



# Stellungnahme der ESchT zur ersten Etappe des Schweizer Standort- auswahlverfahrens für geologische Tiefenlager

## Teil II: Sicherheitstechnische und geowissenschaftliche Aspekte

**Autoren:**

R. Barth  
Dr. J.-D. Eckhardt  
G. Enste  
Dr. P. Hocke-Bergler  
Prof. Dr. K.-H. Lux  
Dr. J. Mönig  
Prof. Dr. Dr. B. Müller  
Prof. Dr. O. Renn  
Prof. Dr. R. Watzel

**Leitung:**

Dr. W. Hund (BfS)

März 2010

## **Expertengruppe Schweizer Tiefenlager**

Im Juni 2006 hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die deutsche „Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager“ (ESchT) einberufen. Die Expertengruppe soll Fragen des BMU und der deutschen Begleitkommission Schweiz (BeKo Schweiz) zum Sachplan „Geologische Tiefenlager“ der Schweiz beantworten sowie das Standortauswahlverfahren fachlich begleiten.

### **Kontakt:**

Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH  
Hr. Karsten Bruns-Schüler  
Schwertnergasse 1  
50667 Köln  
Karsten.brunschueler@grs.de  
Tel.: +49 (0) 221-20 68-689  
Fax: +49 (0) 221-20 68-734  
Internet: [www.escht.de](http://www.escht.de)

### **Anmerkung:**

Dieser Bericht ist von der Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager (ESchT) im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erstellt worden. Der Bericht kann unter Quellenangabe zitiert und auszugsweise reproduziert werden.

## Inhaltsverzeichnis

I.	Einleitung .....	1
II.	Rahmenbedingungen der ESchT-Bewertung .....	2
III.	Allgemeine Anmerkungen zu Etappe 1 des Auswahlverfahrens .....	4
IV.	Bewertung des Schritts 1 der Etappe 1 .....	6
V.	Bewertung des Schritts 2 der Etappe 1 .....	10
VI.	Bewertung der Schritte 3 bis 5 der Etappe 1 .....	17
VII.	Bewertung der Robustheit des Bewertungsverfahrens .....	29
VIII.	Umgang mit Datenungewissheiten .....	30
IX.	Diskrepanzen zu früheren Auswertungen und deren Begründungen .....	32
X.	Zusammenfassende Bewertung der ESchT .....	34
XI.	Literatur .....	37
Anhang A	Bewertung der Indikatoren zur Bautechnischen Eignung .....	39
Anhang B	Indikatoren zur Bewertung der verschiedenen Kriterien .....	54
Anhang C	Anwendung der Indikatoren in den Einengungsschritten .....	58

## I. Einleitung

Am 09.11.2008 hat das Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) Standortgebiete bekannt gegeben, die für den Bau von Tiefenlagern für radioaktive Abfälle als potenziell geeignet angesehen werden. Diese sind von der Nagra gemäß den Festlegungen im Sachplan geologische Tiefenlager (SGT 2008) anhand von Kriterien im Hinblick auf Sicherheit und technische Machbarkeit vorgeschlagen worden. Insgesamt hat die Nagra sechs Gebiete ermittelt, wobei drei Gebiete sowohl für die Errichtung eines Tiefenlagers für hochradioaktive als auch für die Errichtung eines Tiefenlagers für schwach- und mittelradioaktive und langlebige alphanukleare Abfälle in Frage kommen. Von den sechs Gebieten liegen vier in unmittelbarer Grenznähe zu Deutschland.

Die deutsche Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager (ESchT) hat den in der ersten Etappe des Schweizer Standortauswahlverfahrens vorgelegten Vorschlag für geologische Standortgebiete sowie raumordnerische Aspekte und Fragen zur Partizipation bewertet und ihre Ergebnisse in einer Stellungnahme, die aus drei Teilen besteht, zusammengefasst. Bei der Auswahl der möglichen Standortgebiete stehen sicherheitstechnische und geowissenschaftliche Fragestellungen im Vordergrund, auf die im Rahmen dieses Teils II der Stellungnahme ausführlich eingegangen wird. Dies betrifft insbesondere Fragen der Abfallzuordnung und -menge, das Sicherheits- und Barrierenkonzept<sup>1</sup>, die Quantifizierung der Kriterien und Umsetzung in die Bewertungsmaßstäbe sowie die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Einengungsprozedur auf die vorgeschlagenen sechs Standortgebiete.

Raumordnerische Aspekte sowie Fragen zur Partizipation, die vor allem in den nachfolgenden Etappen des Sachplanverfahrens eine gewichtige Rolle spielen, für die aber bereits jetzt wichtige Festlegungen getroffen werden, behandelt Teil I der ESchT-Stellungnahme (ESchT 2009, veröffentlicht am 10. November 2009). Dazu gehören raumordnerische Kriterien, Fragen der Betroffenheit und der Festlegung des Standortgebietes, der Partizipation und des Konfliktmanagements sowie des Rechtsschutzes.

Die ESchT hat bei der Erarbeitung des vorliegenden Teils der Stellungnahme Fragen, die von der deutschen Begleitkommission Schweiz (BeKo) übermittelt wurden, berücksichtigt. In der Regel werden diese Fragen indirekt in der Stellungnahme beantwortet. Aus Gründen der

---

<sup>1</sup> Das Sicherheits- und Barrierenkonzept wird in Deutschland auch als Endlagerkonzept bezeichnet.

Nachvollziehbarkeit sind die einzelnen Fragen in einem Teil III der Stellungnahme auf [www.escht.de](http://www.escht.de) aufgeführt.

Folgende übergeordnete Fragen werden in diesem Teil II der ESchT-Stellungnahme behandelt:

- Ist der Konzeptteil des Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) schlüssig angewendet worden?
- Ist der Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigt worden?
- Bestehen implizite Vorfestlegungen auf bestimmte Regionen?

## **II. Rahmenbedingungen der ESchT-Bewertung**

Zentrales Ziel eines Standortauswahlverfahrens ist die Gewährleistung einer möglichst weit reichenden Verfahrensgerechtigkeit bei der Standortsuche. Verfahrensgerechtigkeit bedeutet in diesem Fall, dass nach Festlegung der Rahmenbedingungen und der Verfahrensweise eine möglichst objektiv an geowissenschaftlichen und geotechnischen Sachverhalten orientierte Umsetzung der weiteren Verfahrensschritte erfolgt. So sollte z.B. durch zu pauschal und damit zu raumgreifend wirkende Ausschlusskriterien kein zu frühzeitiger Ausschluss von Gebieten erfolgen.

Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Identifizierung von Standorten für je ein Tiefenlager für hochradioaktive (HAA) und schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) hat nach den Festlegungen des SGT zu erfolgen, dessen Konzeptteil im April 2008 vom Schweizer Bundesrat beschlossen worden ist (SGT 2008). Der SGT sieht ein stufenweises Vorgehen in drei Etappen vor:

Etappe 1: Festlegung von potenziellen Standortgebieten

Etappe 2: Auswahl von mindestens je zwei Standorten für HAA- und SMA-Tiefenlager

Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren

Zu dem Entwurf des Konzeptteils des Sachplans ist von der ESchT am 20.03.2007 eine Stellungnahme ausgearbeitet worden mit einem im Grundsatz zustimmenden Votum (ESchT 2007). Aus geowissenschaftlicher und geotechnischer Sicht wurde insbesondere auf die hohen Anforderungen an die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise

hingewiesen. Diese ergeben sich daraus, dass die Quantifizierung und Wichtung der Auswahlkriterien und die Benennung der den Einengungsprozess steuernden Indikatoren erst im Prozessverlauf vorgenommen werden und entsprechende Festlegungen nicht bereits im Konzeptteil des Sachplans erfolgen.

Dem Standortauswahlverfahren liegen die Formulierung von Referenzbarrierenkonzepten<sup>2</sup> für SMA- und HAA-Tiefenlager sowie die Ausformung der Anforderungen an geologische und geotechnische Barrieren zugrunde, deren Schwerpunkt auf einem System gestaffelter passiver Sicherheitsbarrieren mit Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Verfüllung der Resthohlräume und geologischen Barrieren liegen. Im Rahmen des gewählten Konzepts der Sicherheitsbarrieren werden Standortgebiete gesucht, bei denen dem jeweiligen Geosystem die zentrale Sicherheitsfunktion zugewiesen werden kann. Die Langzeitsicherheit muss dabei nachsorgefrei gewährleistet werden. Kriterien und Indikatoren sowie das Bewertungssystem müssen erkennbar auf diesen Ansatz abgestimmt sein. Da die qualitativ-quantitative Präzisierung von Kriterien und Indikatoren erst in der Etappe 1 des Sachplanverfahrens erfolgt ist, wird sie im Rahmen dieser Stellungnahme einer kritischen Würdigung unterzogen.

Die Identifizierung von potenziellen Standortgebieten für die Tiefenlagerung erfolgt in Etappe 1 ausschließlich aufgrund sicherheitstechnischer und geowissenschaftlicher Kriterien. Ziel der Etappe 1 ist die Identifizierung von mindestens zwei Standortgebieten für ein HAA-Tiefenlager und von mindestens zwei Standortgebieten für ein SMA-Tiefenlager.

Die Umsetzung des Verfahrens zur Auswahl der für die Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle als geeignet angesehenen Standortgebiete und die Datengrundlagen sind in einer Reihe von Technischen Berichten der Nagra umfangreich dokumentiert (Nagra 2008a, 2008b, 2008c, 2008d). Daneben liefern geltende gesetzliche Anforderungen in der Schweiz und einschlägige Richtlinien der zuständigen Schweizer Institutionen wichtige Randbedingungen (ENSI 2009).

Diese Unterlagen bilden die wesentliche Grundlage für die Bewertung der von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete in der vorliegenden Stellungnahme. Bei der Bewertung der Standortvorschläge werden insbesondere geowissenschaftliche Basisdaten, die von der Nagra in ihren Berichten aufgeführt worden sind, als gegeben akzeptiert. Ihre detaillierte Prüfung durch die ESchT wäre schon aus Ressourcengründen nicht möglich gewesen.

---

<sup>2</sup> Die Referenzbarrierenkonzepte sind Nagra 2008 b, Abb. 1.3-3 und 1.3-4, zu entnehmen.

Neben den oben angeführten Fragen konzentrieren sich die Überprüfungen der ESchT daher auf Plausibilitätsprüfungen sowie auf stichprobenartige Prüfungen an einigen Stellen, zu denen detailliertere Kenntnisse bei den deutschen Experten vorliegen. Die ESchT geht davon aus, dass diese geowissenschaftlichen Daten insbesondere durch Schweizer Institutionen einer kritischen Würdigung unterzogen werden.

Zur Klärung von inhaltlichen Fragen und zur Beseitigung von Verständnisproblemen hat die ESchT am 15.09.2009 ein Informationstreffen mit Vertretern der Nagra durchgeführt. Fachgespräche haben am 08.10.2009 mit Vertretern des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) sowie am 18.11.2009 mit Prof. J. Löw (ETH Zürich, Vorsitzender der KNE) stattgefunden.

Der vorliegende Teil II der Stellungnahme gliedert sich entsprechend der einzelnen Schritte in Etappe 1 des Auswahlverfahrens. Dabei werden wichtige Aussagen, Ergebnisse und Bewertungen der ESchT in den einzelnen Kapiteln durch einen senkrechten Strich auf der linken Seite des Absatzes kenntlich gemacht. In Kapitel X werden die wichtigsten Aspekte zusammenfassend dargestellt.

### **III. Allgemeine Anmerkungen zu Etappe 1 des Auswahlverfahrens**

Die Vorgehensweise zur Identifizierung von grundsätzlich für die Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen als geeignet anzusehenden Standortgebieten in Etappe 1 entspricht im Grundsatz dem methodischen Ansatz des deutschen AkEnd (AkEnd 2002). Die Vorgabe von Rahmenbedingungen ist erforderlich, um eine transparente und nachvollziehbare Basis für die Umsetzung des Auswahlverfahrens zu schaffen. Daraus folgt zugleich, dass

- (1) die letztendlich identifizierten Standortgebiete in ihrer Charakteristik eng mit diesen Rahmenbedingungen verknüpft sind und
- (2) innerhalb des Suchraumes nicht grundsätzlich das absolut gesehen am besten geeignete Standortgebiet identifiziert wird, sondern diejenigen Standortgebiete identifiziert werden, die auf Grund der bestehenden geowissenschaftlichen Kenntnisse im Rahmen des Verfahrens die Vorgaben am besten erfüllen.

Diesem Ansatz folgend ist davon auszugehen, dass diese die Vorgaben am besten erfüllenden Standortgebiete grundsätzlich auch als potenziell geeignet für die Tiefenlagerung angesehen werden können, da sie mit Erfüllung der vorgegebenen und primär an der

Sicherheit sowie sekundär an der technischen Machbarkeit eines Tiefenlagers orientierten Suchkriterien die zentralen Sicherheits- und Machbarkeitsanforderungen mindestens erfüllen.

Mit dem Ansatz einer sicherheitsgerichteten Priorisierung von Standortgebieten wird nach Einschätzung der ESchT das Schweizer Standortauswahlverfahren wesentlichen und grundlegenden Anforderungen, die nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik an ein derartiges Verfahren zu stellen sind, gerecht. Zu nennen sind hier insbesondere die Auswahl bestmöglicher und hinreichend sicherer Standortgebiete sowie Alternativenprüfung und Verfahrensgerechtigkeit.

Es ist die Überzeugung der ESchT, dass eine größtmögliche Objektivität im Bewertungsprozess und Verfahrensgerechtigkeit die wesentlichen Elemente zur Erlangung eines zuverlässigen und dann auch in der Öffentlichkeit akzeptierbaren Ergebnisses des Standortauswahlprozesses sind. In jedem Fall sind Transparenz und Nachvollziehbarkeit in der Umsetzung des Auswahlprozesses dafür zentrale Voraussetzungen.

Nach dem SGT unterteilt sich die Etappe 1 in fünf Schritte, die von der Nagra der Reihe nach zu bearbeiten sind:

- Im Schritt 1 erfolgt die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA durch die Nagra. Zu diesem Schritt gehören auch die Festlegung des Abfallaufkommens und die Erfassung des Inventars an Nukliden.
- Im Schritt 2 erfolgt basierend auf dem zugeteilten Abfallinventar die Festlegung des Sicherheits- und Barrierenkonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die beiden Lagertypen.
- Im Schritt 3 werden geeignete geologisch-tektonische Großräume, welche den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen, identifiziert.
- Im Schritt 4 werden anhand von geologischen Referenzprofilen (Sammelprofilen) innerhalb der geeigneten Großräume, die sich zur Aufnahme eines Tiefenlagers eignen könnten, Wirtsgesteine bzw. einschlusswirksame Gebirgsbereiche identifiziert.
- Im Schritt 5 erfolgt schließlich die Identifikation geeigneter Wirtsgesteinsbereiche bzw. einschlusswirksame Gebirgsbereiche in geeigneten geologisch-geometrischen Konfigurationen, aus denen die vorgeschlagenen Standortgebiete ausgewählt wurden.

Die in den einzelnen Schritten jeweils zu berücksichtigenden Kriterien und Aspekte sind im SGT aufgeführt, wobei die Ausgestaltung dieser Kriterien in Form der während des Prozesses eingesetzten Indikatoren der Nagra überlassen worden ist. Für die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Identifizierung von geeigneten Standortgebieten ist von Bedeutung, dass die Indikatoren, die im Einengungsprozess in den Schritten 3 bis 5 zur Anwendung kommen, vorab im Schritt 2 von der Nagra benannt werden müssen.

Die Ergebnisse sind zusammengefasst in Nagra (2008a) und nochmals in einem Heft „Zusammenfassung“ konzentriert (Nagra 2008e). Nagra (2008b) enthält die vertieften geowissenschaftlichen Daten. In Nagra (2008c) werden Details zur Abfallzuteilung, zu den Barriersystemen und Anforderungen an die geologischen Eigenschaften des Untergrundes, also das Einengungsverfahren und den Einsatz der Indikatoren und ihre Bewertung dargestellt.

In allen Schritten sind durch die Nagra Entscheidungen getroffen und Festlegungen vorgenommen worden, die wegen ihrer potenziellen, das Ergebnis des Auswahlprozesses beeinflussenden Wirkungen von der ESchT überprüft und bewertet werden. Dies ist in den folgenden Kapiteln beschrieben, die sich an dem schrittweisen Vorgehen in Etappe 1 gemäß dem SGT orientieren.

#### **IV. Bewertung des Schritts 1 der Etappe 1**

##### *Abfallarten<sup>3</sup>*

Zu jedem existierenden Abfallgebäude in der Schweiz werden vielfältige Daten in einem zentralen Informationssystem für radioaktive Materialien (ISRAM) systematisch erfasst. Aufbauend auf diesen Informationen ist das modellhafte Inventar für radioaktive Materialien (MIRAM) datenbankgestützt abgeleitet worden, das die Daten für die Zwecke des SGT vereinfacht zusammenfasst. Das MIRAM beinhaltet insgesamt 142 Abfallarten, für die jahresabhängig Kenndaten und Eigenschaften wie Abfallvolumina, Nuklidinventare und Dosisleistungsverteilungen erfasst werden. Für jede Abfallart sind repräsentative Werte für die stoffliche Zusammensetzung, das Radionuklidinventar bezogen auf das Referenzjahr

---

<sup>3</sup> Im SGT und in den Berichten der Nagra werden die verschiedenen Typen der Abfälle als Abfallsorten bezeichnet. In dieser Stellungnahme wird stattdessen stets der in Deutschland gebräuchliche Begriff Abfallarten verwendet.

2050 sowie zentrale Eigenschaften des Abfallgebundes wie z.B. Wärmeleistung, Dosisleistung für Gammastrahlung und ggf. Neutronenstrahlung, Radiotoxizität und ihre zeitliche Entwicklung in Nagra (2008d) dokumentiert. Diese Dokumentation erfasst auch die zeitliche Entwicklung des Gesamtvolumens für die jeweilige Abfallgebundeart.

Aus Sicht der ESchT ist die Erfassung der insgesamt zu entsorgenden Abfälle sehr umfassend und systematisch. Ein Vergleich mit Daten für entsprechende deutsche Abfälle zeigte eine gute Übereinstimmung, so z.B. der Vergleich des Radionuklidinventars von verglasten Abfällen aus der Wiederaufbereitung von ausgedienten Brennelementen in La Hague, Frankreich. Das MIRAM (Nagra 2008d) setzt internationale Maßstäbe und bildet eine gute und nachvollziehbare Grundlage für die nächsten Schritte in Etappe 1.

