnung der Abstandsgeschwindigkeit. Hieraus ergibt sich eine Fließstrecke im Nachweiszeitraum von einer Million Jahre, welche der geforderten Barrierenmächtigkeit entspricht. Formal ist das Vorgehen richtig, in der Realität jedoch sind die Gradienten über sehr geringdurchlässige Gesteinsschichten deutlich höher (Faktor 10) anzusetzen.

Zur Anforderung an die Barrierenmächtigkeit scheinen die Zahlenwerte einleuchtend zu sein (je mächtiger, umso besser), deren quantifizierte Ableitung hat jedoch auch Schwächen. In der Tabelle wird das Kriterium des spezifischen hydraulischen Gradienten (bei vorgegebener Gebirgsdurchlässigkeit und effektiver Porosität) quantifiziert. Aus Sicht der ESK könnte ein solches Vorgehen auch kontraproduktiv sein. Dichte Gesteinspakete weisen ein höheres Potenzial auf als durchlässige (vgl. [1], Abbildung 4.8). Die Anforderung nach einem Gestein des ewG mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit und einem geringen Potenzial erscheint unnötig. Soll das Kriterium erhalten werden, könnte dieser Aspekt auch unter dem Ausschlusskriterium "Gebirgsdurchlässigkeit" zugeschlagen werden, ohne Zahlenwerte vorzugeben (da die Durchlässigkeiten, hydraulischen Gradienten, Kluftdurchlässigkeiten und Kluflhäufigkeiten einander bezüglich Stofftransport gegenseitig beeinflussen).

Weiter wird in der Tabelle die Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs quantifiziert. Nach heutigen Erkenntnissen würden die Tiefen je nach Regionen und Wirtsgesteinen angepasst werden. Der vom AkEnd eingesetzte Wert von 500 m orientierte sich an der Möglichkeit von externen Eingriffen in das System (aufgrund der durch flächige (fluviale) Erosion oder glazialen Tiefenschurf bestimmten minimalen Tiefe) einerseits und an der maximalen Tiefe andererseits. Nach heutigem Kenntnisstand muss in Norddeutschland über eine Million Jahre mit mehrfacher Eisüberfahrung und damit verknüpfter glazialer Tiefenwirkung von 300 bis 500 m gerechnet werden.

Bezüglich der „flächenhaften Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit“ ist zu diskutieren, ob die seitens AkEnd angesetzten Mindestausdehnungen heutzutage angesichts der aktuellen Abfallmengen und der angedachten Möglichkeit, eines Standortes mit mehreren separaten Lagerteilen für die neben den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen zusätzlich einzulagernden Abfälle noch zutreffend sind. Außerdem ist abzuklären, inwieweit sich der Flächenbedarf dadurch ändert, dass in einem Endlager, das neben den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen auch radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (nicht Konrad-gängige Abfälle, aus der Schachanlage Asse II rückzuziehende Abfälle, Urantails etc.) aufnimmt, zwingend eine ausreichende räumliche Trennung der Einlagerbereiche vorzusehen ist.

### **7.3 Gute räumliche Charakterisierbarkeit**

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert eine hohe Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung, eine große Planungssicherheit für das Endlagerbergwerk und geringen Erkundungsaufwand.

Frage:

38 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die ESK begrüßt das durch den AkEnd formulierte Abwägungskriterium. Die letzten Jahrzehnte haben insbesondere auf dem Gebiet der seismischen Charakterisierbarkeit aufgrund verbesserter Methoden in der Datenauswertung erhebliche Fortschritte gemacht.

Das seitens AkEnd vorgebrachte Argument des „geringen Erkundungsaufwandes“ sollte aus Sicht der ESK nur mit Bedacht verwendet werden. Wenn ein geringer Erkundungsaufwand bedeutet, dass auch die Auswertung der Daten einfach ist und die Interpretationsmöglichkeiten der Daten beschränkt sind, ist dies zu begrüßen.

Bei der räumlichen Charakterisierbarkeit besteht die Abwägung zwischen dem Informationsgewinn einerseits und der dabei erfolgenden Schädigung des geologischen Untergrundes andererseits. Bei geophysikalischen Methoden muss nur in sehr beschränktem Rahmen (Aufzeitbohrungen, Kalibrationsbohrungen) mit einer Schädigung des Untergrundes gerechnet werden.

