



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK  
Division principale de la sécurité des installations nucléaires DSN  
Divisione principale della sicurezza degli impianti nucleari DSN  
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate HSK



## Sachplan geologische Tiefenlager

**Herleitung, Beschreibung und Anwendung der  
sicherheitstechnischen Kriterien für die  
Standortevaluation**



HSK 33/001

## Sachplan geologische Tiefenlager

---

# **Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation**

---

November 2007

**Herausgeber**

Hauptabteilung für die Sicherheit  
der Kernanlagen (HSK)

CH-5232 Villigen-HSK

Telefon ++41(0)56 310 38 11

Telefax ++41(0)56 310 39 95

**Zu beziehen bei**

Hauptabteilung für die Sicherheit  
der Kernanlagen

Informationsdienst

CH-5232 Villigen-HSK

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Prinzipien, Grundsätze und gesetzliche Vorgaben zur Sicherheit und technischen Machbarkeit geologischer Tiefenlager .....</b>	<b>7</b>
2.1	Internationale Prinzipien und Grundsätze.....	7
2.2	Anforderungen gemäss Kernenergiegesetz .....	9
2.3	Anforderungen gemäss Kernenergieverordnung.....	10
2.4	Anforderungen gemäss Richtlinie HSK-R-21.....	11
<b>3</b>	<b>Umsetzung der Anforderungen in einem Sicherheitskonzept .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Herleitung sicherheitstechnischer Kriterien für die Standortevaluation .....</b>	<b>17</b>
4.1	Herleitung der Kriterien .....	17
4.2	Erläuterung der Kriterien.....	18
<b>5</b>	<b>Anwendung der Kriterien bei der Standortevaluation .....</b>	<b>23</b>
5.1	Etappe 1: Auswahl von potenziellen Standortgebieten.....	23
5.2	Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten .....	30
5.3	Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren .....	31
	<b>Abkürzungen und Begriffsbestimmungen.....</b>	<b>34</b>
	<b>Referenzen .....</b>	<b>36</b>
	<b>Anhang I: Safety Requirements for Geological Disposal.....</b>	<b>38</b>
	<b>Anhang II: Site Selection Guidelines.....</b>	<b>41</b>
	<b>Anhang III: Joint Convention .....</b>	<b>42</b>
	<b>Anhang IV: Stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen von der Etappe 1 zur Etappe 3 .....</b>	<b>46</b>

# 1 Einleitung

Oberstes Ziel bei der Entsorgung der radioaktiven Abfälle ist, die Abfälle langfristig und sicher von der Umwelt zu isolieren. Weltweit ist anerkannt, dass für die hochaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle nur die geologische Tiefenlagerung in stabilen Gesteinseinheiten die Sicherheit über die notwendigen, langen Zeiträume gewährleisten kann. Dieser Grundsatz ist im Kernenergiegesetz (KEG) verankert und gilt in der Schweiz für alle Kategorien von radioaktiven Abfällen, die in Kernanlagen anfallen oder an die Sammelstelle des Bundes am Paul Scherrer Institut abgeliefert werden (Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung). Das Kernenergiegesetz schreibt geologische Tiefenlager für die Entsorgung aller solcher radioaktiven Abfälle vor.

Gemäss Kernenergieverordnung (KEV) legt der Bund in einem Sachplan die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern für die Behörden verbindlich fest. Der Sachplan ist ein im Raumplanungsgesetz (RPG) vorgesehenes Planungsinstrument des Bundes für gesamtschweizerisch bedeutungsvolle Vorhaben. Der Sachplan Geologische Tiefenlager hat zum Ziel, das Vorgehen und die Kriterien sowie ihre Anwendung für das Standortauswahlverfahren festzulegen und den frühzeitigen Einbezug betroffener Kantone, Gemeinden und anderer Interessensgruppierungen sicherzustellen. Mit dem Sachplan soll eine auf die Sicherheit fokussierte, mit den Raumplanungszielen des Bundes und der Kantone abgestimmte Wahl von Standorten für die benötigten geologischen Tiefenlager erreicht werden.