### *Abfallmenge*

Bei der Bestimmung der Gesamtabfallvolumina und des Gesamt radionuklidinventars werden in Nagra (2008d) drei Szenarien betrachtet. Das sogenannte Referenzszenario geht von 50 Jahren Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke und einer Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin und Forschung bis zum Jahr 2050 aus. Die beiden anderen Szenarien gehen von 60 Jahren Betrieb der bestehenden Kernkraftwerke und einer Sammelperiode bis 2060 bzw. von einem Neubau von Kernkraftwerken aus, die wie die bestehenden Kraftwerke 60 Jahre Betriebszeit haben werden. Die Sammelperiode für die Abfälle aus Medizin und Forschung endet dann im Jahr 2120. Dieses Szenario führt zu den größten Radionuklidinventaren und Abfallvolumina, woraus sich auch die Maximalwerte für die laterale Ausdehnung für die beiden Tiefenlager ableiten, die für das SMA-Lager bei  $\leq 3 \text{ km}^2$  bei einer nutzbaren Breite von  $\leq 1 \text{ km}$  und für das HAA-Lager bei  $\leq 6 \text{ km}^2$  bei einer nutzbaren Breite von  $\leq 1,5 \text{ km}$  liegen. Diese Werte bilden die Grundlage für die weiteren Betrachtungen in Etappe 1.

Da das Abfallvolumen unmittelbar Auswirkungen auf den Platzbedarf der beiden Endlager hat, hat die ESchT untersucht, ob sich aus dieser Festlegung der Nagra eine steuernde Funktion im Einengungsprozess ergeben hat. Ein maximales Abfallvolumen, wie es sich aus dem Szenario „Neubau von KKW“ ableitet, könnte dazu führen, dass bestimmte Endlagergebiete im Einengungsprozess herausfallen, da sie die geometrischen Anforderungen nicht erfüllen. Allerdings betragen nach Einschätzung der ESchT die Unterschiede im Platzbedarf für die beiden Endlager zwischen dem Szenario mit dem kleinsten Abfallaufkommen und dem größten Abfallaufkommen höchstens einen Faktor 2. Da die Fläche für ein mögliches Endlager vor allem durch geologische und tektonische

Faktoren eingegrenzt wird, ist die Annahme eines größeren Platzbedarfs sicherheitsgerichtet. Aus den Darstellungen in Nagra (2008a Fig. 5.2-10 und 5.3-4) wird deutlich, dass es für mögliche SMA- und HAA-Tiefenlager keine Bereiche gibt, in denen kleinere Standortgebiete unter Einhaltung der notwendigen lateralen Sicherheitsabstände hätten identifiziert werden können.

Die ESchT nimmt zur Kenntnis, dass die Planung der Energie- und Stromversorgung in nationaler Souveränität erfolgt. Die Schweiz geht von einer mittelfristigen weiteren Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung aus. Zurzeit sind drei Gesuche für den Neubau von Kernkraftwerken an bereits bestehenden Standorten eingereicht worden. Im Sinne einer vorsorgenden Planung erscheint das gewählte Vorgehen für die Entsorgung daher konsequent, da auf diese Weise sichergestellt wird, dass die ausgewiesenen Gebiete in jedem Fall die vorgesehenen Tiefenlager aufnehmen können. Sollte es nicht zu dem vorgesehenen Zubau von Kernkraftwerkskapazitäten in der Schweiz kommen, weisen die identifizierten Standortgebiete weitere Platz- und Sicherheitsreserven auf.

#### *Zuteilung der Abfallarten zu den Lagertypen*

Die Vorgehensweise zur Aufteilung der Abfallarten auf die beiden Lagertypen ist detailliert in (Nagra 2008c) beschrieben. Die Aufteilung ist insbesondere für bestimmte schwach- und mittelradioaktive sowie einige langlebige alphanotoxische Abfallarten von Bedeutung. Für jede Abfallart sind Transportrechnungen für eine Anzahl von generischen geologischen Situationen, die prinzipiell angetroffen werden können, durchgeführt worden. Dazu wurden Rechenfälle von der Nagra definiert, die verschiedene Wirtsgesteinstypen und -situationen abdecken. Dabei werden homogen-poröse Wirtsgesteine, bei denen der Radionuklidtransport durch Diffusion erfolgt, genauso berücksichtigt wie geklüftete Wirtsgesteine, bei denen der advektiv-dispersive Radionuklidtransport überwiegt, sowie Wirtsgesteine mit unterschiedlich aufgebauten Zwischenschichten. Zusätzlich werden (steilstehende) Störungszonen berücksichtigt.

Die Aufteilung der Abfallarten erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Modellrechnungen für ein generisches geologisches SMA-Tiefenlager, mit denen die zeitliche Entwicklung der Auswirkungen des Radionuklidtransports in die Biosphäre für einige Szenarien ermittelt worden ist. Die dabei betrachteten Szenarien umfassen einige Fälle mit einer klar definierten Barrierenwirkung der technischen und geologischen Barrieren als auch eine Entwicklung mit einer erosiven Freilegung des Lagers über lange Zeiträume. Randbedingungen und Daten für diese generischen Rechnungen basieren zum Teil auf Erfahrungen und Ergebnissen in

den Projekten „Gewähr“, „Kristallin“ und „Entsorgungsnachweis Opalinuston“. Für den Radionuklidtransport in der Geosphäre wurde eine Pfadlänge von 50 m angesetzt. Aus den generischen Rechnungen ergibt sich, dass je nach betrachteten Rechenfall bei einem Wert für die großräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins von  $10^{-10}$  m/s bzw. beim Übergang auf den Wert  $10^{-9}$  m/s einige Abfallarten beim SMA-Endlager zu einem individuellen Beitrag der Strahlenexposition in der Biosphäre führen, so dass der halbe bzw. ganze Wert des gültigen Schutzkriteriums von 0,1 mSv/a überschritten wird. Anhand dieser Abschneidekriterien werden die Abfallarten identifiziert, die zusätzlich dem HAA-Endlager mit seiner größeren langzeitlichen Isolationswirkung zugeordnet werden.

Aus Sicht der ESchT ist der Ansatz, die Abfallzuteilung auf Basis der Ergebnisse von Transportrechnungen für jede Abfallart vorzunehmen, zielführend. Die den generischen Modellrechnungen zugrunde gelegten Rechenfälle decken ein breites Spektrum von möglichen geologischen Situationen ab. Nach Einschätzung der ESchT gibt es in der Schweiz eine ausreichende Anzahl unterschiedlicher Wirtsgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche mit einer großräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von  $10^{-10}$  m/s oder geringer, um einen Auswahlprozess durchführen zu können. Durch die Wahl dieses Parameterwertes erfolgt daher keine Vorfestlegung auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp.

Bei Verwendung der von der Nagra gewählten Abschneidekriterien werden im Ergebnis bestimmte Abfallarten möglicherweise dem HAA-Lager mit seinen strengeren Anforderungen an die geologische Barriere zugeordnet, obwohl sie bei weniger pessimistischen Parameterwerten in den generischen Transportrechnungen auch dem SMA-Lager hätten zugeordnet werden können. Diese Vorgehensweise ist nach Einschätzung der ESchT sicherheitsgerichtet.

Außerdem erwartet die ESchT, dass die geologische Situation an den im Auswahlprozess identifizierten Standortgebieten besser sein wird, als in den generischen Transportrechnungen unterstellt. Dies kann eine Reihe von Parameter betreffen, die den Radionuklidtransport beeinflussen, wie z.B. die großräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins, die an einem realen Standort geringer als  $10^{-10}$  m/s sein kann, oder dessen Mächtigkeit, die zu einer längeren Transportpfadlänge als 50 m führen kann. Mit solchen Parameterwerten ergäben sich geringere Dosiswerte in der Biosphäre als in den generischen Transportrechnungen unterstellt.

## V. Bewertung des Schritts 2 der Etappe 1

### *Sicherheits- und Barrierenkonzept*

Dem Standortauswahlverfahren liegen die Formulierung von Referenzbarrierenkonzepten für SMA- und HAA-Tiefenlager sowie die Ausformung der Anforderungen an geologische und geotechnische Barrieren zugrunde. Die von der Nagra entwickelten Sicherheits- und Barrierenkonzepte für die SMA- und HAA-Tiefenlager sehen jeweils ein gestaffeltes System passiver technischer Barrieren (Abfallmatrix, Endlagerbehälter, Verfüllung der Resthohlräume) und natürlicher Barrieren vor (Nagra 2008c). Zentrales Element des Barrierensystems ist dabei ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich, durch den der Verbleib der Radionuklide am Ort der Einlagerung über einen möglichst langen Zeitraum sichergestellt werden soll. Dieser Ansatz entspricht auch den Vorstellungen des AkEnd (AkEnd 2002).

Die Radionuklide werden in einer Abfallart-spezifischen Abfallmatrix fixiert, deren Zersetzungsrate gering ist. Die Endlagerbehälter sorgen für eine beschränkte Zeit für den Einschluss der Abfälle.

Beim HAA-Tiefenlager werden die hochradioaktiven Abfälle in massiven Endlagerbehältern eingeschlossen, die ihrerseits vollständig eingeschlossen sind von Bentonitgranulat. Die Lagerstollen des HAA-Tiefenlagers sollen nach dem Nagra-Sicherheitskonzept erst kurz vor der Einlagerung der Abfälle aufgefahren werden, so dass sie nur eine relativ kurze Zeit in der Größenordnung von ca. zwei Jahren offen stehen. Sie weisen außerdem einen relativ geringen Querschnitt (Durchmesser 2,5 m) auf. Dabei soll die Kontursicherung lediglich mit Anker und Verzugsmatten erfolgen und auf einen Ausbau mit stabilisierendem Spritzbeton verzichtet werden, um eine nachteilige Veränderung z.B. des geochemischen Milieus im Nahbereich der Abfälle zu vermeiden. Die untertägigen HAA-Lagerstollen werden nach dem Einbringen der Endlagerbehälter an beiden Enden versiegelt<sup>4</sup>. Die ebenfalls im HAA-Tiefenlager einzubringenden langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) werden in Endlager-

---

<sup>4</sup> Mit dem Begriff Versiegelung werden ganz allgemein untertägige Abdichtungen wie z.B. Schacht- und Streckenverschlüsse bezeichnet, die den menschlichen Zutritt zu den Abfällen verhindern, die mechanische Stabilität der untertägigen Strukturen sicherstellen, kontrollierte hydraulische Bedingungen schaffen und die geochemische Eigenschaften aufweisen, die mit dem Wirtsgestein als auch anderen technischen Barrieren kompatibel sind.

behältern, welche entweder die Abfallgebinde oder direkt die einzulagernden Abfälle enthalten, verpackt und mit Zementmörtel verfüllt. Die mit Beton ausgekleideten, horizontalen LMA-Einlagerungstunnel werden mit Zementmörtel verfüllt und anschließend versiegelt.

Im SMA-Tiefenlager sind die Lagerkavernen mit Beton ausgekleidet. Darin werden die Abfallgebinde mit den mehrheitlich in einer Zementmatrix konditionierten Rohabfällen eingelagert und die Hohlräume mit Zementmörtel aufgefüllt. Die Lagerkavernen sowie Schlüsselstellen entlang der untertägigen Verbindungs- und Zugangstunnel werden durch spezifische Bauwerke hydraulisch versiegelt.

Ergänzt wird das System durch eine Versiegelung der Schächte bzw. der Zugangsrampe oder Zugangstunnel, durch die der Zutritt von Wässern in die Hohlräume des Endlagerbergwerks ver- bzw. stark behindert werden soll. Ein wichtiger Aspekt des Sicherheits- und Barrierenkonzeptes ist die Wartungsfreiheit des Gesamtsystems.

Aus Sicht der ESchT erfüllen die Barrieren- und Sicherheitskonzepte die gesetzlichen Vorgaben und Richtlinien der Schweiz (ENSI 2009). Sie entsprechen auch den international üblichen Vorgehensweisen und bestehen aus verschiedenen Elementen, die jeweils einen Beitrag zur Langzeitsicherheit der Tiefenlager leisten.

### *Rückholung*

Nach der Schweizer Kernenergieverordnung (KEV 2004) ist ein geologisches Tiefenlager so auszulegen, dass Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Tiefenlagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen und die Langzeitsicherheit gewährleistet ist. Dabei sind die Lagerkavernen und -stollen so zu verfüllen, dass eine Rückholung der Abfälle ohne großen Aufwand möglich ist, wobei der tatsächliche Aufwand von der geologischen Situation und dem Wirtsgestein abhängt.

Beim SMA-Tiefenlager erfordert die Berücksichtigung der Forderung nach einer vereinfachten Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle ein technisches Konzept mit höherem Flächenbedarf als früher vorgesehen. So werden nunmehr die Abfallgebinde nicht direkt, sondern in Endlagerbehältern verpackt eingelagert, was dazu führt, dass die Abfallgebinde im Mittel einen größeren Abstand voneinander aufweisen.

Spezielle Maßnahmen im HAA-Tiefenlager, die darauf ausgerichtet sind, eine spätere Rückholung der Abfälle zu erleichtern, sind nicht konkretisiert bzw. nicht vorgesehen. Während der Betriebszeit des HAA-Tiefenlagers werden im Pilotlager spezielle Messungen durchgeführt, um das Systemverhalten zu überwachen und zu prüfen, ob es den Erwartungen, die dem Sicherheitskonzept zu Grunde liegen, entspricht. In dieser Zeit wird nach dem Nagra-Konzept davon ausgegangen, dass eine Rückholung der Abfälle prinzipiell möglich ist. Der technische Aufwand für die Rückholung wird beim Standortauswahlverfahren von der Nagra nicht explizit berücksichtigt, sondern ohne nähere Ausführungen indirekt durch zwei Indikatoren der Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – in die Bewertung einbezogen.

Die ESchT hält die indirekte Berücksichtigung des Aspektes Rückholung der Abfälle durch die Nagra für angemessen. Die ESchT geht davon aus, dass eine Rückholung von eingelagerten Abfällen grundsätzlich technisch möglich ist, wenn auch gegebenenfalls mit erheblichem Aufwand. Die ESchT unterstreicht, dass Maßnahmen, die eine Rückholung erleichtern, keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben dürfen.

Für SMA-Tiefenlager kann den Aussagen der Nagra zur Rückholbarkeit der Abfälle während der Betriebszeit des Tiefenlagers gefolgt werden. Der Betonausbau der Lagerkavernen sollte einen relativ einfachen Zugang zu den Kavernen über einen langen Zeitraum ermöglichen. Nach Einschätzung der ESchT ist allerdings fraglich, ob beim HAA-Tiefenlager mit dem vorgesehenen Ausbaukonzept für die Lagerstollen ohne stützenden Ausbau eine Rückholung der Abfälle ohne großen Aufwand möglich ist.

#### *Festlegung der Indikatoren und Bewertungsskalen*

Der SGT (SGT 2008, Anhang 1, Tab. A1-14) legt über einen Katalog von 13 Kriterien die während der Einengungsprozedur maßgebenden Faktoren fest, mit denen die Sicherheit und technische Machbarkeit eines Endlagers in einem potenziellen Standortgebiet bewertet werden sollen. Die Kriterien wurden zu Kriteriengruppen zusammengefasst, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

**Tabelle 1:** Kriteriengruppen und Kriterien nach (SGT 2008)

Kriteriengruppe	Kriterien
1 Eigenschaften des Wirtsgesteins bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2 Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4 Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

In der Beschreibung der Kriterien sind im SGT jeweils die wesentlichen zu beurteilenden Aspekte sowie die Relevanz der Kriterien für die Sicherheit erläutert. Weiterhin sind die Kriterien den drei Schritten der Einengungsprozedur zugeordnet und jeweils die relevanten Indikatoren benannt.

Die Nagra folgt in der Umsetzung den Vorgaben des SGT. Sie hat insgesamt 49 Indikatoren in die Einengungsprozedur übernommen und entsprechend der Vorgaben diese bis auf einzelne Modifikationen auf die Kriterien während der einzelnen Einengungsschritte angewendet. Die Indikatoren sind bestimmten Kriterien zugeordnet, wobei manche Indikatoren auch für mehrere Kriterien relevant sind. Indikatoren sind die Beurteilungsgrößen für die Einengung, sie dienen der Bewertung der Varianten<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Gemäß Nagra (2008a) umfasst der Begriff „Variante“ die „geologisch-tektonischen Grossräume, die Wirtsgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche und die Konfigurationen (Bereiche bzw. geologische Standortgebiete)“ (S. 28/Fußnote 22)

Einzelne Indikatoren und Kriterien werden bei mehreren der Schritte 3 bis 5 verwendet. Dies ist in der Tabelle 3 im Anhang B dargestellt. Abweichungen von den Vorgaben des SGT ergaben sich durch den Einsatz zusätzlicher Indikatoren bei der Überprüfung einer Variante oder die Verwendung eines Indikators bei einem anderen Schritt. Dies wurde von der Nagra dargestellt und begründet (Nagra 2008a, Seite 45ff sowie Tab. 2.5-2).

Nach Einschätzung der ESchT sind die Indikatoren, wie sie im SGT vorgeschlagen und von der Nagra übernommen wurden, in den gewählten Kombination prinzipiell geeignet, die Kriterien zu überprüfen und zu bewerten, mit denen die potenziellen Standortgebiete identifiziert wurden. Einzeln, in Kombination und insgesamt werden mit den 49 gewählten Indikatoren die für die Beurteilung wesentlichen geowissenschaftlichen, bautechnischen und sicherheitsrelevanten Aspekte abgefragt. Aus Sicht der ESchT sind die Begründungen für einzelne Modifikationen bei der Verwendung von Indikatoren nachvollziehbar und haben keine abweichende inhaltliche oder fachliche Beurteilung zur Folge.

Die Indikatoren dienen in dem dreistufigen Einengungsverfahren der Bewertung der Kriterien und damit verbunden folglich der Bewertung der betrachteten Varianten. Entsprechend der Vorgaben des SGT unterscheidet die Nagra zwischen quantitativen Anforderungen, die für die Sicherheit unabdingbar sind (Mindestanforderungen, MA), und Anforderungen, die für die Charakterisierung und abschließende Bewertung herangezogen werden (Bewertungsskalen, BS). Zusätzlich zu den Vorgaben des SGT hat die Nagra verschärfte Anforderungen (VA) für Indikatoren eingeführt, die ihrer Meinung nach einen ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit haben. Verschärfte Anforderungen gehen über die Mindestanforderungen hinaus. Bestimmte Indikatoren kommen demzufolge mehrfach, also bei MA, VA und/oder BS, zur Anwendung. Für jeden Schritt der Einengungsprozedur hat die Nagra Indikatoren definiert, an die Mindestanforderungen (MA) zu stellen sind und solche, die der Bewertung dienen (s. Tabelle 4, Anhang C).