Der AkEnd hatte zur Beschreibung des Abwägungskriteriums Unterkriterien formuliert (vgl. [1], Kapitel 4.1.4.4):

- a) die Ermittelbarkeit der Gesteinstypen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (darunter die räumliche Verteilung der Eigenschaften der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit) und
- b) die Übertragbarkeit der Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Aus Sicht der ESK könnte das Abwägungskriterium noch schärfer gefasst werden, in dem es begrifflich durch „Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit“ ersetzt wird. Für dieses Kriterium ließe sich in Anlehnung an das Vorgehen des AkEnd formulieren:

**Kriterium:** Die den ewG bzw. die Wirtsgesteinsformation charakterisierenden Gesteinstypen und ihre sicherheitsrelevanten Eigenschaften sollten räumlich möglichst homogen verteilt sein.

**Abwägung:** Räumliche Verteilung der Gesteinstypen und die Variabilität ihrer charakteristischen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Verteilung der Gesteinstypen	gleichmäßig	kontinuierliche räumliche Veränderungen	diskontinuierliche räumliche Veränderungen
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	gering	kontinuierliche räumliche Veränderungen	diskontinuierliche räumliche Veränderungen
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

#### 7.4 Gute Prognostizierbarkeit

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert eine hohe Zuverlässigkeit bei der Sicherheitsbewertung für lange Zeiträume, eine gute Begründbarkeit der Szenarien zur Schadstofffreisetzung und -ausbreitung und Reduzierungsmöglichkeiten bei den Unsicherheiten.

Frage:

39 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die ESK ist mit diesem Abwägungskriterium einverstanden. Auch hier lässt sich aus Sicht der ESK jedoch eine Präzisierung vornehmen: Der AkEnd listet drei sicherheitsrelevante „Merkmale“ auf, die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Alternativ zu dieser scheinbar abschließenden Auflistung schlägt die ESK eine allgemeinere Formulierung vor, die sowohl auf die Beständigkeit der relevanten sicherheitstechnischen Merkmale als auch auf die Prognostizierbarkeit der Veränderung der sicherheitsrelevanten Merkmale abhebt:

**Kriterium:** Die wesentlichen sicherheitsrelevanten Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.

**Abwägung:** Veränderung der wesentlichen sicherheitsrelevanten Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Veränderung der Merkmale des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum von 1 Mio. bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
Wertungsgruppe	günstig	bedingt günstig	weniger günstig

### 7.5 Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert eine Minimierung von Schädigungen der Barrierensysteme durch Bau und Betrieb des Endlagerbergwerks.

Frage:

40 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die ESK ist mit dem Abwägungskriterium einverstanden. Die natürlichen Barrieren werden aufgrund ihrer Eigenschaften gewählt und eine einmal getroffene Wahl kann nicht geändert werden. Bei den technischen Barrieren kann das Design gegebenenfalls nachträglich an neuere Erkenntnisse bzw. technische Entwicklungen oder vorgefundene Verhältnisse angepasst werden. In diesem Sinne gilt das Kriterium besonders für Schädigungen der geologischen Barriere. Dabei ist auch der Einfluss der beim Auffahren verwendeten Techniken zu berücksichtigen und gegebenenfalls technische Alternativen beim Ausbruch und dem Ausbau der Untertagebauten zu betrachten und hinsichtlich deren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit zu prüfen.

### 7.6 Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert ein robustes Verhalten der Barrierengesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Beanspruchung, d. h. eine geringe Wahrscheinlichkeit für die Bildung von Wasserwegsamkeiten oder nach hohem Selbstheilungsvermögen.

Frage:

41 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Aus Sicht der ESK ist dieses Abwägungskriterium sinnvoll gewählt worden. Sie weist darauf hin, dass ein hohes Selbstheilungsvermögen bei kristallinem Wirtsgestein nicht vorliegt. Bei Standorten mit kristallinem Wirtsgestein müssen die Wahrscheinlichkeiten zur Bildung von Wasserfließpfaden in besonderem Maße betrachtet werden. Das robuste Verhalten darf nicht nur auf den jetzigen Zustand des Gesamtsystems, sondern muss auch auf potenzielle zukünftige Entwicklungen angewendet werden.

## 7.7 Gute Gasverträglichkeit

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 99) formuliert. Der AkEnd fordert die Beherrschung der Gasentwicklung aus den Abfällen, so dass keine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu besorgen ist.

Frage:

42 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die Betrachtungen des AkEnd beruhen im Wesentlichen auf der Berücksichtigung der Auswirkung von Gasen auf die Barrierenintegrität. Sie haben nach wie vor Gültigkeit: So wird in einer Zusammenfassung des derzeitigen F&E-Standes durch die OECD/NEA [7] auf die Gasbildung durch anaerobe Metallkorrosion und Radiolyse sowie Gasbildung insbesondere in schwach und mittel radioaktiven Abfällen durch die Zersetzung organischer Stoffe und durch mikrobielle Aktivitäten verwiesen.