Die Ausarbeitung des Sachplans geologische Tiefenlager erfolgt durch das Bundesamt für Energie (BFE) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). Der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) kommt die Aufgabe zu, die im Auswahlverfahren anzuwendenden sicherheitstechnischen Kriterien festzulegen. Diese sind im vorliegenden Dokument dargelegt. Das Dokument wurde von der HSK mit Einbezug der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) erarbeitet. Es legt dar, welche sicherheitstechnischen Kriterien bei der Auswahl potenzieller Standortregionen und Standorte für geologische Tiefenlager zur Anwendung kommen, wie diese von den Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung von Vorschlägen zu berücksichtigen sind und wie sie bei der Prüfung und Beurteilung der Vorschläge durch die Behörden verwendet werden.

Das vorliegende Dokument richtet sich zum einen an den Projektanten geologischer Tiefenlager (Entsorgungspflichtige). Zum anderen soll es allen involvierten Stellen, Behörden und der breiten Öffentlichkeit einen Einblick in die Thematik der geologischen Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle geben und die gesetzlichen Vorgaben, die Herleitung der Kriterien und das Vorgehen bei der Auswahl potenzieller Standortgebiete und Standorte transparent und nachvollziehbar machen.

Dem heutigen Entsorgungskonzept entsprechend sind zwei geologische Tiefenlager nötig. Das eine dient der Entsorgung der hochaktiven und der alphanotoxischen Abfälle (HAA und ATA gemäss Definition der Kernenergieverordnung) in einem HAA-Lager. Das zweite Tiefenlager ist für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA-Lager). Es besteht auch die Möglichkeit, beide Tiefenlager am selben Standort zu erstellen.

Wie im Konzeptteil des Sachplans Geologische Tiefenlager (BFE 2006, 2007) dargelegt, besteht das Auswahlverfahren aus folgenden drei Etappen:

- **Etappe 1:** Auswahl von geologischen Standortgebieten je für HAA und SMA

Nach der Festlegung des Abfallinventars und der darauf basierenden Spezifizierung der Anforderungen an die Geologie evaluieren die Entsorgungspflichtigen mögliche Standortgebiete aufgrund klar definierter sicherheitstechnischer und geologischer Kriterien, schlagen geeignete Gebiete je für HAA- und SMA-Lager vor und begründen diese in einem Bericht zuhanden des BFE. Die vorgelegte Auswahl wird von den Behörden überprüft und bei positiver Beurteilung vom Bundesrat genehmigt und in den Sachplan als *Vororientierung* aufgenommen.

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

Etappe 2 dient der Auswahl von mindestens zwei Standorten je für HAA- und SMA-Lager. Dabei hat die sicherheitstechnische Bewertung höchste Priorität. Die Entsorgungspflichtigen ergänzen dazu die in Etappe 1 vorgenommene kriterienbezogene Bewertung von Sicherheit und Geologie durch quantitative provisorische Sicherheitsanalysen und führen einen sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte durch. Unter Federführung des BFE und ARE werden ferner für jeden Standort in Zusammenarbeit mit den Standortkantonen und Standortregionen die raumplanerischen und sozioökonomischen Grundlagen erarbeitet und bewertet. Auf der Basis der Gesamtbewertung schlagen die Entsorgungspflichtigen mindestens je zwei geeignete Standorte für HAA- und SMA-Lager vor. Die Auswahl wird von den Behörden überprüft und bei positiver Beurteilung vom Bundesrat genehmigt und in den Sachplan als *Zwischenergebnis* aufgenommen.

- **Etappe 3:** Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren für HAA und SMA

In dieser Etappe wählen die Entsorgungspflichtigen je für HAA und SMA den Standort, an welchem das geologische Tiefenlager realisiert werden soll und bereiten dafür ein Rahmenbewilligungsgesuch vor. Die erforderlichen Unterlagen für das Rahmenbewilligungsgesuch umfassen u.a. einen vergleichenden Bericht zur Begründung der Standortwahl, einen Sicherheitsbericht und einen Umweltverträglichkeitsbericht. Um die Wahl des Standortes treffen und begründen zu können, müssen die grundsätzlichen geologischen Kenntnisse der Standorte auf einem für den Vergleich erforderlichen Kenntnisstand sein. Falls nötig sind dazu die Kenntnisse der Standorte mit weiteren erdwissenschaftlichen Untersuchungen zu ergänzen. Das Rahmenbewilligungsgesuch wird von den Behörden überprüft und vom Bundesrat und der Bundesversammlung genehmigt. Der Entscheid untersteht dem fakultativen nationalen Referendum.