Mindestanforderungen und verschärfte Anforderungen führen direkt zur Einengung der zu betrachtenden Varianten. Anhand der Mindestanforderungen werden zunächst Varianten ausgeschlossen bzw. als potenziell möglich eingestuft. In Schritt 4 und 5 wird anschließend über die verschärften Anforderungen in bevorzugte und zurückgestellte Varianten unterschieden.

In allen drei Schritten der Einengungsprozedur werden zur Bewertung der jeweils betrachteten Varianten den Indikatoren Noten zwischen 1 und 4 zugeordnet, die einer

mehrstufigen qualitativen Skala von „ungünstig“ bis „sehr günstig“ entsprechen. Im Schritt 5 dienen die Noten schließlich der Charakterisierung und Bewertung der verbleibenden Varianten und ermöglichen damit deren Reihung. Die Noten der Indikatoren werden hier entsprechend ihrer Zuordnung zu den Kriterien über die Kriteriengruppen gemittelt. Indikatoren, die für mehrere Kriterien herangezogen werden, gehen dabei (mit einer Ausnahme) nur einmal in die Aggregation ein. Die Gesamtbewertung einer Konfiguration ergibt sich aus den Mittelwerten der Noten der Kriteriengruppen. Bei der Evaluation der Konfigurationen und Festlegung von Standortgebieten erfolgt die Gesamtbewertung anhand einer vierstufigen qualitativen Einstufung („weniger geeignet“, „bedingt geeignet“, „geeignet“, „sehr geeignet“).

Aus Sicht der ESchT erfüllt die Nagra mit der Festlegung der Indikatoren mit Mindestanforderungen die Anforderungen und Zielvorgaben des SGT zur Bewertung der das Wirtsgestein und die Geosphäre betreffenden sicherheitsrelevanten Aspekte. Die verschärften Anforderungen dienen als weiteres Einengungswerkzeug um sicherzustellen, dass die resultierenden Varianten sich auch in der nächsten Etappe als geeignet erweisen und einen vergleichbaren Qualitätsstand besitzen. Die abschließend zum Einsatz kommende quantitative vierstufige Bewertungsskala folgt den Vorgaben des SGT. Die in jedem der drei Schritte durchgeführte Bewertung geht über die Maßgaben des SGT hinaus, erlaubt jedoch eine differenzierte Darstellung der betrachteten Varianten und der Aspekte, die zur Konfiguration führen.

Die Indikatoren lassen sich aus Sicht der ESchT verschiedenen Kategorien zuordnen:

- Indikatoren, die sich mit Maßstäben quantitativ bewerten lassen. Beispiel für diese Klasse von Indikatoren sind *Tiefenlage unter Terrain bezogen auf flächenhafte Erosion*, *Mächtigkeit* oder ggf. *Hydraulische Leitfähigkeit*.
- Indikatoren, die mit quantitativen Maßstäben bewertbar wären, für die aber oft keine Daten vorliegen oder Daten erst in Etappe 2 erhoben werden. Diese Indikatoren werden durch andere Indikatoren oder Parameter beschrieben. So wird beispielsweise der Indikator *Hydraulische Leitfähigkeit* durch den Indikator *Tongehalt* beschrieben, sofern keine Daten vorliegen; oder der Indikator *mikrobielle Prozesse* wird ersatzweise über den Indikator *Porenraum* beschrieben.
- Indikatoren, die nach Ermessen basierend auf geowissenschaftliches Fachwissen bewertet werden (z.B. *Charakterisierbarkeit der Gesteine*, *Tektonisches Regime*)

Diese unterschiedliche Klassifikation der Indikatoren ist aufgrund ihrer spezifischen Eigenheiten nicht vermeidbar und teilweise in der Datenlage begründet.

Die ESchT hat die Darstellung und Bewertung der verschiedenen Indikatoren aus den unterschiedlichen geowissenschaftlichen Fachgebieten überprüft. In Nagra (2008c, Anhang A) werden ergänzend zu Nagra (2008a) die Indikatoren in einheitlicher Form ausführlich abgehandelt.

Insgesamt bewertet die ESchT die Zuordnung, den Einsatz und die Bewertungsmaßstäbe der Indikatoren als geeignet, die dreistufige Evaluation zur Auswahl von potenziell geeigneten Standortgebieten durchzuführen. In der Regel erfolgen eine umfassende und richtige Darstellung sowie die Aufstellung einer sinnvollen Bewertungsskala für die Indikatoren, die eine Quantifizierung erlauben. Die Darstellung der Indikatoren und die Diskussion der einzelnen Varianten erfolgt auf der Grundlage einer fachlichen Argumentation der Nagra. Die Bewertungen wurden von der Nagra mit fundiertem geowissenschaftlichen Sachverstand und einer im Grundsatz logischen und nachvollziehbaren Struktur durchgeführt.

Allerdings gibt es einige Kritikpunkte bezüglich der klareren Nachvollziehbarkeit und Verdeutlichung bestimmter Zusammenhänge:

- Die Würdigung der unterschiedlichen Qualität der Indikatoren hätte die Bewertung leichter nachvollziehbar gemacht. Aus Sicht der ESchT ist die Ableitung der Bewertungsskalen für Indikatoren, die nach Ermessen basierend auf geowissenschaftliches Fachwissen bewertet werden, nicht immer ausreichend erläutert.
- Für einzelne Indikatoren gibt es verschiedene Methoden der Quantifizierung. Hier wird teilweise eine klare Darstellung der eingesetzten Methoden vermisst. Beispielsweise findet sich die relevante Aussage für den Indikator *Tongehalt* nur in einer Fußnote in Nagra (2008b, S. 88). Ebenfalls wäre es aus Sicht der ESchT wünschenswert gewesen, die Datenbasis für die einzelnen Indikatoren tabellarisch darzustellen.
- Die ESchT vermisst die Erläuterung, wie und warum Abstufungen der Bewertungen innerhalb einer Einstufungsklasse (z.B. „sehr günstig“) mit Zahlenwerten zwischen 3,6 und 4,0 vorgenommen werden. Zudem ist unklar, warum manche Indikatoren mit Dezimalstellen bewertet werden und andere nicht.
- Bei den Indikatoren der Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – ist die ESchT der Meinung, dass die verwendete Bewertungsskala für das Wirtsgestein Opalinuston

insgesamt zu positiv ist. Dies gilt insbesondere für den Indikator *Gesteinsfestigkeit*. So berücksichtigt der für die einaxiale Druckfestigkeit von Opalinuston angegebene Wert nicht den festigkeitsreduzierenden Einfluss des Schichtungsgefüges. Bei Beachtung dieses Effektes ließe die repräsentative Gesteinsfestigkeit eher nur die Einstufung „bedingt günstig“ zu. Weitere Erläuterungen zur Bewertung der Indikatorwerte der Kriteriengruppe 4 für das Wirtsgestein Opalinuston sind im Anhang A ausführlich dargelegt.

Zusammenfassend kommt die ESchT zum Ergebnis, dass mit den beschriebenen Einschränkungen die verwendeten Indikatoren insgesamt in ihrer wissenschaftlichen Bedeutung umfassend dargestellt und mit angemessenen Bewertungsskalen hinterlegt sind. Die Ausgestaltung der Indikatoren durch die Nagra erfolgt nach geowissenschaftlichen Regeln und Wissensstand. Allerdings sind die Anforderungen an die Transparenz der Zuordnung der Bewertungsskalen zu den einzelnen Indikatoren nicht durchgängig als erfüllt anzusehen. Einzelne Indikatoren werden diesbezüglich im folgenden Kapitel diskutiert.

## **VI. Bewertung der Schritte 3 bis 5 der Etappe 1**

### *Wesentliche Aspekte des Einengungsverfahrens*

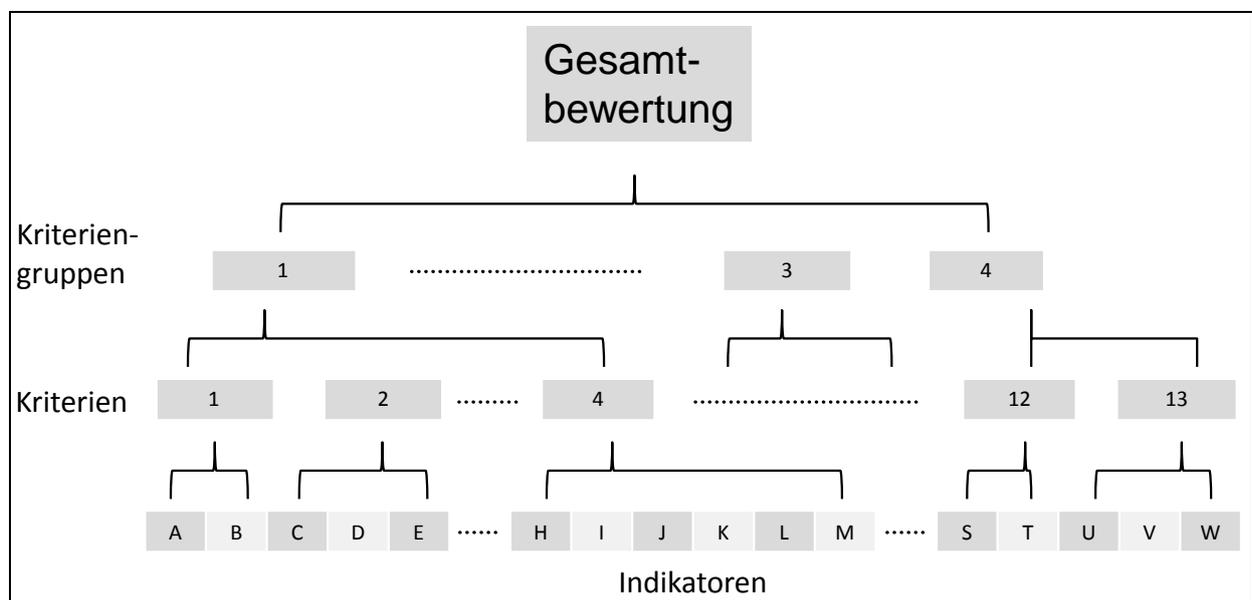
In den drei Schritten der Einengungsprozedur werden sicherheitsrelevante Aspekte entsprechend der vier Kriteriengruppen betrachtet. Hierbei sind gemäß den Vorgaben des SGT bestimmte Kriterien im Verfahren mehrfach von Relevanz. Gleiches gilt für bestimmte Indikatoren bezüglich verschiedener Kriterien. Dadurch werden einzelne Indikatoren mehrfach zur Bewertung herangezogen.

Die Bewertung der Großräume in Schritt 3 der Etappe 1 erfolgt mit jeweils spezifischen Mindestanforderungen und Bewertungsskalen für das HAA- und das SMA-Tiefenlager. Großräume, die die Mindestanforderungen nicht erfüllen, erhalten die Bewertung „ungenügend“ und werden beim weiteren Verfahren nicht mehr berücksichtigt.

Die Bewertung der Wirtsgesteine in Schritt 4 erfolgt über MA und VA, für die spezifische Werte für das HAA- und das SMA-Tiefenlager definiert werden. Die im Verfahren verbleibenden Wirtsgesteine werden auf dieser Basis identifiziert. Zwar werden in Schritt 4 auch BS formuliert, diese kommen aber erst in Schritt 5 zur Anwendung.

Die quantitative Bewertung der Konfigurationen in Schritt 5 erfolgt über eine Notenskala der Indikatoren von 1 bis 4, wobei teilweise eine Dezimalstelle angegeben wird. Die Gesamtnote für eine Variante ergibt sich aus einer hierarchischen arithmetischen Mittelwertbildung: Aus den Zahlenwerten der bewerteten Indikatoren ergeben sich die Mittelwerte der Kriterien, die zur Benotung der Kriteriengruppen gemittelt werden, woraus abschließend die Gesamtnote ermittelt wird. In jeder Stufe werden die auf eine Dezimalstelle gerundeten Mittelwerte für die Mittelwertbildung auf der nächsthöheren Stufe verwendet. Die Vorgehensweise ist in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt.

**Abbildung 1:** Schema der Gesamtbewertung durch hierarchische arithmetische Mittelwertbildung



In Nagra (2008a) wird in den Kapiteln 3 bis 5 für die Schritte der Einengungsprozedur die Bewertung der Indikatoren für jede Variante nachvollziehbar formuliert. Aus Sicht der ESchT wäre eine zusätzliche Darstellung, wie jeder dieser Indikatoren in die Bewertungsskala überführt wurde, hilfreich gewesen. Beispielsweise hätte eine Matrix, in der die Varianten den Indikatoren gegenüber gestellt würden und jeweils die Datenbasis und die Art der Bewertung (z.B. entsprechend der oben vorgeschlagenen Klassifikation) dargestellt würden, die Qualität des Einengungsprozesses wesentlich nachvollziehbarer belegen können.

*Identifizierung geeigneter Großräume (Schritt 3 der Etappe 1)*

Die Nagra hat zunächst die Schweiz aufgrund geowissenschaftlicher Erkenntnisse in die geologisch-tektonischen Großräume

- Alpen,
- Westliches Molassebecken,
- Zentrales Molassebecken,
- Östliches Molassebecken,
- Westliche Subjurassische Zone,
- Östliche Subjurassische Zone,
- Faltenjura,
- Westlicher Tafeljura und
- Östlicher Tafeljura

gegliedert.

Es ist festzustellen, dass diese Gliederung im Wesentlichen auf den amtlichen geologisch-tektonischen Karten der Schweiz beruht. Die ESchT hält diese Gliederung auf Basis der vorliegenden Beschreibungen und den Kenntnissen über die geodynamische Situation in der Schweiz für angemessen. Die definierten Großräume erscheinen auf Grund ihrer Ausdehnung und geowissenschaftlichen Charakteristika sinnvoll für den Einengungszweck.

Die Identifizierung der für das HAA- und SMA-Tiefenlager jeweils weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Großräume erfolgt auf Basis von fünf Kriterien (Kriterien 1.1, 2.1, 2.2, 3.2 und 3.3), die primär die Langzeitstabilität der Großräume, ihre geodynamischen Prozesse sowie ihre geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit betreffen. Für fünf Indikatoren sind Mindestanforderungen formuliert. Die anschließende Bewertung der Großräume mit Hilfe von Bewertungsskalen erfolgt mit zwei weiteren, also insgesamt sieben Indikatoren. Aspekte der bautechnischen Machbarkeit, d.h. der Kriteriengruppe 4, spielen bei diesem Einengungsschritt keine Rolle.

Bei der Auswahl von Standortgebieten für das SMA-Tiefenlager werden alle geologisch-tektonischen Großräume der Schweiz betrachtet. Trotz erheblicher Unterschiede in ihrem

geologischen Aufbau und ihrer Explorierbarkeit gibt es für die Nagra keinen zwingenden Grund, einen Großraum auszuschließen. Dieses betrifft auch Regionen, in denen die Seismizität erhöht ist. Anhand des vorhandenen Erdbebenkatalogs der Schweiz allein können in Anbetracht der geringen Deformationsraten und der damit verbundenen relativ geringen Wiederkehrzeiten von Erdbeben, keine zuverlässigen Aussagen über die zukünftige Erdbebenaktivität gemacht werden. Daraus folgt, dass in Zukunft auch Gebiete bzw. Störungen aktiv sein werden, für welche die vorhandenen Daten keine Aktivität anzeigen (Nagra 2008b). An den Indikator *Seismizität* wird keine Mindestanforderung gestellt, weil das Merkmal auf der Stufe Großraum für die geologischen Verhältnisse der Schweiz nicht direkt anwendbar ist (Nagra 2008a).

Diese Vorgehensweise unterscheidet sich vom Verfahren des AkEnd dahingehend, dass Zonen mit erhöhter seismischer Aktivität (DIN 4149; Erdbebenzone 2) nicht von vornherein als Standortgebiete ausgeschlossen werden. Dieser Ausschluss erfolgt im Schweizer Verfahren in Schritt 5 der Einengungsprozedur. Hier wird die Seismizität insofern berücksichtigt, dass um regionale Störzonen ein Sicherheitsabstand eingehalten wird. Ferner werden diffus gestörte und konzeptionell zu meidende Zonen (Neotektonik) bei der Betrachtung der „verschärften Anforderungen an bevorzugte Bereiche“ ausgeschlossen.

Diese Vorgehensweise führt im Ergebnis dazu, dass alle für ein SMA-Lager bevorzugten Bereiche in der Nordschweiz außerhalb der Zonen mit erhöhter Erdbebenaktivität liegen. Die Bewertung der geologisch-tektonischen Situation erfolgt in Schritt 5 anhand der Indikatoren

- *Kontinuität der interessierenden Schichten,*
- *großräumige Erosion im Betrachtungszeitraum,*
- *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik,*
- *Seismizität* und
- *seltene geologische Ereignisse* wie Vulkanismus.

Im Ergebnis führen das von der Nagra verwendete und das AkEnd-Verfahren dazu, dass Regionen mit erhöhter Seismizität ausgeschlossen werden.

Das gesamte Molassebecken, die östliche subjurassische Zone sowie der östliche Tafeljura werden für ein SMA-Lager mit „günstig bis sehr günstig“ bewertet, die übrigen

Großräume werden als „ungünstig bis bedingt günstig“ klassifiziert. Die ESchT hält diese Bewertungen für sachgerecht.