Durch den AkEnd wird dargelegt, dass Gase sowohl die Barrierenintegrität gefährden als auch als Transportmedium für Radionuklide wirken können. Der AkEnd verweist auch auf den Zielkonflikt „Einschluss versus Vermeidung eines Druckaufbaus“, der letztlich zur Ableitung der oben zitierten AkEnd-Kriterien geführt hat.

Darüber hinaus legt die OECD/NEA in [7] jedoch auch die Bedeutung radioaktiver Gase bzw. flüchtiger Radionuklide dar und verweist außerdem auf mögliche Auswirkungen auf geochemische Bedingungen. Die Ableitung sinnvoller Strategien im Umgang mit der Problematik und ihrer sicherheitsanalytischen Bewertung war Gegenstand zahlreicher EU-Projekte (PEGASUS, EVEGAS, PROGRESS, GASNET, FORGE).

Im Rahmen der Standortauswahl kann laut [7] auf eine Vermeidung von Gasbildung durch Korrosion durch die Bevorzugung trockener Formationen hingewirkt werden. Dies entspricht dem korrespondierenden AkEnd-Kriterium.

Aus Sicht der ESK ist das o. g. Kriterium 7.7 daher nach wie vor sinnvoll und richtig. Die ESK verweist aber auch darauf, dass weiterhin intensive Forschung und Entwicklung zur Gasproblematik betrieben wird. Diese sollte verfolgt und in regelmäßigen Abständen evaluiert werden, ob sich Konsequenzen für die Standortauswahl ergeben.

Der AkEnd verweist zusätzlich zum o. g. Kriterium auf die besondere Problematik der Einlagerung verschiedener Abfallarten – gerade im Hinblick auf die Gasproblematik:

- Die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten ist unter Sicherheits- und Nachweisaspekten unerlässlich (Zitat aus [1], S. 28).
- Im Hinblick auf die sicherheitstechnisch als besonders bedeutsam angesehene Gasentwicklung ergeben sich aus der Forderung nach langzeitiger Isolation der Abfälle gegenüber dem Transport mit dem Grundwasser einerseits und der Vermeidung kritischer Gasdrücke im Endlager andererseits z. T. schwierig miteinander zu vereinbarende Anforderungen an die geologischen Standortverhältnisse. Dieses Problem ist durch die räumliche Trennung verschiedener Abfallarten allein nicht lösbar und erfordert gegebenenfalls technische Maßnahmen (Zitat aus [1], S. 28, die technischen Maßnahmen betreffen z. B. die Wahl Behältermaterial oder Gaspufferstrecken).
- Für die beiden Abfallströme sind jeweils unterschiedliche geologische Voraussetzungen als besonders günstig zu bezeichnen. Unter Abwägung der genannten Punkte ist daher bezüglich der Gasproblematik die Einlagerung der Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle einerseits und der radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung andererseits an zwei adäquaten Standorten oder an einem Standort in adäquate Wirtsgesteine unter Sicherheits- und Nachweisaspekten sinnvoll bzw. unerlässlich (modifiziertes Zitat aus [1], S. 176).

Auch diese Sicht wird durch [7] bestätigt. Es ergibt sich also die Notwendigkeit, rechtzeitig im Standortauswahlprozess Klärung bezüglich des einzulagernden Inventars herzustellen, da dies Auswirkungen auf die Standortauswahlkriterien hat.

## **7.8 Gute Temperaturverträglichkeit**

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 100) formuliert. Der AkEnd fordert eine Reduzierung der Auswirkungen des Wärmeeintrages auf den ewG und die Verhinderung einer Beeinträchtigung durch thermische oder thermomechanische Belastungen.

Frage:

43 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Dieses Abwägungskriterium ist nur auf Lagerteile mit Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen und deren Umgebung anzuwenden. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass entsprechende andere Lagerteile nicht oder nur unwesentlich von der Temperaturentwicklung dieser Lagerteile beeinflusst werden. Die ESK ist grundsätzlich mit diesem Kriterium einverstanden.

Die Temperaturverträglichkeit ist aufgrund thermodynamischer und kinematischer Betrachtungen aufzuzeigen. Es ist dabei zu berücksichtigen (und gegebenenfalls mit thermischen Modellierungen aufzuzeigen), über welche Zeiträume der von den Wärme entwickelnden radioaktiven Abfällen ausgehende Wärmepuls das umliegende Gestein beeinflusst.