Das vorliegende Dokument zeigt im folgenden auf, welche sicherheitstechnischen Kriterien bei diesem etappierten Vorgehen zu berücksichtigen sind, auf welche Grundlagen sie sich abstützen, wie sie hergeleitet wurden und wie sie bei der Standortevaluation angewendet werden. Das Dokument ist entsprechend in folgende fünf Kapitel gegliedert:

Nach der Einleitung und Darlegung der Zielsetzungen folgt in Kap. 2 eine Zusammenstellung der Prinzipien, Grundsätze und Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung, wie sie international ausgearbeitet (International Commission on Radiological Protection ICRP, Inter-

national Atomic Energy Agency IAEA, Joint Convention) und in der schweizerischen Gesetzgebung (KEG, KEV) und dem Regelwerk der Aufsichtsbehörde, der Richtlinie HSK-R-21 (HSK 1993) festgelegt wurden. Kapitel 3 zeigt anschliessend auf, wie die Anforderungen im Sicherheitskonzept der geologischen Tiefenlager umgesetzt werden. In Kap. 4 wird dargelegt, wie - unter Berücksichtigung der gesetzlichen Anforderungen und unter Einbezug der Sicherheitskonzepte der verschiedenen geologischen Tiefenlager - die bei der Standortwahl zu berücksichtigenden sicherheitstechnischen Kriterien hergeleitet werden. In Kap. 5 wird schliesslich aufgezeigt, wie die Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit in den Etappen 1, 2 und 3 bei der Erarbeitung bzw. der Beurteilung von Standortvorschlägen angewendet werden.

## **2 Prinzipien, Grundsätze und gesetzliche Vorgaben zur Sicherheit und technischen Machbarkeit geologischer Tiefenlager**

Bezüglich der Sicherheit von geologischen Tiefenlagern gibt es eine Anzahl von Prinzipien, Grundsätzen und Anforderungen, welche den Ausgangspunkt für die Herleitung sicherheitstechnischer Kriterien für die Standortevaluation bilden. Sie können hierarchisch wie folgt gegliedert werden:

- International anerkannte Prinzipien, Grundsätze und Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle (Empfehlungen der internationalen Strahlenschutz-Kommission ICRP sowie Safety Standards der internationalen Atomenergie-Agentur IAEA, insbesondere Safety Fundamentals und Safety Requirements).
- Verpflichtungen des internationalen, von der Schweiz ratifizierten Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (Joint Convention, 1997).
- Im Kernenergiegesetz (KEG) festgelegte Grundsätze und Anforderungen an die Sicherheit, Auslegung und Standortwahl geologischer Tiefenlager.
- In der Kernenergieverordnung (KEV) festgehaltene Bestimmungen und Anforderungen.
- In der Richtlinie HSK-R-21 in Form von Schutzziele niedergelegten Anforderungen an das Gesamtsystem.
- In der Richtlinie HSK-R-21 aufgeführten Hinweisen und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis.

### **2.1 Internationale Prinzipien und Grundsätze**

Die ICRP hat als hochstehendes internationales Fachgremium auf dem Gebiet des Strahlenschutzes in ihrer Publikation 81 (ICRP 2000) quantitative radiologische Schutzziele für die geologische Tiefenlagerung definiert. Diese Schutzziele werden als Dosis- oder Risiko-Richtwerte von der IAEA in ihren Regelwerken übernommen.