In Bezug auf mögliche Großräume für ein HAA-Tiefenlager kommt die Nagra zu dem Ergebnis, dass nur der Tafeljura und das östliche Molassebecken dem Bewertungsbereich „günstig bis sehr günstig“ und die östliche subjurassische Zone und das westliche Molassebecken dem Bewertungsbereich „ungünstig bis bedingt günstig“ zuzuordnen sind und damit in der weiteren Einengungsprozedur berücksichtigt werden müssen. Die ESchT hat diese Einstufungen überprüft und kommt zu folgenden Aussagen:

- Die Alpen bzw. der Alpenraum hebt sich heute mit bis zu 1,5 mm/a. Vertikalbewegungen sind ein Ausdruck geodynamischer Aktivität und damit potenzieller Gefährdung für ein Tiefenlager. Nach AkEnd (2002) gelten Gebiete mit großräumigen natürlichen Hebungen von mehr als 1 mm/a bezogen auf einen Nachweiszeitraum für die Langzeitsicherheit in der Größenordnung von einer Millionen Jahre als ungünstig für die Auswahl eines Standortes. Der Ausschluss des Großraums Alpen für einen potenziellen Standort für ein HAA-Tiefenlager kann daher nachvollzogen werden.
- Das westliche Molassebecken ist aufgrund der starken Zergliederung unter Einfluss der Rheingrabentektonik vom zentralen und östlichen Molassebecken abgetrennt. Als aktive Störungen werden im Allgemeinen Störungen mit Bewegungen im neotektonischen Zeitabschnitt bezeichnet. Nach AkEnd (2002) sind als neotektonische „aktive Störungen“ mit Sicherheitsrelevanz für ein Endlager alle Verwerfungen anzusehen, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel (vor ca. 30 Mio. Jahre) bis heute Bewegungen stattgefunden haben. Diese Aussage betrifft das westliche Molassebecken. Dem Ausschluss als Großraum kann daher zugestimmt werden.
- Das zentrale und das östliche Molassebecken liegen außerhalb des rheinischen Störungsmusters in der südlichen Verlängerung des Oberrheingrabens und wurden vom alpinen Fernschub nur schwach erfasst. Hier liegen relativ ruhige Lagerungsverhältnisse vor. Die Einstufung des Großraums als „günstig“ ist nachvollziehbar.
- Die westliche subjurassische Zone scheidet auch aus Sicht der ESchT trotz ihrer Langzeitstabilität als Großraum aus, weil hier ebenfalls tektonisch komplex zergliederte Räume oder Neotektonik vorliegen.
- Die Bewertung der östlichen subjurassischen Zone lässt sich aufgrund der ruhigen Lagerungsverhältnisse und der Langzeitsicherheit nachvollziehen.

- Der Faltenjura ist durch Faltenbau und Überschiebungen tektonisch zergliedert. Längerfristige erhöhte Deformationen und lokal erhöhte Hebungsraten sind über den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre nicht ausgeschlossen. Der Ausschluss des Großraums Faltenjura kann nachvollzogen werden.
- Der westliche Tafeljura liegt im Einflussbereich der Rhein-Bresse-Transferzone und enthält zudem eine Zone mit erhöhter seismischer Aktivität. Der Ausschluss des Großraums ist sinnvoll.
- Die günstige Bewertung des östlichen Tafeljura lässt sich aufgrund der ruhigen Lagerungsverhältnisse und zu erwartenden Langzeitstabilität nachvollziehen.

Die ESchT teilt die Bewertungen der Nagra bzgl. der geologisch-tektonischen Großräume für ein HAA-Tiefenlager.

#### *Evaluation der Wirtsgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (Schritt 4 der Etappe 1)*

Innerhalb der in Schritt 3 für SMA- bzw. HAA-Tiefenlager als „geeignet“ definierten geotektonischen Großräume hat die Nagra die potenziellen Wirtsgesteine identifiziert und bewertet. Hierzu wurde für 27 typische Gebiete ein jeweils repräsentatives geologisches Profil („Sammelprofil“) aufgestellt. Diese 27 Standardprofile sollen somit das lithologische Inventar der jeweiligen Großräume repräsentativ abbilden. Die lithologischen Einheiten dieser Standardprofile wurden entsprechend den sicherheitlichen und bautechnischen Anforderungen qualitativ-quantitativ in ihren Eigenschaften charakterisiert. Daraus wurden dann die jeweils für die Tiefenlagerung als geeignet erscheinenden Wirtsgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche herausgefiltert. Dazu wurden zunächst zehn Indikatoren mit Mindestanforderungen definiert, um potenziell mögliche Wirtsgesteine zu identifizieren. Wichtige Aspekte waren dabei eine Mindestmächtigkeit von 100 m in geeigneter Tiefenlage und eine geringe hydraulische Durchlässigkeit sowie ein geringes Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten. Dies führt zu einer Auswahl von 24 Sedimentgesteinen und zwei Kristallingesteinen. Anschließend wurden durch verschärfte Anforderungen von zwei (SMA) bzw. drei Indikatoren (HAA) acht „potenziell mögliche“ und vier „bevorzugte“ Wirtsgesteine für SMA-Lager sowie sechs „potenziell mögliche“ und ein „bevorzugtes“ Wirtsgestein für HAA-Lager definiert. Danach wurden die „bevorzugten“ Wirtsgesteine für SMA-Lager und HAA-Lager anhand von 22 Indikatoren bewertet.

Als unter diesen Aspekten bevorzugte und damit grundsätzlich als geeignet eingeschätzte geologische Wirtsgesteine werden für die beiden Tiefenlagerarten folgende Gesteinsformationen in dem jeweilig zugehörigen geotektonischen Großraum von der Nagra angesehen:

(a) HAA-Endlager (verschärfte Anforderungen)

Opalinuston / östlicher Tafeljura (Bözberg, Nördlich Lägeren, Zürcher Weinland)

(b) SMA-Endlager

Opalinuston / östlicher Tafeljura (Bözberg, Nördlich Lägeren, Südranden, Zürcher Weinland)

Opalinuston / östliche subjurassische Zone (Jurasüdfuss)

Brauner Dogger / östlicher Tafeljura (Nördlich Lägeren, Zürcher Weinland)

Effinger Schichten / östliche subjurassische Zone (Jurasüdfuss)

Helvetische Mergel / Alpen (Wellenberg)

Aus der Sicht der ESchT ist die von der Nagra vorgenommene Festlegung auf die genannten bevorzugten Wirtsgesteine im Ergebnis nachvollziehbar. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Kenntnisse und Bewertungen erscheint der Opalinuston aufgrund seiner lithologischen Eigenschaften als das am besten geeignete Wirtsgestein im geologischen Inventar der Schweiz. Die weiteren für ein SMA-Lager ausgewählten Gesteine (Brauner Dogger, Effinger Schichten, Helvetische Mergel) sind insbesondere aufgrund des geringeren sicherheitsrelevanten Zeitraums eines SMA-Lagers ebenfalls als potenziell geeignete Wirtsgesteine anzusehen.

Die bei der schrittweisen Einengung verwendeten Indikatoren erscheinen sinnvoll und entsprechen den Vorgaben des SGT. Allerdings erhält der Indikator *Tongehalt* teilweise ein sehr hohes Gewicht. Er wird einerseits als eigenständiger Indikator verwendet und anderenfalls für den Fall, dass ungenügende Datensätze für die Indikatoren *Hydraulische Durchlässigkeit* und *Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade* vorliegen, eingesetzt. Weiterhin spielt er bei der Bewertung des Indikators *Selbstabdichtungsvermögen* indirekt eine große Rolle. Insbesondere bei geringen Tongehalten scheint die Verknüpfung zum Indikator *Hydraulische Durchlässigkeit* problematisch. Aus der Sicht der ESchT ist das Ergebnis der Einengung insgesamt jedoch schlüssig. Grundsätzlich andere Ergebnisse sind auch bei einer anderen Gewichtung des Indikators *Tongehalt* nicht zu erwarten.

Bei der vorgenommenen Auswahl- und Bewertungsprozedur scheiden andere, bisher auch diskutierte Wirtsgesteine aus. Hierzu gehören die Kristallingesteine der Nordschweiz im Grenzgebiet zu Deutschland und Tongesteine der Molasse. Das Kristallingestein Granit verfügt zwar über ausgezeichnete Dichtigkeits- und Festigkeitseigenschaften, dies trifft jedoch nur auf homogene, ungestörte Gesteinskörper zu. Kristallingesteine verfügen im Gegensatz zu Tonsteinen über kein Selbstheilungsvermögen. Bei Tunnelbauten innerhalb der Schweiz hat sich gezeigt, dass auch größere kristalline Gesteinskörper tektonisch beansprucht und wasserdurchlässig sind. Ungestörte Gesteinskörper in der Größenordnung, die ein Tiefenlager erfordert, sind nach den dargelegten Kenntnissen und Bewertungen hinsichtlich Lage und Ausdehnung nicht zu erwarten bzw. nicht mit der erforderlichen notwendigen Sicherheit vorauszusagen. Die Tonsteine der Unteren Süßwassermolasse (USM) verfügen über ähnliche lithologische Eigenschaften wie andere betrachtete Tongesteine. Aufgrund der sedimentologischen Bildungsbedingungen sind die Tonsteine der USM aber intensiv und kleinräumig mit Sandsteinlagen verzahnt. Die Sandsteinanteile stellen präferentielle Fließwege in den Sedimenten der USM dar. Ihr Auftreten und Verlauf kann a priori nur mit sehr großen Unsicherheiten prognostiziert werden. Auch aus der Sicht der ESchT erfüllen die Kristallingesteine der Nordschweiz und die Tonsteine der USM daher die Anforderungen an eine großräumig gesehen geringe Gebirgsdurchlässigkeit nicht.

#### *Identifizierung potenzieller Standortgebiete (Schritt 5 der Etappe 1)*

Nach der Evaluation der Wirtsgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche verbleibt eine Anzahl von Konfigurationen im Verfahren. Die Auswahl der potenziellen Standortgebiete erfolgt schrittweise durch Identifizierung potenziell geeigneter Bereiche anhand von zwölf Indikatoren, für die Mindestanforderungen definiert werden, die Auswahl von bevorzugten Bereichen (Konfigurationen) durch Anwendung von sieben Indikatoren mit verschärften Anforderungen und deren Bewertung mit 43 Indikatoren. Dabei werden die Indikatoren aus den ersten beiden Schritten der Einengungsprozedur mit ihren Bewertungsskalen übernommen, wobei gegebenenfalls spezifische lokale Bedingungen berücksichtigt werden. Zusätzlich werden konfigurationsspezifische Indikatoren zur Bewertung herangezogen. Dieses Vorgehen entspricht den Vorgaben des SGT. Indikatoren, die mehrfach für die Bewertung herangezogen werden, gehen in die abschließende Bewertung nur einmal ein; sie werden bei dem Kriterium übernommen, dem sie nach Einschätzung der Nagra am ehesten zuzuordnen sind. Hiervon gibt es eine Ausnahme; der Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*, der bei den Kriterien *2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften* und *3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen* genannt

wird. Die Gesamtbewertung der Standortgebiete wird mit den Attributen „weniger geeignet“ bis „sehr geeignet“ klassifiziert.

In den geologisch-geotektonischen Großräumen östlicher Tafeljura und östliche subjurassische Zone werden von der Nagra vier Gebiete als „sehr geeignet“ bzw. „geeignet“ für ein HAA-Tiefenlager identifiziert, von denen zwei in einem Standortgebiet zusammengefasst worden sind. Das bei der Identifikation der Großräume als „günstig bis sehr günstig“ beurteilte Molassebecken ist aufgrund der Wirtsgesteinseigenschaften von der Nagra nicht mehr berücksichtigt worden. Insbesondere werden die verschärften Anforderungen an die Durchlässigkeit nicht erfüllt. Darüber hinaus ist die Homogenität des Gesteinsaufbaus nicht gegeben. In diesem Zusammenhang weist die ESchT darauf hin, dass auch in der Tonstudie der BGR, in der auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes in Deutschland Teilgebiete mit untersuchungswürdigen Tongesteinen als Endlager-wirtsgesteinsformationen ausgewiesen worden sind, die Molasse ebenfalls nicht berücksichtigt worden ist (BGR 2007).

In den geotektonischen Großräumen östlicher Tafeljura, Alpen und östliche subjurassische Zone werden für ein SMA-Tiefenlager zwölf Gebiete als grundsätzlich geeignet identifiziert. Nach der Anwendung der verschärften Anforderungen und der Bewertung aller Merkmale schlägt die Nagra sechs Standortgebiete vor.

Die Vorgehensweise zur Bewertung der Konfigurationen in Schritt 5 der Einengungsprozedur ist von besonderer Relevanz für das Ergebnis. Aus Sicht der ESchT fehlt hier eine Würdigung der statistischen Bedeutung einzelner Indikatoren. Die Gesamtbewertung für ein Standortgebiet resultiert aus dem Mittelwert der Einzelbewertungen der vier Kriterien-gruppen. Die Kriteriengruppen repräsentieren jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Kriterien (zwei, drei oder vier), aus denen ihre Bewertung gemittelt wurde. Die Kriterien wiederum stellen Mittelwerte unterschiedlicher Anzahl (zwei bis sechs) von Indikatoren dar (Nagra 2008a, Anhang C). Damit ergibt sich ein unterschiedliches statistisches Gewicht für die verschiedenen angewendeten Indikatoren (siehe auch Abbildung 1). Aus Sicht der ESchT sollte die Nagra darstellen, ob und inwieweit diesem Fakt eine Bedeutung für die Reihung der potenziellen Standortgebiete zukommt und ob diese Wertigkeit gewollt und berücksichtigt wurde.

**Tabelle 2:** Anzahl der Kriterien und Indikatoren in den einzelnen Kriteriengruppen

Kriteriengruppe	Anzahl der Kriterien	Anzahl der Indikatoren
1	4	16
2	4	16
3	3	7
4	2	4

Die Indikatoren der Kriteriengruppe 4, d.h. die Indikatoren zur Bewertung der bautechnischen Eignung, besitzen statistisch gesehen die relativ größte Bedeutung. Das statistische Gewicht, mit dem ein Indikator der Kriteriengruppe 4 in das Endergebnis für das betrachtete Standortgebiet eingeht, ist viermal höher als bei einem Indikator der Kriteriengruppen 1 oder 2 und ca. doppelt so hoch wie bei den Indikatoren der Kriteriengruppe 3.

Aus dieser Analyse wird deutlich, dass die Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – trotz einer explizit nicht vorgenommenen unterschiedlichen Gewichtung einzelner Kriteriengruppen, Kriterien oder Indikatoren dennoch implizit eine relativ hohe Gewichtung innerhalb des Verfahrens bei der Ausweisung der bevorzugten Wirtsgesteine und dann weiter der bevorzugten Standortgebiete erhält. Damit entsteht die Verpflichtung, den Kriterien und Indikatoren dieser Kriteriengruppe 4 im Rahmen einer kritischen Würdigung der Etappe 1 des Standortauswahlverfahrens eine besondere Aufmerksamkeit zu widmen (s. Anhang A). Dabei sind vordringlich zwei Sachverhalte zu prüfen:

- (1) Welchen Einfluss hat die Kriteriengruppe 4 mit ihren Kriterien und Indikatoren auf den Verlauf des Auswahlverfahrens hinsichtlich der Identifizierung von Standortgebieten?
- (2) Sind die Indikatoren sachgemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend operationalisiert (qualitativ und/oder quantitativ)?

Bei der Prüfung und Bewertung dieser Fragen ist grundsätzlich zu beachten, dass der Nagra Beurteilungsspielräume bei der Einschätzung von Sachverhalten zuzubilligen sind und in diesem Verfahrensschritt bezüglich der bautechnischen Machbarkeit keine Standsicherheitsnachweise zu führen sind. Dennoch muss unter den vorgegebenen Planungsrandbedingungen (Tiefenlagerkonzept einschließlich Sicherheitsbewertungen) aus bautechnischer und sicherheitlicher Sicht eine Realisierung der Tiefenlager unter den jeweiligen Standortgebietsbedingungen wahrscheinlich sein.

Von der ESchT wird eingeschätzt, dass bei den realistischerweise zu erwartenden felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustongebirges unter Berücksichtigung der geomechanischen Wirkung des Mineralkorngefüges und des Einflusses des Wassergehaltes eine bautechnische Machbarkeit eines HAA-Tiefenlagers beim derzeitig vorgesehenen Ausbaurkonzept bis in eine Teufe von ca. 550 – 600 m gegeben sein könnte. Dies könnte die räumliche Ausdehnung der ausgewiesenen Standortgebiete einschränken, wobei zu prüfen wäre, inwieweit die verbleibenden Standortgebietsflächen noch hinreichend Handlungsraum für die Positionierung eines HAA-Tiefenlagers aufweisen. Da nicht auszuschließen ist, dass in Gebirgsbereichen mit reduziertem Tragvermögen lokal bzw. zonal ein verstärkter Ausbau vorzusehen ist, wäre weiterhin zu prüfen, ob ein derartiges Tiefenlagerkonzept mit dem bisher geführten Langzeitsicherheitsnachweis noch kompatibel ist.

Alternativ könnte die bisherige Teufenlage von 900 m für das HAA-Tiefenlager beibehalten und das gegenwärtige Endlagerkonzept unter Einbeziehung anderer Ausbaurkonzepte mit einem deutlich verstärkten und flächenhaft wirkenden tragenden Ausbau (Verbundsystem Gebirge-Ausbaur) modifiziert werden. Hierbei wäre zu prüfen, ob Ausbaurkonzepte im Rahmen des bestehenden Langzeitsicherheitsnachweises entwickelt werden können oder ob der Langzeitsicherheitsnachweis zu ergänzen wäre. Die Änderung des Ausbaurkonzeptes könnte Einfluss haben auf langzeitsicherheitsrelevante Aspekte wie z.B. das geochemische Milieu, die Radionuklidfreisetzung, die Gasbildungsrate, das Quellverhalten von Bentonit und anstehendem Tongestein, die Wirkung des Quelldrucks auf das konturne Gebirge sowie die Rückbildung von technogen induzierten Wegsamkeiten in der Auflockerungszone.

Einen weiteren kritischen Punkt sieht die ESchT in der unklaren Bewertung bestimmter Indikatoren, hier seien zwei Beispiele genannt.

1. Die hydraulische Durchlässigkeit wird, falls keine Messwerte vorliegen, über den Tongehalt bewertet. „Der Tongehalt wird zusammen mit den Indikatoren *Hydraulische Durchlässigkeit* und *Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade* beurteilt“ (Nagra 08c, S. A1-82). Der Tongehalt wird weiterhin zur Bewertung des Indikators *Selbstabdichtungsvermögens* herangezogen, welches ihn als Indikator wiederum einschließt (Fußnote in Nagra 2008a, Tab. B-1).
2. Das Zusammenspiel der Indikatoren *Mineralogie*, *pH*, *Redox-Bedingungen*, *Salinität*, *Mikrobielle Prozesse* und *Kolloide* als geochemische Parameter hat gemeinsam Einfluss auf die Radionuklidrückhaltung.