## **7.9 Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionukliden**

Dieses Abwägungskriterium wird in [1] im Kapitel 4.1.4.1 (S. 100) formuliert. Der AkEnd fordert gute Sorptionseigenschaften der Gesteine für Radionuklide.

Frage:

44 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Das Rückhaltevermögen in einem Endlagersystem wird bestimmt durch das für einen Radionuklidtransport verfügbare Lösungsvolumen, die jeweiligen geochemischen Randbedingungen, Gesteinsdurchlässigkeiten sowie die physikochemischen Sorptionseigenschaften des Wirtsgesteins und der (geo)technischen Barrieren (vgl. Kapitel 7.1). Ein gut ausgelegtes Endlagersystem im Steinsalz zeichnet sich durch nahezu impermeables Wirtsgestein aus, das keinen bzw. nur eine begrenzte Wassermenge zum Einlagerungsbereich zulässt. Das Radionuklidsorptionsvermögen von Salzmineraloberflächen ist dagegen begrenzt. Tonmineralphasen in nanoporösem, niedrig permeablem Tonstein besitzen Oberflächen, auf denen viele Radionuklide stark sorbiert werden. Klüftiges Kristallingestein erlaubt advektiven Wassertransport und besitzt im Vergleich zu Tonstein eine relativ geringe spezifische Oberfläche, die für die Sorption von Radionukliden zur Verfügung steht. Aus diesem Grund erfolgt die Verfüllung von Hohlräumen durch quellfähiges bentonitreiches Versatzmaterial, das seinerseits Radionuklide stark binden kann. Für die ESK sind gute Sorptionseigenschaften der Gesteine für Radionuklide daher als Abwägungskriterium geeignet. Sie sind aber im Rahmen des Zusammenwirkens verschiedener Sicherheitsfunktionen und dem daraus abgeleiteten Sicherheitskonzept (vgl. Kapitel 4.2) zu betrachten.

## **7.10 Günstige hydrochemische Verhältnisse**

Dieses Abwägungskriterium wird in Kapitel 4.1.4.1 (S. 100) formuliert. Der AkEnd fordert eine Reduzierung von Freisetzung und Transport von Radionukliden.

Frage:

45 Ist dieses Abwägungskriterium durch den AkEnd aus Sicht der ESK sinnvoll formuliert worden?

Antwort ESK: Die Grund- und Porenwasserzusammensetzungen beeinflussen die Radionuklidlöslichkeiten und damit den Radionuklidquellterm entscheidend. Zudem hängen Sorptions- und Diffusionsverhalten der Radionuklide sowie Kolloidbildung und Kolloidtransport von den hydrochemischen Bedingungen ab. Diese sind nicht nur zur Zeit der Erkundung zu betrachten, sondern auch deren mögliche Entwicklung über den gesamten Isolationszeitraum betrachtet werden. In diesem Sinne stellen günstige hydrochemische Verhältnisse aus Sicht der ESK ein sinnvolles, jedoch in Abhängigkeit von Wirtsgestein und Endlagerkonzept zu präzisierendes Abwägungskriterium dar: Die hydrochemischen Verhältnisse spielen sowohl im Hinblick auf eine mögliche Degradation technischer und geotechnischer Barrieren als auch im Hinblick auf das Freisetzungs- und Migrationsverhalten von Schadstoffen eine Rolle. Da je nach Konzept Barrieren in

unterschiedlicher Weise ausgelegt werden und mit unterschiedlicher Verfügbarkeit von Fluiden und unterschiedlichem Freisetzungs- und Migrationsverhalten zu rechnen ist, hängt eine Präzisierung des Kriteriums vom Endlagerkonzept und vom Wirtsgestein ab.

Es ist außerdem zu beachten, dass sich die hydrochemischen Bedingungen in Endlagersystemen über längere Zeiträume bedingt z. B. durch einen möglicherweise vorhandenen Betonausbau des Endlagers und unterschiedliche Stoffinventare der eingelagerten Abfälle verändern können. Insbesondere bei der Einlagerung unterschiedlicher Abfallarten können solche Änderungen signifikant und komplex werden. Dies ist bei der Einschätzung der Auswirkungen hydrochemischer Randbedingungen durch entsprechende Analysen zu berücksichtigen.