Im grundlegenden Dokument der IAEA zur Entsorgung radioaktiver Abfälle (Safety Fundamentals, No. 111-F, 1995) sind folgende neun Prinzipien definiert:

### Prinzipien der Entsorgung radioaktiver Abfälle (IAEA Safety Fundamentals, 1995)

- Prinzip 1:** Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass der Schutz des Menschen sichergestellt wird.
- Prinzip 2:** Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass der Schutz der Umwelt gewährleistet wird.
- Prinzip 3:** Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass mögliche grenzübergreifende Auswirkungen auf Mensch und Umwelt berücksichtigt sind.
- Prinzip 4:** Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass die erwarteten Auswirkungen auf die Gesundheit zukünftiger Generationen nicht grösser sind als jene, die heute zulässig sind.
- Prinzip 5:** Radioaktive Abfälle sind so zu entsorgen, dass den zukünftigen Generationen keine unzumutbare Last auferlegt wird.
- Prinzip 6:** Die Entsorgung radioaktiver Abfälle ist durch eine geeignete nationale Gesetzgebung mit klarer Zuweisung der Verantwortlichkeiten und Sicherstellung einer unabhängigen behördlichen Aufsicht zu regeln.
- Prinzip 7:** Die Erzeugung radioaktiver Abfälle ist so klein wie möglich zu halten.
- Prinzip 8:** Bei allen Schritten der Erzeugung und Entsorgung radioaktiver Abfälle sind die gegenseitigen Abhängigkeiten angemessen zu berücksichtigen.
- Prinzip 9:** Die Sicherheit der Anlagen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle ist während deren Lebensdauer angemessen zu gewährleisten.

In einem weiteren, kürzlich verabschiedeten Dokument der IAEA (Safety Requirements, No. WS-R-4, 2006) werden das Sicherheitsziel und die zugehörigen Kriterien für die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle auf internationaler Ebene wie folgt festgelegt:

### Ziel und Kriterien der geologischen Tiefenlagerung (IAEA Safety Requirements, 2006)

- Ziel:** Geologische Tiefenlager sind so zu platzieren, auszulegen, zu bauen, zu betreiben und zu verschliessen, dass nach Verschluss der Anlage der Schutz unter Berücksichtigung von sozialen und wirtschaftlichen Faktoren optimiert ist und eine angemessene Zuversicht gewährleistet wird, dass die Strahlendosen oder Risiken für die Bevölkerung auch langfristig die für die Auslegung verwendeten Werte nicht überschreiten.
- Kriterien:** Der Dosisgrenzwert für Personen der Bevölkerung beträgt 1 mSv pro Jahr und muss alle Expositionen aus menschlichen Tätigkeiten abdecken. Dieser Grenzwert oder sein Risiko-Äquivalent gilt als Kriterium, das auch in Zukunft nicht überschritten werden darf. Um diesen Dosisgrenzwert einzuhalten, ist ein geologisches Tiefenlager (als eine Expositionsquelle) so auszulegen, dass die zu erwartende mittlere Dosis oder das mittlere Risiko für eine Person der Bevölkerung, welche in Zukunft durch die radiologischen Auswirkungen aus dem Lager betroffen werden könnte, einen Dosisrichtwert von nicht mehr als 0.3 mSv pro Jahr oder einen Risiko-Richtwert von  $10^{-5}$  pro Jahr nicht überschreitet. Es ist erkannt, dass zukünftige Strahlendosen an Einzelpersonen nur abgeschätzt werden können und dass die Unsicherheiten, die mit diesen Schätzungen verbunden sind, für Zeiten weit in die Zukunft zunehmen. Es ist Vorsicht bei der Anwendung dieser Kriterien für Zeiträume geboten, für welche die Ungewissheiten so gross werden, dass die Kriterien nicht mehr als vernünftige Entscheidungsbasis dienen können.

Im letztgenannten IAEA Dokument finden sich ferner detailliertere Anforderungen (Safety Requirements) an die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung, die in Anhang I (auf Englisch) zusammengestellt sind.

Die IAEA hat auch Leitlinien zur Standortwahl für geologische Tiefenlager publiziert (Safety Guide, No. 111-G-4.1, 1994). Die für die Standortevaluation massgebenden Kriterien betreffen die geologische Beschaffenheit des Standortes, die Hydrogeologie, die Hydrochemie, zukünftige natürliche Veränderungen, mögliche menschliche Einwirkungen, Bau- und Auslegungsfragen, Erschliessung und Transportaspekte, Umwelt- und Nutzungsfragen sowie gesellschaftliche und sozioökonomische Auswirkungen der geologischen Tiefenlagerung. Die Leitlinien (Guidelines) sind in Anhang II (auf Englisch) zusammengestellt.