Obwohl beide Beispiele aus wissenschaftlicher Sicht richtig behandelt wurden, fehlt die Würdigung der statistischen Absicherung der Sachverhalte bzw. der statistischen Datengrundlage:

Zu 1) Insgesamt ist die Häufigkeit des Auftretens des Indikators *Tongehalt* nur schwer nachvollziehbar, zumal er sich inhaltlich auch im Indikator *Mineralogie* wiederfindet. Auch aus Sicht der ESchT kommt dem Gehalt an quellfähigen Tonmineralen in sedimentären Wirtsgesteinen eine entscheidende Rolle für die Sicherheit der geologischen Barriere zu. Ebenso wird die Relevanz des Tongehalts für die genannten Indikatoren durch die Nagra korrekt eingeschätzt und der Einsatz des Tongehalts als „Stellvertreter“ erscheint prinzipiell gerechtfertigt. Allerdings kann aufgrund dieser Vorgehensweise der Zahlenwert der Bewertung des Tongehalts mehrfach in die Statistik eingehen, im Vergleich zu dem Fall, dass für jeden Indikator eigene spezifische Noten vorlägen. Obwohl aufgrund der qualitativen Zusammenhänge keine großen Unterschiede in der Bewertung zu erwarten sind, würde eine klare Darstellung für jede Variante, die verdeutlicht, wann der Originalindikator eingesetzt wurde und wann ein Stellvertreter benutzt werden musste, die Transparenz der Datenqualität wesentlich erhöhen.

Zu 2) Die genannten Indikatoren spielen tatsächlich zusammen. Dies wird richtigerweise zu einer inhaltlich zusammenhängenden Bewertung führen. Zudem wird der Indikator *Mikrobielle Prozesse* über die Größe und Qualität des Indikators *Poren* bewertet. Gleichzeitig wird dargestellt, dass der Indikator *Mikrobielle Prozesse* in ein komplexes System von Indikatoren eingebunden ist. Es fehlt die klare Darstellung der komplexen Zusammenhänge der genannten sechs Indikatoren und der Überführung in die spezifische Bewertung für jeden der Indikatoren.

Die ESchT erkennt trotz der kritischen fachlichen Anmerkungen zu Detailaspekten keinen nachhaltigen Einfluss auf das Ergebnis des Einengungsverfahrens mit den von der Nagra identifizierten Standortgebieten selbst. Die relative Zuordnung der in die Schritte 4 und 5 des Auswahlverfahrens einbezogenen bevorzugten Wirtsgesteine und der kriterien-gesteuert abgeleiteten bevorzugten Standortgebiete dürfte sich auch bei einer Überarbeitung des Standortauswahlverfahrens nicht wesentlich ändern.

Die ESchT kommt auf Grundlage der verfügbaren Informationen und ihrer hier dargelegten Bewertungen zu dem Ergebnis, dass die Nagra den Einengungsprozess für geeignete Standortgebiete für HAA-Tiefenlager und SMA-Tiefenlager sach- und verfahrensgerecht umgesetzt hat.

Die ESchT teilt die Bewertung der Nagra, dass Opalinuston das bevorzugte Wirtsgestein für ein HAA-Tiefenlager in der Schweiz ist. Aufgrund der Verbreitung und Tiefenlage des Opalinustons in der Schweiz sowie wegen seiner Lagerungsverhältnisse kommt damit nur ein eng umrissenes Gebiet in der Nähe der Grenze zu Deutschland für das HAA-Tiefenlager in Frage. Aus Sicht der ESchT sind im Rahmen des Verfahrens keine alternativen Standortgebiete für ein HAA-Tiefenlager erkennbar.

Die im Hinblick auf die Indikatoren der Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – angesprochenen einschränkenden Einschätzungen der Sachverhalte durch die ESchT ändern an dieser Aussage nichts, da sie grundsätzlich für alle im Wirtsgestein Opalinuston befindlichen HAA-Tiefenlager gelten. Die von der ESchT genannten Einschränkungen führen allenfalls dazu, dass die identifizierten Standortgebiete eine geringere räumliche Ausdehnung aufweisen, wobei wegen der nach Süden zunehmenden Tiefenlage des Opalinustons die Teile des Standortgebietes mit geeigneter Tiefenlage im nördlichen Bereich der jetzt von der Nagra ausgewiesenen potenziellen Standortgebiete liegen. Alternativ könnte bei Einlagerungstollen in größerer Tiefenlage ein stärkerer Ausbau vorgesehen werden.

Im Hinblick auf SMA-Tiefenlager ist nicht auszuschließen, dass in der Schweiz auch andere Standortgebiete möglich sind, die potenziell geeignet sind und in Frage kämen. Hierzu verweist die ESchT auf die Vorgaben des SGT, wonach die Einengungsprozedur in Etappe 1 schrittweise auf der aktuellen Datenlage zu erfolgen hat.

Beim SMA-Tiefenlager besitzt aus Sicht der ESchT die Gasbildung sicherheitstechnische Bedeutung. Dieser Aspekt muss angemessen in den nächsten Etappen des Standortauswahlprozesses berücksichtigt werden.

## **VII. Bewertung der Robustheit des Bewertungsverfahrens**

Die ESchT sieht das Vorgehen der Nagra bei der Einengungsprozedur in den Schritten 3 bis 5 der Etappe 1 als grundsätzlich den Vorgaben des SGT entsprechend an. Bei der Zuweisung von Bewertungen zu den Indikatoren besteht naturgemäß ein gewisser Beurteilungsspielraum. Da die Gesamtbewertung der potenziellen Standortgebiete durch hierarchisch arithmetische Mittelwertbildung der Bewertungen der Indikatoren eines Kriteriums, dann der Kriterienwerte einer Kriteriengruppe und anschließend der Bewertungen der vier Kriteriengruppen erfolgt, kann sich der Beurteilungsspielraum auf das Ergebnis der Einengungsprozedur auswirken. Daher hat die ESchT durch Variation bestimmter Indikator-

werte, bei denen sich eine Ab- bzw. Hochstufung aus geowissenschaftlicher Sicht begründen lässt, in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, ob derartige unterschiedliche Bewertungen der Indikatoren einen Einfluss auf das Ergebnis der Einengungsprozedur haben. Insbesondere die Indikatoren der Kriteriengruppe 4 zur bautechnischen Machbarkeit wurden in diesem Zusammenhang im Vergleich zum Vorgehen der Nagra mit schlechteren Noten bewertet (siehe Anhang A).

So hat beispielsweise ein Verzicht der feineren Abstufung innerhalb einer Notenstufe in den Bewertungsskalen keine nennenswerten Auswirkungen auf das Ergebnis des Einengungsprozesses. In der Reihung der potenziellen Standortgebiete für ein SMA-Tiefenlager ergeben sich kleinere Verschiebungen, ohne dass es zu anderen prinzipiellen Schlussfolgerungen als den von der Nagra gezogenen kommen würde.

Für die HAA-Tiefenlager ergeben sich keine Änderungen der Reihenfolge. Aus den schlechteren Bewertungen der Indikatoren der Kriteriengruppe 4 zur bautechnischen Machbarkeit resultieren zwangsläufig schlechtere Gesamtnoten für die jeweiligen potenziellen Standortgebiete. Allerdings ergab sich für alle vier potenziellen Standortgebiete immer noch als Gesamtbewertung die Einstufung „günstig“.

Auf Basis ihrer durchgeführten Sensitivitätsbetrachtungen kommt die ESchT zu dem Schluss, dass der Einengungs- und Bewertungsprozess ein robustes und belastbares Ergebnis liefert.

### **VIII. Umgang mit Datenungleichheiten**

Der ESchT ist bewusst, dass zu Anfang eines kriteriengesteuerten Standortauswahlverfahrens eine ungleiche Datenlage zu den verfahrensrelevanten geowissenschaftlichen und geotechnischen Sachverhalten vorliegt. So sind Sachverhalte in einigen Teilgebieten des Suchraumes auf der Grundlage von Erkundungsbefunden und spezieller Erfahrungen gut belegt, in anderen Teilgebieten aber nur ansatzweise oder auch gar nicht. Sie müssen daher auch nach allgemeiner Erfahrung und/oder Plausibilität eingeschätzt werden. Diese ungleiche Ausgangslage erscheint auf den ersten Blick die Verfahrensgerechtigkeit in Frage zu stellen, da mangelnde lokale/regionale Aufschlussbefunde einer zunächst realistischen und objektiven Charakterisierung und dann nachfolgend auch sachgerechten Bewertung der für die einzelnen Großräume bzw. Standortgebiete vorliegenden und verfahrensrelevanten Sachverhalte entgegen zu stehen scheinen.

Bei vertiefter Betrachtung dieser Ungleichheit ist allerdings festzustellen, dass für die Identifikation und Beschreibung der geologisch-tektonischen Großräume in Schritt 3 ein gut etabliertes geologisches Wissen besteht, das durch Untersuchungen der Nagra größtenteils bestätigt bzw. teilweise vertieft worden ist.

Bei der Evaluierung der Wirtsgesteine in Schritt 4 ist die Datenlage unterschiedlich. So ist z.B. der Kenntnisstand über die Eigenschaften des Opalinustons aufgrund der Forschungstätigkeiten im Nagra-Programm sehr hoch. Dagegen ist die Datengrundlage z.B. zur Tongesteinsabfolge Brauner Dogger eingeschränkt. Die hydrogeologischen Informationen stammen aus nur drei Bohrungen und es gibt keine Erfahrungen aus Untertagebauten. Ein umfassender und abgesicherter felsmechanischer Datensatz existiert nicht (Nagra 2008b).

In Schritt 4 hat die Nagra für die Identifikation und Bewertung der potenziellen Wirtsgesteine die Kriterien und die zugehörigen Indikatoren verwendet. In dem Verfahren werden die potenziellen Wirtsgesteine schrittweise anhand der Kriterien und Indikatoren eingeeengt. Als Grundlage für die Identifikation der zu evaluierenden sedimentären Gesteinsabfolgen hat die Nagra die Schweiz in Areale aufgeteilt, deren geologischen Aufbau durch repräsentative Gesteinsabfolgen charakterisiert und diesen in stratigraphischen Sammelprofilen dargestellt. Auf dieser Grundlage werden die potenziellen Wirtsgesteine in den weiter zu betrachtenden Großräumen bewertet (Schritt 5).

Die Bewertungen der Nagra basieren auf einer geologischen Charakterisierung aufgrund von Kartierungen und einem breiten Satz von Informationen und Daten aus zahlreichen Tiefbohrungen, aus seismischen Messkampagnen, aus den Felslaboren, aus Tunneln, von Forschungsarbeiten sowie Informationen und Erfahrungen zu vergleichbaren Wirtsgesteinen aus dem Ausland (Nagra 2008a). Die Auswertung der geowissenschaftlichen Daten und Informationen erfolgt mit international anerkannten und angewendeten wissenschaftlichen Methoden. Damit ist gewährleistet, dass die Bewertung nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführt wurde.

Innerhalb von Etappe 1 ist der Umgang der Nagra mit Datenungleichheiten nach Auffassung der ESchT konsequent und nachvollziehbar. Alle notwendigen relevanten geowissenschaftlichen Daten sind von der Nagra zur Verfügung gestellt bzw. die Datengrundlage für jedes potenziell mögliche Wirtsgestein dargestellt worden (Nagra 2008b). Es ist zu berücksichtigen, dass die geologischen Kenntnisse in späteren Etappen von der Nagra ergänzt werden, so dass dann ein Vergleich der betrachteten Standortgebiete aus sicherheitstechnischer Sicht auf Basis der standortbezogenen Daten

möglich ist. Eine verbesserte Datenlage kann im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens zum Ausschluss von Flächen führen.

## **IX. Diskrepanzen zu früheren Auswertungen und deren Begründungen**

Beim Vergleich der von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebiete sind Unterschiede zu früheren Auswertungen und deren Begründungen festzustellen. Die ESchT hat sich mit den Gründen für diese Unterschiede beschäftigt.

Seit den späten 1970er Jahren wurden in der Schweiz Lagerstandorte für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und hochaktive Abfälle (HAA) gesucht. Im Projekt „Gewähr“ (1985) ging man von einem horizontal zugänglichen SMA-Lager aus (Horizontalstollen). Dafür kamen theoretisch nur Standorte in den Alpen, den Voralpen und dem Jura in Frage. Für ein HAA-Tiefenlager ging man von Standorten im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz aus. Diese Bereiche grenzen zum Teil unmittelbar an das deutsche Staatsgebiet.

Zur Identifizierung potenzieller Standorte für ein SMA-Lager wurden in einem Einengungsverfahren 100 Standortgebiete bis 1983 auf drei reduziert. Dies waren Bois de la Glaive (Kanton Vaud, Wirtsgestein Anhydrit), Oberbauenstock (früher Oberbauen, Kanton Uri, Wirtsgestein Helvetische Mergel) und Piz Pian Grand (Kanton Graubünden, Wirtsgestein Kristallin). Aufgrund der guten Erkundungsmöglichkeiten von der Erdoberfläche aus kam 1986 der vierte Standort Wellenberg (früher Altzellen, Kanton Nidwalden, Wirtsgestein Helvetische Mergel) hinzu. Der Bundesrat entschied 1988, dass am Referenzstandort Oberbauenstock der Entsorgungsnachweis für SMA erbracht war. Nachdem vergleichende Auswertungen der Sondierungen an allen vier potenziellen Standorten vorlagen, hatte die Nagra 1994 den Wellenberg als Standort vorgeschlagen. Ein Rahmenbewilligungsgesuch sowie der Bau eines Sondierstollens scheiterten an Widerständen im Kanton.

Im Sachplanverfahren wird gegenüber dem Projekt „Gewähr“ die Anforderung eines horizontalen Zugangs zum SMA-Lager aufgegeben. Dadurch entfällt eine Beschränkung auf die Alpen, die Voralpen und den Jura. Ein SMA-Lager in Wirtsgesteinen, die unterhalb der Talsohle liegen, ist damit grundsätzlich möglich.

Gegenüber den damaligen Vorstellungen sind die Anforderungen an den Platzbedarf eines SMA-Lagers im Sachplanverfahren deutlich erhöht. Um die Forderung nach einer vereinfachten Rückholbarkeit der Abfälle zu erfüllen, ist das Sicherheits- und Barrieren-

konzept von der Nagra angepasst worden. So sollen nunmehr die Abfallgebinde in Endlagerbehältern eingelagert werden, was dazu führt, dass die Abfallgebinde im Mittel einen größeren Abstand voneinander aufweisen. Darüber hinaus sieht das jetzige Sicherheits- und Barrierenkonzept einen größeren Kammerabstand als früher sowie Reserven zur Berücksichtigung von Inhomogenitäten vor. Darüber hinaus werden als Vorsichtsmaßnahme die notwendigen Abstände des Tiefenlagers zu Wirtgesteinsgrenzen größer eingeschätzt.

Gegenüber früheren Betrachtungen wird im Sachplan eine größere Mindestüberdeckung verlangt. Dies geht auf die jüngeren Untersuchungen am Wellenberg zurück. Dort wurde gezeigt, dass die Auflockerungszone des Gebirges bis 400 Meter Tiefe reicht und erst darunter die erforderlichen Wirtsgesteinseigenschaften (insbesondere die hydraulische Durchlässigkeit) erreicht werden.

Die früher betrachteten potenziellen Standorte Bos de la Glaive, Oberbauenstock und Piz Pian Grand sowie andere, schon früher ausgeschiedene potenzielle Standorte in den Helvetischen Mergelakkumulationen (Nagra 1981) – die schon in der Bewertung von 1994 hinter den Standort Wellenberg zurückgetreten waren – erfüllen nach Angabe der Nagra nicht die Mindestanforderungen des Sachplanverfahrens. Die beiden Standorte Muotathal (früher Pragelpass) und Wartau (früher Alp Palfris) in Helvetischen Mergelakkumulationen erfüllen nach Ansicht der Nagra die Mindestanforderungen. Sie werden jedoch aufgrund anderer Kriterien (Explorierbarkeit fraglich, räumliche Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers nicht bekannt) nicht als bevorzugter Bereich bewertet.

Nach Aussagen der Nagra ist der zusätzlich erforderliche Lagerraum für den Abfall neuer kerntechnischer Anlagen nicht ursächlich für die Nichtberücksichtigung der früheren potenziellen Standorte und für den aktuell durchgeführten Einengungsprozess.

Zur Identifizierung von Standorten für ein HAA-Lager wurde im Projekt „Gewähr“ 1985 im Wesentlichen das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz (einschließlich des Felslabors Grimsel) betrachtet. Der Bundesrat sah den Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis im Kristallin grundsätzlich erbracht, jedoch nicht den Nachweis eines geeigneten und genügend großen Gesteinsvorkommens. Daraufhin machte der Bund die Auflage, neben den bis dahin untersuchten Kristallingesteinen verstärkt auch Sedimentgesteine für ein HAA-Lager zu betrachten. Die HSK bestätigte 2004 die Vorbehalte zum Auffinden eines geeignet großen Gebirgsbereichs im Kristallin. Bei der weiteren Betrachtung der Sedimentgesteine wurde 1994 mit der Zustimmung der Behörden entschieden, auf den Opalinuston und das Zürcher Weinland als potenzielles Standortgebiet zu fokussieren. Der Bund bestätigte 2006, dass im

Opalinuston im Zürcher Weinland der Entsorgungsnachweis für HAA erbracht war. Der Bund hatte damit dennoch eine Fokussierung der weiteren Untersuchungen auf das Zürcher Weinland abgelehnt.

Aus Sicht der ESchT sind die Diskrepanzen zu den früheren Auswertungen nachvollziehbar. Sie liegen in einem fortgeschrittenen Informationsstand, aber auch in Änderungen im Sicherheits- und Barrierenkonzept begründet. Dieser Aspekt betrifft sowohl die größere laterale Ausdehnung eines SMA-Tiefenlagers als auch dessen Tiefenlage und Zugangswege.

## **X. Zusammenfassende Bewertung der ESchT**

Auf Basis ihrer Bewertungen zu den fünf Schritten in Etappe 1 des SGT kommt die ESchT insgesamt zu der Einschätzung, dass die Nagra aus geowissenschaftlicher und sicherheitstechnischer Sicht nach fundiertem und aktuellem Stand der Wissenschaft vorgegangen ist. Das Standortauswahlverfahren folgt in Etappe 1 der im SGT vorgegebenen methodischen Vorgehensweise. Die Identifizierung der weiter im Verfahren bleibenden und damit in die Etappe 2 zu übernehmenden potenziellen Standortgebiete erfolgt damit durch einen in erster Linie sicherheitsgerichteten und über Kriterien gesteuerten sowie flächen- und raumbezogen wirksam werdenden schrittweisen Einengungsprozess (Negativ- bzw. Positivkartierung).

Aus Sicht der ESchT sind in Schritt 1 die Randbedingungen, die die Grundlagen für die weiteren Schritte in Etappe 1 bilden, sehr systematisch, umfassend und transparent abgeleitet worden. Dieses betrifft sowohl die Erfassung der insgesamt zu entsorgenden Abfallarten und ihrer Eigenschaften als auch die Festlegung der Abfallmenge, die den Platzbedarf für die beiden Tiefenlager bestimmt. Die Schweiz geht von einer mittelfristig weiteren Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung aus. Vor dem Hintergrund, dass zurzeit Gesuche für den Neubau von Kernkraftwerken an bereits bestehenden Kraftwerksstandorten eingereicht worden sind, erscheint es im Sinne einer vorsorgenden Planung konsequent, die Abfallmenge daran auszurichten. Die Berücksichtigung des maximalen Abfallvolumens übt auf den Einengungsprozess nach Einschätzung der ESchT keinen Einfluss aus.