## **8 Schlussfolgerungen**

Mit Blick auf das Standortauswahlverfahren initiiert durch das Standortauswahlgesetz [2] hat die ESK die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien des AkEnd [1] dahingehend betrachtet, ob die Kriterien und die ihnen zugrunde gelegte fachliche Argumentation noch dem Stand von Wissenschaft und Technik und den Anforderungen des StandAG entsprechen.

Gemäß Nationalem Entsorgungsprogramm [2] sollen im zukünftigen Endlager insbesondere Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle aufgenommen werden. Die ESK hat daher in ihren Ausführungen auf die Wärme entwickelnden radioaktiven Abfälle fokussiert. Im Standortauswahlgesetz [2] werden als mögliche Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin genannt. Die ESK hat daher die Hinterfragung der Auswahlkriterien bezüglich der Wirtsgesteine vorgenommen. Für kristalline Wirtsgesteine wurde vom Konzept „einschlusswirksamer Bereich“ („ewB“) ausgegangen, für den der Einschluss auch durch technische Barrieren gewährleistet werden kann.

Die AkEnd-Kriterien waren als in sich stimmiges Gesamtkonzept entwickelt worden, in dem sich die Kriterien aufeinander abstützen und einander ergänzen. Änderungen an Bemessungsgrößen können zu Änderungen an weiteren Kriterien und deren Bemessungsgrößen führen. Dieser interne Abgleich ist ein wichtiger Prozess bei der Erstellung eines zukünftigen Kriterienkatalogs zur Standortsuche.

Bezüglich der aktuellen Mengen an radioaktiven Abfällen verweist die ESK auf das Nationale Entsorgungsprogramm [2]. Die fachlichen Randbedingungen sind ansonsten gleich geblieben. Die Bewertungsgrundsätze des AkEnd gelten weiterhin. Dem Auswahlverfahren ist daher grundsätzlich die Zeitdauer einzuräumen, die notwendig ist, um den Vorrang der Sicherheit umzusetzen. Für die Klärung von Fragen und Konflikten im Verfahren erscheint der ESK das im Standortauswahlgesetz eingesetzte Gesellschaftliche Begleitgremium eine geeignete Instanz darzustellen, die auch fachliche Verfahrensfragen aufnehmen und einer abschließenden Lösung zuführen kann.

Die ESK erachtet die seitens AkEnd formulierten Ausschlusskriterien (Kriterien zur Bewertung der geologischen Entwicklung) und Mindestanforderungen (Kriterien, die sich direkt auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beziehen) als sinnvoll und vollständig. Aus Sicht der ESK werden in Deutschland



Hebungsraten im Mittel von 1 mm pro Jahr kaum erreicht, womit dieses Ausschlusskriterium in der Praxis verzichtbar ist. Die ESK schlägt vor, dass Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ des AkEnd als Mindestanforderung zu betrachten, da es sich auf lokale Altersdaten aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich bezieht.

Auch die Abwägungskriterien sind aus Sicht der ESK weiterhin sinnvoll und vollständig. Die ESK diskutiert in Einzelfällen bezüglich der Bemessungsgrößen für diese Kriterien alternative Ansätze.

Das StandAG sieht in den einzelnen Schritten der Standortauswahl Sicherheitsuntersuchungen und deren Bewertung vor. Die ESK ist der Auffassung, dass in diesen Untersuchungen die Sicherheitsfunktionen der geogenen Teile des Systems aufgrund wirtsgesteinsabhängiger Konzepte abzuleiten und standortabhängig zu überprüfen sind. Die Kriterien sind vor diesem Hintergrund einzuordnen und ihre Bedeutung für die Funktionen ist darzulegen.

## 9 Referenzen

- [1] Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte:  
Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd  
Dezember 2002
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:  
Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente  
und radioaktiver Abfälle  
Stand August 2015
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:  
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle  
Stand 30. September 2010
- [4] C. Streffer , C. F. Gethmann, G. Kamp, W. Kröger, E. Rehbinder, O. Renn, K.-J. Röhlig (2011)  
Radioactive Waste. Technical and Normative Aspects of its Disposal  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011
- [5] IAEA Safety Standard Series  
Site Evaluation for Nuclear Installations  
Safety Recommendations NS-R-3 (November 2003)
- [6] ICRP (International Commission on Radiological Protection) 2013  
Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste  
ICRP Publication 122, Ann. ICRP 42 (1)
- [7] OECD-NEA:  
Relevance of Gases in the Post-closure Safety Case for Radioactive Waste Management –  
A Position Paper from the Integration Group for the Safety Case –  
NEA/RWM/IGSC(2015)1/REV1, Dezember 2014  
<http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2015/rwm-igsc2015-1-rev1.pdf>