Mit der Ratifizierung der so genannten Joint Convention hat sich die Schweiz verpflichtet, die darin enthaltenen international anerkannten Vorschriften und Sicherheitsanforderungen in ihrer Gesetzgebung umzusetzen. Die wesentlichsten Bestimmungen der Joint Convention betreffend die Entsorgung der radioaktiven Abfälle sind in Anhang III aufgeführt. Bei der Erarbeitung der neuen Kernenergiegesetzgebung (KEG und KEV) wurden die Bestimmungen der Joint Convention berücksichtigt.

## **2.2 Anforderungen gemäss Kernenergiegesetz**

Die Bestimmungen des KEG und der zugehörigen KEV betreffend die geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle beruhen auf den Empfehlungen, welche die Expertengruppe EKRA im ihrem Schlussbericht (EKRA 2000) abgegeben hatte. Im KEG sind bezüglich Sicherheit und Umsetzung der Entsorgung radioaktiver Abfälle folgende Anforderungen festgehalten:

- Die radioaktiven Abfälle sind grundsätzlich in der Schweiz zu entsorgen (Art. 30), Ausnahmen sind möglich (Art. 34).
- Alle radioaktiven Abfälle sind in geologischen Tiefenlagern zu entsorgen (Art. 31).
- Der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt muss durch passive Barrieren sichergestellt werden (Art. 3, 13, 16, 20 und 30).
- Es darf kein Verstoß gegen die Bundesgesetzgebung (Umwelt-, Natur- und Heimatschutz, Raumplanung) bestehen (Art. 13 und 16).
- Nach Abschluss der Einlagerung der radioaktiven Abfälle muss das Tiefenlager während eines längeren Zeitraumes überwacht werden, bevor es verschlossen wird (Art. 3 und 39).
- Die Rückholbarkeit der Abfälle bis zu einem allfälligen Verschluss muss ohne grossen Aufwand möglich sein (Art. 37).
- Zur Gewährleistung der Sicherheit sind alle Vorkehrungen zu treffen, die nach der Erfahrung und dem Stand von Wissenschaft und Technik notwendig sind (Art. 4). Dies umfasst auch Schutzmassnahmen nach international anerkannten Grundsätzen (Art. 5).
- Die Ergebnisse der erdwissenschaftlichen Untersuchungen müssen die Eignung des Standortes bestätigen (Art. 13).

- In der Rahmenbewilligung werden Kriterien festgelegt, bei deren Nichterfüllung ein vorgesehener Lagerbereich wegen fehlender Eignung ausgeschlossen wird (Art. 14).

## 2.3 Anforderungen gemäss Kernenergieverordnung

In Hinblick auf die Standortwahl und die Auslegung geologischer Tiefenlager sind in der KEV folgende Anforderungen festgehalten:

- Der Standort für ein geologisches Tiefenlager muss zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit folgende Eigenschaften aufweisen (Art. 11, Abs. 1):
  - Ausreichende Ausdehnung von geeignetem Wirtgestein
  - Günstige hydrogeologische Verhältnisse
  - Geologische Langzeitstabilität
- Ein geologisches Tiefenlager ist so auszulegen (Art.10 und 11), dass
  - die Langzeitsicherheit durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet wird,
  - die Sicherheitsfunktionen nach den Grundsätzen der Redundanz und der Diversität erfolgen,
  - Vorkehrungen zur Erleichterung von Überwachung und Reparaturen des Lagers oder zur Rückholung der Abfälle die passiven Sicherheitsbarrieren nach dem Verschluss nicht beeinträchtigen und
  - das Lager innert einiger Jahre verschlossen werden kann.
- Der Gesuchsteller hat für eine Rahmenbewilligung für ein geologisches Tiefenlager zusätzlich zu den Gesuchsunterlagen nach Art. 23 einen Bericht mit folgenden Angaben einzureichen (Art.62):
  - einen Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich der Sicherheit des geplanten Tiefenlagers,
  - eine Bewertung der für die Auswahl des Standortes ausschlaggebenden Eigenschaften und
  - die Höhe der zu erwartenden Kosten.
- Ein geologisches Tiefenlager besteht aus folgenden drei Elementen (Art.64, 65 und 66):
  - dem Hauptlager zur Aufnahme der radioaktiven Abfälle,
  - dem Pilotlager, in welchem das Verhalten der Abfälle, der technischen Barrieren und des Wirtgesteins bis zum Ablauf der Beobachtungsphase überwacht wird, und
  - verschiedenen Testbereichen, in welchen die sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wirtgesteins zur Erhärtung des Sicherheitsnachweises vertieft abzuklären sind.
- Nach Art. 69 hat der Eigentümer eines geologischen Tiefenlagers beim Verschluss sämtliche noch offene Teile des Lagers zu verfüllen und die für die Langzeitsicherheit massgebenden Teile zu versiegeln. Mit dem Verschluss hat er insbesondere zu gewährleisten, dass
  - keine unzulässige Freisetzung von Radionukliden über die verfüllten Zugänge erfolgt,