Die Zuteilung der Abfallarten auf die beiden Lagertypen erfolgt auf Basis von generischen Transportrechnungen für jede Abfallsorte und dem Vergleich der numerischen Ergebnisse mit sicherheitsorientierten Kriterienwerten. Da bei diesem Ansatz möglicherweise bestimmte

Abfallarten dem HAA-Tiefenlager mit seinen strengeren Anforderungen an die geologische Barriere zugeordnet werden, ist die Vorgehensweise sicherheitsgerichtet. Durch die bei den Transportrechnungen verwendeten Parameterwerte erfolgt aus Sicht der ESchT keine Vorfestlegung auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp.

Die Sicherheits- und Barrierenkonzepte für das HAA- und das SMA-Tiefenlager entsprechen nach Einschätzung der ESchT den international üblichen Vorgehensweisen und bestehen aus verschiedenen Elementen, die jeweils einen Beitrag zur Langzeitsicherheit der Tiefenlager leisten.

Ein wichtiger Aspekt, auf den die ESchT ihr Augenmerk gerichtet hat, ist die Identifizierung von geeigneten Indikatoren und die Festlegung der Bewertungsskalen durch die Nagra, mit denen die jeweils zu betrachtenden Varianten bewertet werden. Nach Lebenserfahrung ist bei derartigen umfangreichen Bewertungen auf der Grundlage von teilweise mehr, teilweise aber auch weniger naturwissenschaftlich- oder geotechnisch belegten Sachverhalten das Einfließen von subjektiven Einschätzungen in den Bewertungsprozess nicht grundsätzlich auszuschließen bzw. sogar unvermeidbar. Außerdem ist dem Antragsteller grundsätzlich ein angemessener Bewertungsspielraum zuzubilligen.

Insgesamt kommt die ESchT zu dem Ergebnis, dass die verwendeten Indikatoren umfassend dargestellt und in der Regel mit angemessenen Bewertungsskalen hinterlegt sind. Eine Reihe von Kritikpunkten betrifft Detailaspekte zur Ausgestaltung der Indikatoren durch die Nagra. So sind die Anforderungen an die Transparenz der Zuordnung der jeweiligen Bewertungsskalen nicht durchgängig als erfüllt anzusehen. Bei den Indikatoren der Kriteriengruppe 4 zur bautechnischen Machbarkeit ist die ESchT der Meinung, dass die verwendeten Bewertungsskalen für das Wirtsgestein Opalinuston insgesamt zu positiv ist. Allerdings erkennt die ESchT keinen nachhaltigen Einfluss auf das Ergebnis des Einengungsverfahrens selbst.

Der kriterien- und indikatorgestützte Einengungsprozess in den Schritten 3 bis 5 wird weitgehend transparent und nachvollziehbar umgesetzt. Dieser Umsetzungsprozess wird in den verfügbaren Verfahrensunterlagen ausführlich dokumentiert und begründet. Es ist nicht zu erkennen, dass während der Umsetzung des Verfahrens durch unzutreffende oder auffallend tendenziell geprägte Sachverhaltsbewertungen in einzelnen Indikatoren eine gezielte Hinführung auf schon vorfestgelegte potenzielle Standortgebiete erfolgt ist. Gegen eine möglicherweise unterschwellige Präferenzierung von Standortgebieten spricht aus Sicht der ESchT, dass bei der Standortgebietsauswahl die Kriterien und die ihnen zugeordneten

Indikatoren nicht gewichtet in den Agglomerationsprozess eingebracht werden. Eine tendenzielle Ausformung des Verfahrens wäre dann eher zu vermuten bzw. nicht auszuschließen, wenn einzelnen Kriteriengruppen oder auch einzelnen Kriterien mit ihren Indikatoren von vornherein in der Agglomeration eine deutlich größere Gewichtung zugeordnet wäre als anderen. Die sich durch die unterschiedliche Anzahl der Kriterien pro Kriteriengruppe, die durch den SGT vorgegeben sind, und die unterschiedliche Anzahl der Indikatoren für jedes Kriterium implizit ergebenden ungleichen Gewichte einzelner Indikatoren führen zu keiner anderen Einschätzung.

Aus Sicht der ESchT wird die Anwendung der Indikatoren während der drei Einengungsschritte schlüssig erklärt. Es wird nachvollziehbar dargestellt, warum und in welchem Schritt für bestimmte Indikatoren welche spezifischen Anforderungen (MA, VA, BS) angemessen sind. Die Argumentationen folgen dem auf die spezifischen Verhältnisse der Schweiz angewendeten Stand des Wissens. Für das Ergebnis des Einengungsprozesses ist von Bedeutung, welche Indikatoren für die Mindestanforderungen und für die verschärften Anforderungen herangezogen werden, denn diese können den Ausschluss bzw. das Zurückstellen einer Variante bedingen. Für beide Anforderungen sind sinnvolle Indikatoren definiert worden, wobei bezüglich der Mindestanforderungen die Vorgaben des SGT einzuhalten waren. Aus Sicht der ESchT sind die Indikatoren der verschärften Anforderungen sachgerecht und mit sinnvollen Bewertungen versehen. Dieses Vorgehen erscheint insgesamt und in den Einzelschritten schlüssig und geowissenschaftlich kompetent.

Gegenstand der Überprüfung von Transparenz und Nachvollziehbarkeit als den zentralen Elementen der Verfahrensgerechtigkeit ist es auch gewesen, die Stabilität der Ergebnisse des Standortauswahlverfahrens in Etappe 1 bei Variation einzelner Indikatorbewertungen unter Nutzung des jeweiligen Bewertungsspielraums zu betrachten, um die Sensitivität des Verfahrens zu ermitteln. Diese Überprüfungen sind sowohl auf der Ebene der Großraumbewertung mit Blick auf die Identifizierung geeigneter Teilbereiche wie auch auf der Ebene der innerhalb der Großräume identifizierten und konkurrierenden Teilgebiete erfolgt. Im Ergebnis einer Indikator-bezogenen Variationsanalyse hat sich gezeigt, dass der Einengungs- und Bewertungsprozess ein robustes und belastbares Ergebnis liefert.

Zusammenfassend kommt die ESchT zu dem Ergebnis, dass die gewählte Vorgehensweise und die Art der Durchführung durch die Nagra sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht den Erwartungen an ein solches Standortauswahlverfahren in angemessene-

ner Weise gerecht werden. Die von der ESchT angemerkten Verbesserungsvorschläge und Kommentare sollten in den nächsten Etappen des Auswahlverfahrens berücksichtigt werden.

## **XI. Literatur**

AkEnd 2002: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Abschlussbericht. – Dezember 2002.

BGR 2007: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. –, April 2007.

ENSI 2009: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. – ENSI G-03, April 2009.

ESchT 2007: Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager: Stellungnahme zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“ basierend auf dem Entwurf vom 11.01.2007. – [www.escht.de](http://www.escht.de), März 2007.

ESchT 2009: Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager: Stellungnahme zur ersten Etappe des Schweizer Standort-auswahlverfahren für ein geologisches Tiefenlager. Teil I: Nicht-technische Aspekte Partizipation und Standortdefinition, bisherige Planungen bei raumordnerischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen. – [www.escht.de](http://www.escht.de), November 2009.

KEV 2004: Schweizer Bundesrat: Kernenergieverordnung (KEV) der Schweiz. – Dezember 2004.

Nagra 1981: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Die Endlagerung schwach- und mittel-radioaktiver Abfälle in der Schweiz – Potentielle Standortgebiete für ein Endlager Typ B. – Nagra Technischer Bericht 81-04, 1981.

Nagra 2008a: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. – Nagra Technischer Bericht 08-03, Oktober 2008.

Nagra 2008b: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Geologische Grundlagen, Textband und Beilagen. – Nagra Technischer Bericht 08-04, Oktober 2008.

Nagra 2008c: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. – Nagra Technischer Bericht 08-05, Oktober 2008.

Nagra 2008d: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 08. – Nagra Technischer Bericht 08-06, Juli 2008.

Nagra 2008e: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle: Entsorgungsprogramm und Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Zusammenfassung. Zusammenfassung. – November 2008.

SGT 2008: Bundesamt für Energie: Sachplan geologisches Tiefenlager. Konzeptteil. – April 2008.

## Anhang A Bewertung der Indikatoren zur Bautechnischen Eignung

Die Notwendigkeit einer ausführlicheren Diskussion ergibt sich, wie in Kap. VI kurz beschrieben, für die Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung –, Diese besteht aus zwei Kriterien, die wiederum durch je zwei und damit insgesamt vier Indikatoren operationalisiert werden:

- Kriterium 4.1 *Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen*
  - Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften*
  - Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*
- Kriterium 4.2 *Untertägige Erschließung und Wasserhaltung*
  - Indikator *Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen*
  - Indikator *Natürliche Gasbildung (im Wirtsgestein)*

Grundsätzlich kann der Ausgestaltung der Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – durch die genannten Kriterien und Indikatoren gefolgt werden. Vom Grundsatz her werden die zentralen Aspekte, die aus gebirgsmechanischer Sicht mit der bautechnischen Machbarkeit verbunden sind, erfasst – insbesondere dann, wenn mit dem Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* die bautechnisch relevanten Eigenschaften des anstehenden Wirtsgesteins und mit dem Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit* darüber hinaus die tragfähigkeitsmindernden Auswirkungen eines tektonisch angelegten Großgefüges erfasst und damit der Übergang vom Größenbereich Handstück (Gestein) auf den Größenbereich Gebirge erfolgt. Voraussetzung für die Anwendung insbesondere dieses Kriteriums 4.1 im Standortauswahlverfahren ist allerdings eine belegte und nicht zu optimistische Bewertung des Gebirgstragvermögens unter den technogen induzierten Einwirkungen (Auffahrung, Abfallablagerung) in Verbindung mit den für die Lagerkammern / Lagerstollen vorgesehenen Teufenbereichen und der planerisch geschaffenen Flexibilität, die Ausbaukonzeption den angetroffenen Gebirgsverhältnissen anpassen zu können.

Eine Analyse des Verfahrensablaufes zeigt, dass innerhalb der Schritte 3 bis 5 in Etappe 1 des Standortauswahlverfahrens die Kriteriengruppe 4 in Schritt 3 für den Ausschluss von

geotektonischen Großräumen (geologische-geotektonische Situation) nicht herangezogen wird. Im Schritt 4 mit der Identifizierung von bevorzugten Wirtsgesteinen wird dann lediglich der Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* eingesetzt, während schließlich in Schritt 5 bei der Identifizierung bevorzugter Bereiche die vier vorstehend genannten Indikatoren insgesamt eingesetzt werden.

Hinsichtlich der Wirkung der Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – mit zugehörigen Kriterien und Indikatoren auf die Schritte 3 – 5 der Etappe 1 des Auswahlverfahrens ist damit zu konstatieren:

- Schritt 3 (Standortgebiete): Es besteht keine Auswirkung.
- Schritt 4 (bevorzugtes Wirtsgestein). Eine Kriteriengruppe steht mit einem Kriterium und einem Indikator explizit gleichgewichtig zu den weiteren drei Kriteriengruppen mit allerdings neun Kriterien und 21 Indikatoren.
- Daraus folgt: Der Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* nimmt mit einer Gewichtung von 25 % an der Gesamtbewertung in Schritt 4 teil. Im Durchschnitt haben die anderen Indikatoren eine Gewichtung zusammen von 75 % und damit einzeln im Durchschnitt von lediglich  $75/21 \approx 3,5$  %.
- Schritt 5 (bevorzugte Standortgebiete) → eine Kriteriengruppe mit zwei Kriterien und insgesamt vier Indikatoren gleichgewichtig zu den weiteren drei Kriteriengruppen, die durch elf Kriterien mit insgesamt 39 Indikatoren operationalisiert werden.
- Daraus folgt: Die Indikatoren der Kriteriengruppe 4 nehmen mit einer Gewichtung von je  $25/4 \approx 6$  % an der Gesamtbewertung teil. Im Durchschnitt haben die anderen Indikatoren im Mittel eine Gewichtung von nur  $75/39 \approx 2$  %.

Neben dieser schon relativ gesehen starken Gewichtung der Elemente dieses Verfahrensteils hat insbesondere das Kriterium *4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen* mit dem zugeordneten Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* eine dominante Bedeutung bei der flächenbezogenen Eingrenzung der Standortgebiete, da dieser Indikator mit einer Mindestanforderung (MA) ausgestattet ist, die in ihrer Wirkung einen unmittelbaren Ausschluss von Gebieten bedingt. Hier ist insbesondere für das HAA-Tiefenlager im Opalinuston wesentlich, dass das im Entsorgungsnachweis der Nagra aus dem Jahr 2002 und später vom Bundesrat bestätigte Tiefenlagerkonzept für die Lagerstätten lediglich eine Kontursicherung mit Felsankern und Verzugsmatten vorsieht,

aber keinen flächenhaften Ausbau mit z.B. Spritzbeton (Portlandzement). Mit der Vorgabe dieses Ausbaukonzepts wird im Grundsatz das Gebirge zum zentralen Tragelement im Verbundtragsystem Gebirge – Ausbau. Eine nachhaltige Unterstützung des Gebirgstragvermögens durch einen mittragenden Ausbau ist damit für die HAA-Lagerstollen nicht vorgesehen. Daraus folgt:

- Die SMA-Lagerkammern im Opalinuston können zur Gewährleistung von Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit entsprechend den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort mit dem gebirgsmechanisch erforderlichen Ausbau versehen werden.
- Ungeachtet der tatsächlichen geomechanischen Erfordernisse vor Ort ist bei den HAA-Lagerstollen im Opalinuston zur Gewährleistung von Betriebssicherheit und Standsicherheit zunächst nur eine Kontursicherung mit Felsanker/Verzugsmatten vorgesehen.

Damit kann die Ausbaukonzeption für SMA-Lagerstollen jederzeit den vorliegenden Gebirgsverhältnissen und Gebirgsbeanspruchungen (und damit Teufenlagen) angepasst werden, während der Ausbau der HAA-Lagerstollen engen Restriktionen unterliegt und lediglich eine Kontursicherung vorgesehen ist und damit wechselnden Gebirgsverhältnissen nicht adäquat angepasst werden kann. Im Grundsatz liegt geomechanisch bezüglich des Gebirgstragverhaltens bei den HAA-Lagerstollen ein Hohlraum ohne Ausbau vor.

Die nachfolgende Analyse konzentriert sich damit auf die Frage der bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen (Hohlräume ohne tragenden Ausbau) im Opalinuston.

Unter vorstehenden Randbedingungen wird von der Nagra für das Standortauswahlverfahren angenommen, dass das Gebirge in den potenziellen Standortgebieten für die HAA-Lagerstollen in Sedimentgesteinsformationen eine hinreichende Standsicherheit bis in eine Teufe von 900 m aufweisen soll (bei einer Standzeit von zwei Jahren). Gebiete, in denen das jeweilige Wirtsgestein in größerer Teufe ansteht, sind damit von vornherein ausgeschlossen. Gründe hierfür sind die dann nicht gegebene bautechnische Machbarkeit bzw. auch die nicht gegebene Aufnahme der abfallbedingten Zerfallswärme im Gebirge bei einer nach oben begrenzten zulässigen Gebirgstemperatur.

Daraus folgt mit anderen Worten, dass für den Fall, dass im Standortauswahlverfahren in den Schritten 3 bis 5 eine zu optimistische Einschätzung des Tragvermögens einer Wirtsgesteinsformation vorgenommen worden wäre, zunächst eine Reduktion der zulässigen

Teufenlage und dann damit als unmittelbare Konsequenz verbunden eine Reduktion der ausgewiesenen Ausdehnung von Standortgebieten resultiert.

Daher sollen nachstehend die Indikatoren *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* und *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*, die dem Kriterium *4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen* zugeordnet sind, im Hinblick auf ihre Ausgestaltung und die fachtechnische Begründung dieser Ausgestaltung näher betrachtet werden.

Grundsätzlich gilt, dass die in Kriteriengruppe 4 zusammengefassten Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit mit der Zielsetzung der zuverlässigen und sicheren Ausführung aller notwendigen technischen Maßnahmen zentrale Voraussetzung sind für die Gewährleistung der Betriebssicherheit und der Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers mit den Phasen Bau, Betrieb, Überwachung, Verschluss und möglicherweise Rückholung. Darüber hinaus besteht auch die Zielsetzung, die geogene Barrierenqualität durch die technogenen Maßnahmen so wenig wie möglich zu beeinträchtigen bzw. soweit wie möglich zu erhalten. Mit den Indikatoren *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* und *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* wird versucht, die komplexen geomechanischen Beziehungen auf möglichst einfache und doch sachlich zutreffende Weise für ein Standortauswahlverfahren mit seinen aufeinander folgenden und den geologischen Raum einengenden Schritten zu operationalisieren. Diese Beziehungen bestehen zwischen den das Tragvermögen einer geologischen Formation charakterisierenden Gesteins- und Gebirgseigenschaften und den auf die Formation als Tragelement einwirkenden Lasten und Beanspruchungen, die u.a. aus dem primären Spannungsfeld, den Porenwasserdrücken und den Hohlraumgeometrien resultieren.

Angestrebt wird eine Operationalisierung der Kriterien über die Identifizierung von Indikatoren, für die möglichst auf quantitativer Grundlage Anforderungen abgeleitet werden. Für die Ableitung der den Indikatoren zugeordneten Anforderungen mit der Unterscheidung in Mindestanforderungen (MA), verschärfte Anforderungen (VA) und Anforderungen bezüglich einer Zuordnung in eine ordinale Bewertungsskala (BS) gilt:

Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* / (Nagra 2008c, S. 211, bzw. Anhang A1-147 ff)

Die Anforderungen für SMA- und HAA-Tiefenlager sind gleich. Es gilt:

- (1) Mindestanforderungen (MA) im Grundsatz: kein Lockergestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung
- (2) Verschärfte Anforderung (VA): keine
- (3) Bewertungsskala–Anforderungen (BS):
  - „sehr günstig“ : hohe Festigkeiten mit > 100 MPa
  - „günstig“: mittlere bis hohe Festigkeiten mit 20 – 100 MPa
  - „ungünstig bis bedingt günstig“: kleine bis mittlere Festigkeiten mit 5 – 20 MPa

Die angegebenen Zahlenwerte sind bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit nach Abzügen

- in Schritt 4 bei starker Anisotropie (Schichtung, Schieferung), Heterogenität und Wasserzutritt (in Anlehnung an SIA-Klassifikation) und
- in Schritt 5 zusätzlich bei tektonischer Überprägung je nach zu erwartendem Trennflächengefüge (orientiert an der geotektonischen Position der Großräume).

Ergänzend wird ausgeführt, dass in Schritt 4 der Aspekt Wasserzutritt bei vorhandener geringer Durchlässigkeit von untergeordneter Bedeutung ist und in Schritt 5 für den tektonischen Großraum Tafeljura (Opalinuston als Wirtsgestein) eine Herabstufung nicht erforderlich ist, da die tektonische Überprägung gering ist.

Bezüglich der einaxialen Druckfestigkeiten von Opalinuston wird in Nagra (2008a, S.145) ausgeführt, dass ohne Berücksichtigung der Schichtung je nach lithologischer Ausprägung, Konsolidierung und Wassergehalt Zahlenwerte von  $\beta_1 = 10$  bis 30 MPa vorliegen. Für den Opalinuston wird auf das Vorhandensein einer Schichtung mit reduzierter Festigkeit hingewiesen. Eine diesbezügliche Quantifizierung erfolgt jedoch nicht.

Explizit wird ausgeführt, dass Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagebauten zeigen, dass die Eisenbahn- und Straßentunnels im Opalinuston (vor allem im Faltenjura) meist ohne größere Schwierigkeiten bei Überlagerungen von bis zu 800 m realisiert werden konnten, sogar bei vergleichsweise starker tektonischer Überprägung mit zahlreichen Störungen (geotechnische Situation Faltenjura), (Nagra 2008a, S.145).

Weiter heißt es, dass der Opalinuston bei geringer tektonischer Überprägung bei Überlagerungen von bis zu rund 400 m ein Gestein mit akzeptablen stollenbautechnischen

Eigenschaften ist ( Es resultiert die Einstufung des Indikators als knapp „günstig“.), (Nagra 2008c, S.175).

Dagegen heißt es an anderer Stelle in Nagra (2008c, S.180): Die felsmechanischen Eigenschaften erlauben unter Berücksichtigung der verschiedenen technischen Möglichkeiten für den Ausbruch und die Sicherung der Untertagebauten – unter Inkaufnahme eines erhöhten technischen Aufwands (Kosten, Zeitbedarf) – die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten, ohne dass die Barriereigenschaften des Opalinustons großräumig beeinträchtigt würden. Deshalb wird der Opalinuston bezüglich des Kriteriums *4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen* als „günstig bis sehr günstig“ beurteilt.

Weiterhin wird von der Nagra z.B. bei der Bewertung der bautechnischen Eignung des Bereichs Opalinuston-Tafeljura die Situation bezüglich des Indikators *Tiefenlage unter Terrain* infolge der überwiegenden Tiefenlage > 600 m als „bedingt günstig“ eingeschätzt (Nagra 2008c, S.307). Gleichzeitig ist der Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* als „günstig“ eingestuft, woraus eine Einschätzung des Kriteriums als „bedingt günstig“ resultiert (Agglomeration zur konservativen Seite hin). Das zweite Kriterium dieser Kriteriengruppe *4.2 Untertägige Erschließung und Wasserhaltung* findet eine Bewertung als „sehr günstig“, aggregiert aus den Indikatoren *Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen* mit „günstig“ und *Natürliche Gasbildung im Wirtsgestein* mit „sehr günstig“ (Agglomeration zur positiveren Gesamtbewertung des Kriteriums). Die Gesamtbewertung für die Kriteriengruppe ergibt sich dann arithmetisch nunmehr als „günstig“.

Aus Sicht der ESchT ist diese uneinheitliche Vorgehensweise bei der Agglomeration nicht nachvollziehbar.

#### Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*

Zur Begründung der Anforderungen für diesen Indikator werden theseartig von der Nagra genannt (Nagra 2008c, Anhang A1-6 ff):

- Ausschlaggebend für die Langzeitsicherheit der HAA-Lagerstollen ist die Bildung und Entwicklung der Auflockerungszone im Grenzbereich zwischen Stollenverfüllung, Versiegelung und Wirtsgestein.
- Die Möglichkeiten der Sicherungsmaßnahmen sind begrenzt (Felsanker/Netze, nur begrenzte Mengen an zementhaltigen Materialien).

- Die Standsicherheit der Hohlräume muss in allen Phasen gewährleistet werden (Bau, Einlagerung, Beobachtung, Verschluss).
- Die Langzeitsicherheit ist dann erreichbar, wenn eine sichere und zuverlässige Realisierung über alle Phasen hinweg gegeben ist.
- Zentrale Anforderung an Auslegung und Bau ist der Erhalt der natürlichen Barrierenfunktion des Wirtsgesteins.
- Die technischen Barrieren müssen zuverlässig eingebaut werden können.

Daraus folgt gemäß Nagra insgesamt die Forderung nach kleinen Gebirgsdeformationen und einer nur geringen Auflockerung des Gebirges – allerdings unter der Randbedingung eines nur geringen Einsatzes von Baumaterialien für die Felssicherung. Hieraus folgt nach Ansicht der ESchT unmittelbar weiter die Forderung nach einer nur mäßigen Ausnutzung des Gebirgstragvermögens mit hinreichenden Tragreserven und hinreichendem Abstand zu auch nur lokalen Versagenszuständen.

Weiter wird von der Nagra konstatiert, dass bautechnische Probleme in Bezug auf Standsicherheit und große Auflockerungen dann zu erwarten sind, wenn die Festigkeit des Gebirges infolge von Spannungsumlagerungen großräumig (im Dekameterbereich) überschritten wird und es zu Bruchvorgängen und plastischen Deformationen um die Hohlräume kommt.

Darüber hinaus wird darauf hingewiesen, dass die Ableitung der Festlegungen zu den Indikatoren beruht auf

- Erfahrungswerten aus dem Tunnelbau (Opalinuston: Tunnel lokal bis 800 m, meist 200 – 400 m Tiefenlage),
- semi-empirischen Gesetzmäßigkeiten (Relation (Gebirgs-)Spannung zu einaxialer Gebirgsdruckfestigkeit; bautechnische Schwierigkeiten beginnen dann, wenn die Beanspruchung größer wird als die halbe Bruchfestigkeit),
- orientierenden felsmechanischen Berechnungen.

Ausgeführt wird auch, dass die Festlegungen für die Tiefenlage der Lagerebene so gewählt sind, dass bei der Einengung keine Wirtsgesteine bzw. Bereiche frühzeitig eliminiert werden.

Vor diesem Hintergrund wird bezüglich des Wirtsgesteins Opalinuston die Erstellung der HAA-Lagerstollen bis in eine Maximaltiefe von 900 m als „potenziell möglich“ erachtet und aus dieser Einschätzung auch die Mindestanforderung abgeleitet.

Die Wert für die Maximaltiefe liegt damit bei den HAA-Lagerstollen um 100 m tiefer als bei den SMA-Lagerkammern, weil die HAA-Lagerstollen

- deutlich kleinere Ausbruchsquerschnitte aufweisen,
- eine kleinere Standzeit aufweisen und
- ihre Ausrichtung gebirgsmechanisch günstig in Richtung der maximalen Gebirgsbeanspruchung erfolgen kann.

Verschärfte Anforderungen mit Reduzierung der Tiefenlage aufgrund eines systematisch zu erwartenden Trennflächengefüges für das Wirtsgestein Opalinuston werden wegen der bei dieser Formation in den relevanten Standortgebieten vorliegenden ruhigen Lagerungsform (= geringe geotektonische Beanspruchung) nicht formuliert (MA  $\equiv$  VA).

Die Bewertungsskala sieht folgende Klassifizierung vor (BS):

- 0 – 300 m „sehr günstig“ (aber Mindesttiefe schon 400 m! und damit nicht relevant)
- 300 – 600 m „günstig“
- 600 – 900 m „bedingt günstig“
- > 900 m „ungünstig“ (nicht relevant, da über MA ausgeschlossen)

Letztlich wird darauf verwiesen, dass grundsätzlich im Rahmen von verschärften Anforderungen die Einschätzung eines Indikators mit „bedingt günstig“ nicht vorgesehen ist. Die Nagra toleriert aber diese Abweichung vom Konzept mit der Begründung, dass auf diese Weise das Spektrum der Möglichkeiten nicht frühzeitig eingeschränkt wird.

Bewertung zu dem Kriterium K4.1 – Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen und seinen Indikatoren

Der mit dem Kriterium 4.1 und seinen Indikatoren verbundenen Zielsetzung und den fachtechnischen Überlegungen zu der zahlenmäßigen Konkretisierung der Indikatoren kann im Grundsatz gefolgt werden. Abgesehen von Unklarheiten mit dem Gebrauch der Begriffe Gesteinsfestigkeit, einaxiale Bruchfestigkeit, repräsentative Gebirgsfestigkeit und auch Standfestigkeit bzw. Standsicherheit schätzt die ESchT aber in Bezug auf die Gesteinsart Opalinuston einige relevante Aspekte, insbesondere bei der konkreten zahlenmäßigen Ausgestaltung der Indikatoren, anders ein als die Nagra.

Beim Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* betrifft dies folgende Punkte:

- Für den Opalinuston wird eine einaxiale Druckfestigkeit  $\beta_{\text{on } 1} = 10 - 30 \text{ MPa}$  angegeben ohne Berücksichtigung des festigkeitsreduzierenden Einflusses des Schichtungsgefüges. Wird ein Schichtungsgefüge berücksichtigt, könnte die repräsentative Gesteinsdruckfestigkeit auf  $\beta_1 < 20 \text{ MPa}$  zu reduzieren sein, so dass grundsätzlich eher nur die Einstufung als „bedingt günstig“ erfolgen kann.
- Verformungseigenschaften werden zwar in der Indikatorbezeichnung angesprochen, sonst aber nicht weiter quantifiziert, so dass dieser Indikator lediglich anhand der Gesteinsfestigkeit beurteilt wird.
- Bei der Druckfestigkeit von Opalinuston wird der Wassergehalt aufgrund der geringen Gesteinsdurchlässigkeit von der Nagra als nicht von Bedeutung eingeschätzt. Beobachtungen zeigen jedoch, dass in konturnahen Bruchbereichen des Gebirges mit der Folge von Gefügebrauchlockerungen und dann folgend aufgrund der vergrößerten Sekundärporosität der Wassergehalt durch Wasserzufluss aus dem Gebirge ansteigt und damit die Druckfestigkeit reduziert und die Deformationsfähigkeit vergrößert wird (Opalinuston als veränderlich festes Gestein). Darüber hinaus zeigt die Erfahrung, dass das Gestein unter Beanspruchung dann deutlich reduzierte Standzeiten aufweist, wenn in dem betreffenden Hohlraum eine relativ große Luftfeuchtigkeit vorliegt. Hier könnte eine kontinuierliche Bewetterung allerdings die geomechanisch-geohydraulische Situation verbessern, wobei die Frage zu stellen ist, in wie weit diese Effekte sicher prognostiziert werden können.

- Die als Beleg für die bautechnische Machbarkeit aufgeführten Untertagebauwerke mit guten Erfahrungen bis in 800 m Tiefe könnten möglicherweise eher den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* beleben. Dessen ungeachtet bleibt die Frage, ob bei diesen Untertagebauwerken ebenfalls kein tragender Ausbau vorliegt, so wie er auch nicht für die HAA-Lagerstollen vorgesehen ist.
- Aus Sicht der ESchT ergibt sich ein Widerspruch, wenn einerseits dem Opalinuston bis in eine Tiefe von 400 m akzeptable (nicht ausgezeichnete oder gute) stollenbautechnischen Eigenschaften zugeordnet werden (Einstufung „knapp günstig“), andererseits die zuverlässige Erstellung der untertägigen Bauten postuliert wird ohne großräumige Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften des Opalinustons. Daraus folgt dann eine Beurteilung mit „günstig bis sehr günstig“. Dabei erscheint der Hinweis auf verschiedene technische Möglichkeiten für Ausbruch und Sicherung bei dem für die HAA-Lagerstollen zugrunde liegenden Ausbaukonzept mit der Reduktion auf Felsanker und Verzugsmatten eher als nicht hilfreich.
- Auf die unterschiedliche Agglomeration von Indikatorbewertungen zu Kriteriengruppen ist bereits vorstehend hingewiesen worden.

Bei Berücksichtigung dieser Anmerkungen ergäbe sich für den Opalinuston im Schritt 4 für die Kriteriengruppe 4 – Bautechnische Eignung – mit lediglich diesem Indikator nicht die Einstufung „günstig bis sehr günstig“, sondern „bedingt günstig“, wobei die vorgesehene und mehr oder weniger explizit einbezogene Teufenlage mit 900 m noch zu hinterfragen ist und eher auf 600 m zu begrenzen wäre.

Die Verformungseigenschaften werden nicht einbezogen, z.B. Begrenzung der inelastischen Verzerrungen mit nachfolgendem Deformationsversagen und daraus resultierender Dilatanz oder der Absolutverformungen. Auch wird kein Zusammenhang hergestellt zwischen Festigkeit und Deformation. Über die Formulierung von Festigkeitsklassen ist damit noch keine Aussage über die zu erwartenden Deformationen verbunden. Eine Gefügefestigkeit wird nicht eingeführt.

Beim Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* sind folgende Aspekte von Bedeutung:

Die als Mindestanforderung genannte Tiefenlage mit 900 m erscheint unter den gegebenen ausbautechnischen Randbedingungen mit Opalinuston als Wirtsgestein als sehr ambitioniert. Gründe für diese zurückhaltende Einschätzung sind die angegebenen Festigkeiten (Am Standort Benken beträgt die Gesteinsfestigkeit je nach Orientierung Hauptbeanspruchungsrichtung – Schichtflächenrichtung zwischen  $\max \beta \approx 30 \text{ MPa}$  und  $\min \beta \approx 6 \text{ MPa}$ ) bei einer Streubreite von ca.  $\pm 20 \%$  sowie die zu erwartenden Porenwasserdrücke, ein nicht auszuschließendes latentes Trennflächengefüge, ein anisotroper Primärspannungszustand, nicht auszuschließende bzw. zu erwartende Heterogenitäten im Lagerstättenaufbau, ein auflockerungsbedingt zunehmender Wassergehalt im Konturbereich und damit einhergehend eine nachhaltige Festigkeitsreduzierung sowie mangelnde bautechnische Erfahrungen. Systematisiert werden die negativen Folgewirkungen von Porenwässern auf Gesteinseigenschaften und damit Gebirgstragvermögen dadurch, dass Opalinuston den veränderlich festen Gesteinen zuzuordnen ist (Das Gesteinsgefüge ist sensitiv gegenüber Wassergehalt). Die ESchT bewertet die Aussage der Nagra, nach der die Umsetzung im geplanten Teufenbereich für „potentiell möglich“ gehalten wird, als Hinweis darauf, dass gewisse Zweifel in Bezug auf die bautechnische Machbarkeit bestehen. An anderer Stelle wird in gleicher Tendenz bei Tiefenlagen  $> 600 \text{ m}$  von anspruchsvollen bzw. sehr anspruchsvollen gebirgsmechanischen Verhältnissen gesprochen.

Hier muss auch daran erinnert werden, dass als Zielsetzung angesichts der restriktiven Randbedingung einer Kontursicherung nur mit Felsankern und Netzen geringe Deformationen und geringe Auflockerungen des Gebirges genannt werden. Bruchdeformationen und Konturabschalungen/Nachbrüche sind damit ausgeschlossen. Deutlich zu optimistisch dürfte die Einschätzung sein, dass bautechnische Probleme in Bezug auf Standsicherheit und große Auflockerungen erst dann zu erwarten seien, wenn die Festigkeit des Gebirges infolge von Spannungsumlagerungen großräumig (im Dekameterbereich) überschritten wird. Nach Einschätzung der ESchT sind die Anforderungen an die Standsicherheit des Gebirges und an den Erhalt der Barrierenqualität schon dann nicht mehr gegeben, wenn die Gefügefestigkeit räumlich in Größenordnung des Hohlraumradius überschritten wird (AKEnd 2002).

Im Rahmen der Begründungen für die zahlenmäßige Festlegung der Anforderungen wird von der Nagra auf tunnelbautechnische Erfahrungen verwiesen. Hierzu ist anzumerken, dass im Tunnelbau eine mangelnde Gebirgstragfähigkeit durch einen entsprechenden tragfähigen Ausbau kompensiert werden kann. So ist hier zu fragen, ob die als Referenz angeführten Hohlraumbauten in 800 m Tiefe, aber auch in den Teufen von 200 – 400 m ohne tragenden

Ausbau ausgeführt worden sind und ob eine hinreichende Standsicherheit rechnerisch nachgewiesen ist.

Weiter wird von der Nagra auf *semi-empirische Gesetzmäßigkeiten* mit einer Relation Gebirgsspannung – einaxiale Gebirgsbeanspruchung verwiesen und dazu angemerkt, dass die bautechnischen Schwierigkeiten steigen, wenn die Gebirgsspannung mehr als die Hälfte der Gebirgsdruckfestigkeit erreicht ( $\eta > 0,50$ ). Wenngleich nicht weiter ausgeführt wird, wie die hier relevante Gebirgsspannung ermittelt wird, so zeigt doch bereits folgende einfache Betrachtung, welche Tiefen ohne Ausbau bei in Tendenz optimistischer Betrachtung erreichbar sind:

- Lagerstollen in Teufenlage  $z = 500$  m
- primäre vertikale Gebirgsspannung  $p_G = 0,024 \cdot 500 = 12$  MPa
- isotropes Primärspannungsfeld  $K_0 = 1,0$
- maßgebende Gebirgsspannung  $\max \sigma_t = 2 \cdot 12 = 24$  MPa
- repräsentative Gebirgsfestigkeit mit Schichtflächengefüge  $\beta_G = 15$  MPa
- repräsentative Gebirgsfestigkeit ohne signifikantes Schichtflächengefüge  $\beta_G = 22$  MPa  
(entwickelt aus Gesteinsfestigkeit  $\beta_1 = 30$  MPa, Einbeziehung Schichtflächenfestigkeit mit Mittelwertbildung, Streubreite – 10 %, latentes Trennflächengefüge – 10 %  $\rightarrow \beta_G = (30 + 6) \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 15$  MPa)

Damit wird ersichtlich, dass bereits bei dieser pauschalen Betrachtung die an der Kontur vorliegende Beanspruchung in 500 m Tiefe die repräsentative Gebirgsdruckfestigkeit erreicht bzw. deutlich überschreitet. Eine nur 50 %ige Ausnutzung der Gebirgstragfähigkeit entsprechend dem von der Nagra zitierten semi-empirischen Ansatz ist damit schon in dieser Tiefe weit überschritten.