- die vor der Errichtung des Tiefenlagers bestehende Trennung der wasserführenden Gesteinsschichten langfristig wieder hergestellt wird, und
- die Markierung des geologischen Tiefenlagers dauerhaft ist.

## 2.4 Anforderungen gemäss Richtlinie HSK-R-21

Neben den in den vorangehenden Abschnitten aufgelisteten qualitativen Anforderungen der Kernenergiegesetzgebung muss ein geologisches Tiefenlager auch die quantitativen Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21 erfüllen. Diese Richtlinie wurde vor der neuen Kernenergiegesetzgebung erarbeitet und spricht die Endlagerung anstelle des neu eingeführten Begriffs der geologischen Tiefenlagerung an. Gemäss KEV Art. 11 ist die HSK beauftragt, spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager in Richtlinien zu regeln. Eine entsprechende neue Richtlinie G03 ist gegenwärtig in Bearbeitung und wird die Richtlinie HSK-R-21 ersetzen. Die nachfolgend aufgeführten Schutzziele der gegenwärtigen HSK-R-21 werden beibehalten.

### Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21

**Schutzziel 1:** Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Endlager infolge realistischerweise anzunehmender Vorgänge und Ereignisse soll zu keiner Zeit zu jährlichen Individualdosen führen, die 0.1 mSv übersteigen.

**Schutzziel 2:** Das aus einem verschlossenen Endlager infolge unwahrscheinlicher, unter Schutzziel 1 nicht berücksichtigter Vorgänge und Ereignisse zu erwartende radiologische Todesfallrisiko für eine Einzelperson soll zu keiner Zeit ein Millionstel pro Jahr übersteigen.

**Schutzziel 3:** Nach dem Verschluss eines Endlagers sollen keine weiteren Massnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit erforderlich sein. Das Endlager soll innert einiger Jahre verschlossen werden können.

Die Dosislimite gilt unabhängig vom Ort, wo die Dosis entsteht; insbesondere gilt sie auch für das angrenzende Ausland. Die strenge Dosisbegrenzung auf 0.1 mSv/Jahr ist zu vergleichen mit der permanenten und unvermeidbaren jährlichen individuellen Strahlenexposition aus natürlichen (kosmischen und terrestrischen) Quellen sowie der körpereigenen Radioaktivität. Die Dosis aufgrund dieser natürlich vorhandenen Strahlenquellen beträgt pro Person in der Schweiz im Mittel rund 3.4 mSv/Jahr. Die festgelegte Dosislimite für die geologische Tiefenlagerung beträgt also nur wenige Prozente der natürlichen Strahlenexposition; sie ist auch klein im Vergleich zu den örtlichen Schwankungen der natürlichen Strahlenexposition. Eine Dosis von 0.1 mSv/Jahr entspricht zudem nur einem Zehntel des in Art. 37 der Strahlenschutzverordnung festgelegten Grenzwertes für nichtberuflich strahlenexponierte Personen. Im internationalen Vergleich ist diese Limite tief angesetzt; ICRP und IAEA empfehlen 0.3 mSv/Jahr (vgl. Abschnitt 2.1). Eine Strahlenexposition, die zu einer Personendosis von 0.1 mSv pro Jahr führen würde, stellt auch keine Gefährdung für Tiere und Pflanzen dar.