Nach AKEnd (2002) ergibt sich bei Zulassung einer begrenzten zonalen Konturentfestigung (Überschreitung der Gefügefestigkeit) für die Zuordnung von repräsentativer Gebirgsfestigkeit und Teufenlage mit einer Klassifizierung als „günstig“:

- $\beta_G = 20$  MPa – max  $z = 600$  m
- $\beta_G = 15$  MPa – max  $z = 500$  m

Von der Nagra wird mehrfach angemerkt, dass durch die quantitativen Festlegungen zur Ausgestaltung der bautechnisch orientierten Indikatoren Gebiete nicht zu frühzeitig im Verfahren ausgeschlossen werden sollten. Diesem Ansatz ist im Grundsatz zu folgen. Offen bleibt allerdings, ob unter dieser Argumentation auch der fachtechnisch noch als realistisch anzusehende Bereich verlassen werden sollte.

Aus vorstehenden kritischen Anmerkungen zu den bautechnisch relevanten Anforderungen / Indikatoren mit den zugeordneten Bewertungsskalen folgt insgesamt die Einschätzung, dass hier unter den vom Entsorgungsnachweis her vorgegebenen ausbautechnischen Randbedingungen von der Nagra eine deutlich zu optimistische Bewertung der bautechnischen Machbarkeit vorgenommen wird. Von der ESchT wird eingeschätzt, dass bei den zu erwartenden felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustongebirges unter realistisch-idealen Bedingungen mit Berücksichtigung der geomechanischen Wirkung des Mineral-korngefüges und bei Annahme eines wenig ausgeprägten Großgefüges eine bautechnische Machbarkeit bis in eine Teufe von ca. 550 – 600 m gegeben sein könnte. Dabei werden neben der grundsätzlichen Standsicherheit des Tragsystems zur Gewährleistung der Betriebssicherheit angestrebt im Hinblick auf die Gewährleistung der Langzeitsicherheit eine nur mäßige Entfestigung des konturnahen Gebirges sowohl in Bezug auf die räumliche Ausdehnung wie auch auf die Intensität der technogen induzierten Rissbildungen in dieser Auflockerungszone. Nicht auszuschließende tragfähigkeitsmindernde Aspekte, die z.B. aus Heterogenitäten des Wirtsgesteins infolge fazieller Veränderungen oder den Auswirkungen des Porenwassers resultieren könnten, sind dabei noch nicht berücksichtigt. Ebenfalls ist die Sensitivität des Gesteins gegenüber Feuchtigkeit dabei eher nicht einbezogen. Weitere Prämissen sind allerdings ein mäßig anisotroper Primärspannungszustand und eine felsmechanisch optimale räumliche Ausrichtung der HAA-Lagerstollen in Relation zum primären Gebirghauptspannungsfeld und zu dem Einfallen des Schichtungsgefüges.

Darüber hinaus ergibt sich generell die Frage, ob es bei der Bewertungs-Agglomeration von Indikatoren zu Kriterien und von Kriterien zu Kriteriengruppen tatsächlich sinnvoll ist, hier lediglich arithmetisch vorzugehen.

Als Grund für diese kritische Hinterfragung der Vorgehensweise insgesamt gerade an dieser Stelle ist sicherlich anzusehen, dass der Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* zunächst mit relativ schwachen Mindestanforderungen versehen ist und dann darauf aufbauend auf der Ebene der Qualifizierung der Anforderungen in der Bewertungsskala eine deutlich zu optimistische Einschätzung erfolgt.

Aus Sicht der ESchT erscheint es wenig überzeugend, die *Bautechnische Machbarkeit* insgesamt als „günstig“ zu deklarieren, wenn die Realisierungsmöglichkeit der HAA-Lagerstollen im Teufenbereich 600 – 900 m nur das Attribut „bedingt günstig“ erhält und hier die Realisierung schon fraglich ist angesichts der vorgegebenen Randbedingungen (Kontursicherung mit Felsankern/Verzugsmatten zur Gewährleistung der Standsicherheit, keine große Konturentfestigung erlaubt zur Gewährleistung des Erhalts der geogenen Barrierenintegrität). Mitunter wird von der Nagra im Zusammenhang mit der Teufenlage des Opalinustons auch davon gesprochen, dass er im Standortgebiet sehr tief liege und somit bautechnisch sehr anspruchsvoll sei (Nagra 2008c, S. 348, Standortgebiet Nördlich Lägeren). Allerdings wird nicht ausgeführt, was unter „*sehr anspruchsvoll*“ zu verstehen ist, wie dieser Qualifizierung mit den nur begrenzten zugelassenen bautechnischen Mitteln begegnet werden soll und welche Risiken für die Realisierung bestehen auch angesichts der Streubreiten in den Gesteins- bzw. Gebirgseigenschaften.

Diese kritische Haltung zu der quantitativen Mittelwertbildung und der damit verbundenen Glättung wenig vorteilhafter Eigenschaften ist auf die Kriteriengruppe 4 beschränkt und ergibt sich aus der Tatsache, dass in einem Kriterium dieser Kriteriengruppe bei zwei von insgesamt vier Indikatoren möglicherweise eine sehr optimistische bis vielleicht unrealistisch optimistische Einschätzung zum Gebirgstragvermögen erfolgt ist.

Möglicherweise wäre es zielführender gewesen, die Teufenlage mit den mindestens erforderlichen repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeiten direkt zu verknüpfen und dann daraus ein Kriterium mit Mindestanforderungen (Ausschlusskriterium) und weitergehend dann skalierten Anforderungen zu entwickeln (AKEnd 2002). Damit wäre in dem Verfahrensschritt eine fachlich einwandfreie und transparente, insgesamt aber dann komplexere Bewertungsgrundlage gegeben. Nicht ausgeschlossene Gebiete nach Schritt 3 würden dann hinsichtlich der bautechnischen Machbarkeit bereits teufenbezogene Mindestanforderungen erfüllen, so dass auch für die nachfolgenden Verfahrensschritte die ungewichtete Agglomeration gerade mit der dann gegenseitigen Kompensationsfähigkeit von mit „weniger günstig“ und „günstig“ bewerteten Indikatoren / Kriterien tolerabel erschiene.

Aus dieser eher zurückhaltenden und schon auch kritischen Bewertung zu den felsmechanischen Einschätzungen der Nagra bezüglich des ausgewählten Wirtsgesteins Opalinuston im Hinblick auf die Realisierbarkeit einer Lagerstollentiefe > 600 m in Verbindung mit den vorgegebenen Randbedingungen ergeben sich für das Standortauswahlverfahren nachstehende alternative Konsequenzen:

- (a) Beibehaltung der Tiefenlagerkonzeption Reduzierung der Teufe nlage → Konsequenz: Einschränkung der räumlichen Ausdehnung der ausgewiesenen Standortgebiete auf Bereiche mit einer HAA-Lagerteufe von maximal 600 m.
- (b) Beibehaltung der Teufenlage 900 m → Modifizierung der Tiefenlagerkonzeption → Konsequenz: Überarbeitung des gegenwärtigen Endlagerkonzeptes für das HAA-Tiefenlager im Hinblick auf die Einbeziehung alternativer Ausbaukonzepte mit einem deutlich verstärkten und flächenhaft wirkenden tragenden Ausbau (Verbundsystem Gebirge-Ausbau).

Im Fall (a) wäre zu prüfen, inwieweit die verbleibenden Standortgebietsflächen noch hinreichend Handlungsraum für die Positionierung eines HAA-Tiefenlagers aufweisen. Da nicht auszuschließen ist, dass in Gebirgsbereichen mit reduziertem Tragvermögen lokal bzw. zonal ein verstärkter Ausbau vorzusehen ist, wäre weiterhin zu prüfen, ob ein derartiges Tiefenlagerkonzept mit dem bisher geführten Langzeitsicherheitsnachweis noch kompatibel ist. Im Fall (b) wäre zu prüfen, ob alternative Ausbaukonzepte entwickelt werden können im Rahmen des bestehenden Langzeitsicherheitsnachweises oder ob der Langzeitsicherheitsnachweis zu ergänzen wäre. Die Änderung des Ausbaukonzeptes könnte Einfluss haben auf langzeitsicherheitsrelevante Aspekte wie z.B. das geochemische Milieu, die Radionuklidfreisetzung, die Gasbildungsrate, das Quellverhalten von Buffermaterial (Bentonit) und anstehendem Tongestein, die Wirkung des Quelldrucks auf das konturnahe Gebirge sowie die Rückbildung von technogen induzierten Wegsamkeiten in der Auflockerungszone.

Ein nachhaltiger Einfluss auf das Einengungsverfahren mit den von der Nagra identifizierten Standortgebieten selbst wird trotz dieser kritischen Anmerkungen zu der bautechnischen Machbarkeit nicht erwartet. Die relative Zuordnung der in die Schritte 4 und 5 des Auswahlverfahrens einbezogenen bevorzugten Wirtsgesteine und der kriteriengesteuert abgeleiteten bevorzugten Standortgebiete dürfte sich auch bei einer Überarbeitung des Standortauswahlverfahrens nicht ändern. Grundsätzlich sind keine neuen Gebiete über die bereits benannten Gebiete hinaus zu erwarten. Allerdings dürften sich flächenmäßig erheblich kleinere Standortgebiete ergeben.

**Anhang B Indikatoren zur Bewertung der verschiedenen Kriterien**

In der nachfolgenden Tabelle sind die einzelnen Indikatoren zusammengefasst. Die Zahlen zeigen jeweils an, in welchen der fünf Schritten der Etappe 1 die Indikatoren zur Bewertung herangezogen werden. Die Bezeichnung der Indikatoren ist zum Teil abgekürzt worden.

**Tabelle 3:** Zuordnung der Indikatoren zur Bewertung der verschiedenen Kriterien in den Schritten 3 bis 5 der Etappe 1

Kriteriengruppe	Eigenschaften des WG bzw. des EG				Langzeitstabilität				Zuverlässigkeit der geologischen Aussage			Bautechnische Eignung	
	Indikator	räumliche Ausdehnung	hydraulische Barrierenwirkung	geochemische Bedingungen	Freisetzungspfade	Beständigkeit	Erosion	Lagerbedingte Einflüsse	Nutzungskonflikte	Charakterisierbarkeit der Gestein	Explorierbarkeit	Prognostizierbarkeit	Felsmechanische Eigenschaften
1 Tiefenlage bez. Bautechnik	4,5											4,5	
2 Tiefenlage bez. Dekompaktion	5	5											
3 Tiefenlage bez. flächenhafter Erosion	4,5					5							
4 Tiefenlage bez. glaziale Tiefenerosion	5					5							
5 Mächtigkeit	4,5												
6 Abstand zu regionalen Störungszonen	5				5								
7 Laterale Ausdehnung	3,4,5												
8 Platz untertage	5												
9 Hydraulische Durchlässigkeit		4,5											
10 Grundwasserstockwerke		5											
11 Mineralogie			4,5										
12 pH			4,5										
13 Redox			4,5										
14 Salinität			4,5										

Kriteriengruppe	Eigenschaften des WG bzw. des EG				Langzeitstabilität				Zuverlässigkeit der geologischen Aussage			Bautechnische Eignung		
	Kriterium	räumliche Ausdehnung	hydraulische Barrierenwirkung	geochemische Bedingungen	Freisetzungspfade	Beständigkeit	Erosion	Lagerbedingte Einflüsse	Nutzungskonflikte	Charakterisierbarkeit der Gestein	Explorierbarkeit	Prognostizierbarkeit	Felsmechanische Eigenschaften	Untertäg. Erschließung u. Wasserhalt
15 Mikrobielle Prozesse			4,5											
16 Kolloide			4,5											
17 Transportpfade /Porenraum				4,5										
18 Homogenität				4,5										
19 Länge d. Freisetzungspfade				5										
20 Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade				4,5										
21 Tongehalt		4		4										
22 Selbstabdichtungsvermögen				4,5	4,5		4							
23 Modellvorstellungen zur Geodynamik und Tektonik					3,5						3,5			
24 Seismizität					3,5									
25 Modellvorstellungen zur Geochemie					3									
26 Seltene geologische Ereignisse					3,5									
27 Potential neuer Wasserwegsamkeiten					4,5									
28 Großräumige Erosion						3,5								
29 Auflockerungszone im Nahbereich							4,5							
30 Chemische Wechselwirkungen (pH Fahne)							4,5							

Kriteriengruppe	Eigenschaften des WG bzw. des EG				Langzeitstabilität				Zuverlässigkeit der geologischen Aussage			Bautechnische Eignung	
	Kriterium	räumliche Ausdehnung	hydraulische Barrierenwirkung	geochemische Bedingungen	Freisetzungspfade	Beständigkeit	Erosion	Lagerbedingte Einflüsse	Nutzungskonflikte	Charakterisierbarkeit der Gestein	Explorierbarkeit	Prognostizierbarkeit	Felsmechanische Eigenschaften
O <sub>2</sub> -Oxidation)													
31 Verhalten Wirtsgestein bez. Gas							4,5						
32 Verhalten Wirtsgestein bez. Temperatur							4,5						
33 Rohstoffvorkommen innerhalb Wirtsgestein								4,5					
34 Rohstoffvorkommen unterhalb Wirtsgestein								5					
35 Rohstoffvorkommen oberhalb Wirtsgestein								5					
36 Mineralquellen Thermen								5					
37 Geothermie								5					
38 diffus gestörte Zonen	5								4,5				
39 Variabilität der Gesteinseigenschaften									4,5				
40 Erfahrungen									4,5				
41 Regionales Störungsmuster										3			
42 Kontinuität der Schichten										3,5			
43 Explorationsverhältnisse im Untergrund										4,5			
44 Explorationsverhältnisse an der Oberfläche										5			
45 tektonisches Regime	5					5							

Kriteriengruppe	Eigenschaften des WG bzw. des EG				Langzeitstabilität				Zuverlässigkeit der geologischen Aussage			Bautechnische Eignung	
	Indikator	räumliche Ausdehnung	hydraulische Barrierenwirkung	geochemische Bedingungen	Freisetzungspfade	Beständigkeit	Erosion	Lagerbedingte Einflüsse	Nutzungskonflikte	Charakterisierbarkeit der Gestein	Explorierbarkeit	Prognostizierbarkeit	Felsmechanische Eigenschaften
46 Evidenzen Langzeitisolation		4									4,5		
47 Gesteinsfestigkeiten												4,5	
48 Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Formationen													5
49 Natürliche Gasführung im Wirtsgestein													5

**Anhang C Anwendung der Indikatoren in den Einengungsschritten**

In der nachfolgenden Tabelle wird die Anwendung der Indikatoren in den drei Schritten der Einengungsprozedur dargestellt. Mit den Abkürzungen MA, VA und BS werden Mindestanforderungen, verschärfte Anforderungen bzw. Bewertungsskala bezeichnet.

**Tabelle 4:** Anwendung der Indikatoren in den drei Einengungsschritten der Etappe 1

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikatoren	Schritt 3: Identifizierung der Großräume	Schritt 4: Bewertung der Wirtsgesteine	Schritt 5: Identifikation von potenziellen Standortgebieten
<b>1 Eigenschaften des WG/EG</b>					
	1.1 - Räumliche Ausdehnung	<i>Laterale Ausdehnung</i> <i>Mächtigkeit</i> <i>Platzangebot untertags</i> <i>Diffus gestörte Zonen</i> <i>Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)</i>	MA-BS	MA MA	MA-VA MA-VA-BS VA-BS VA VA
	1.2 - Hydraulische Barrierenwirkung	<i>Hydraulische Durchlässigkeit</i> <i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion</i> <i>Grundwasserstockwerke</i>		MA-VA-BS	BS  MA-VA-BS BS
	1.3 - Geochemische Bedingungen	<i>Mineralogie</i> <i>pH</i> <i>Redox-Bedingungen</i> <i>Salinität</i> <i>Mikrobielle Prozesse</i> <i>Kolloide</i>		BS BS BS BS BS BS	BS BS MA-BS BS BS BS
	1.4 – Freisetzungspfade	<i>Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums</i> <i>Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade</i> <i>Selbstabdichtungsvermögen</i> <i>Homogenität des Gesteinsaufbau</i>		BS  MA-BS  BS (VA)-BS	BS  BS  BS BS

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikatoren	Schritt 3: Identifizierung der Großräume	Schritt 4: Bewertung der Wirtsgesteine	Schritt 5: Identifikation von potenziellen Standortgebieten
		<i>Länge der Freisetzungspfade</i>			
<b>2 Langzeitstabilität</b>					
	2.1 - Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	<i>Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik</i> <i>Seismizität</i> <i>Seltene geologische Ereignisse</i> <i>Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)</i>	MA-BS  MA-BS	MA-BS	BS  BS BS MA-BS
	2.2 - Erosion	<i>Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum</i> <i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion</i> <i>Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion</i>	MA-BS	MA  MA	BS  MA-BS  MA-VA-BS
	2.3 - Lagerbedingte Einflüsse	<i>Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten</i> <i>Chemische Wechselwirkungen</i> <i>Verhalten des Wirtsgesteins bezüglich Gas</i> <i>Verhalten des Wirtsgesteins bezüglich Temperatur</i>		BS  BS BS BS	BS  BS BS BS
	2.4 - Nutzungskonflikte	<i>Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtsgesteins</i> <i>Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtsgesteins</i> <i>Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtsgesteins</i> <i>Mineralquellen und Thermen</i> <i>Geothermie</i>		MA-BS	MA-BS  BS BS MA-BS BS

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikatoren	Schritt 3: Identifizierung der Grossräume	Schritt 4: Bewertung der Wirtsgesteine	Schritt 5: Identifikation von potenziellen Standortgebieten
<b>3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen</b>					
	3.1. – Charakterisierbarkeit der Gesteine	<i>Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit Erfahrungen</i>		VA-BS  BS	BS  BS
	3.2 - Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	<i>Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse Kontinuität der interessierenden Schichten Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund Explorationsbedingungen an der Oberfläche</i>	MA-BS  BS	  BS	  BS  BS  MA-BS
	3.3 – Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	<i>Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation</i>	MA-BS	  BS	BS  BS
<b>4 Bautechnische Eignung</b>					
	4.1 - Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	<i>Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit</i>		MA-BS  MA	BS  MA-VA-BS
	4.2 - Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	<i>Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen Natürliche Gasführung (im Wirtsgestein)</i>			BS  MA-BS