Bei der Standortwahl und der Auslegung geologischer Tiefenlager sowie für den Sicherheitsnachweis sind ferner die folgenden Hinweise aus der Richtlinie HSK-R-21 zu berücksichtigen:

- Eine geeignete Standortwahl ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass für ein geologisches Tiefenlager die Sicherheit erreicht und der entsprechende Nachweis erbracht werden kann.
- Hinsichtlich der Langzeitsicherheit sind die Anforderungen an die Standort- und Wirtgesteinseigenschaften aus der Art der endzulagernden Abfälle abzuleiten.
- Im Hinblick auf den Sicherheitsnachweis sind räumlich und zeitlich gut prognostizierbare Verhältnisse zu bevorzugen.
- Die Sicherheitsanalyse für ein Rahmenbewilligungsgesuch hat sich auf die Ergebnisse einer ausführlichen Standorterkundung abzustützen. Der Umfang der Erkundung richtet sich nach der Prognostizierbarkeit der geologischen Eigenschaften des Standortes. Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass die Qualität des Standortes durch die Erkundungstätigkeiten nicht signifikant beeinträchtigt wird.
- Nach den ersten Erkundungen sind die sicherheitsrelevanten Kenntnisse über das Lagersystem während des Baus und des Betriebes des Lagers zu vervollständigen. Der laufenden Zunahme der Kenntnisse entsprechend ist die Sicherheitsanalyse für die Nachverschlussphase zu verfeinern.
- Bei der Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle ist während der anfänglichen Phase (bis etwa 1'000 Jahre) ein besonders hohes Gefährdungspotenzial vorhanden. Während dieser Phase ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im Tiefenlager anzustreben.
- Der Projektant hat anhand einer ausführlichen Analyse darzulegen, welche Vorgänge und Ereignisse auf das Tiefenlagersystem im Laufe der Zeit einwirken können, und daraus mögliche umhüllende Entwicklungen abzuleiten.
- Bei der Berechnung der Dosis oder des Risikos hat der Projektant die möglichen Schwankungsbreiten der relevanten Daten und der daraus resultierenden Resultate anzugeben. Wo Ungewissheiten bestehen, sind konservative Rechenannahmen zu treffen.
- Auch wenn die in den Schutzzielen 1 und 2 festgelegten Limiten eingehalten werden, sind die radiologischen Auswirkungen aus dem Endlager mit geeigneten Massnahmen so weit zu reduzieren, als dies nach dem Stand von Wissenschaft und Technik möglich und zumutbar ist.

### 3 Umsetzung der Anforderungen in einem Sicherheitskonzept

Die bisherigen Erfahrungen des schweizerischen Entsorgungsprogrammes - Projekt Gewähr (Nagra 1985), Projekt Kristallin-I (Nagra 1994a), Projekt Wellenberg (Nagra 1994b) und Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (Nagra 2002) - wie auch internationale Erfahrungen zeigen, dass es zur Umsetzung der gesetzlichen Anforderungen bezüglich der geologischen Tiefenlagerung notwendig ist, in einem ersten Schritt das Sicherheitskonzept des Lagers darzulegen. Das Sicherheitskonzept zeigt auf, wie die geforderte Langzeitsicherheit erbracht werden soll. Man unterscheidet dabei zwischen den konzeptuellen Sicherheitsfunktionen und den physischen Sicherheitsbarrieren, die zu den Sicherheitsfunktionen beitragen. Je nach Art der eingelagerten Abfälle sind die Anforderungen an die Sicherheitsfunktionen und die Sicherheitsbarrieren unterschiedlich; das betrifft insbesondere die Dauer der Wirksamkeit.

#### Sicherheitsfunktionen

Sicherheitsfunktionen sind übergeordnete Wirkungen des Barrierensystems des Tiefenlagers, welche den Schutz von Mensch und Umwelt gewährleisten müssen. Im Einklang mit internationalen Gepflogenheiten wird von folgenden Sicherheitsfunktionen ausgegangen:

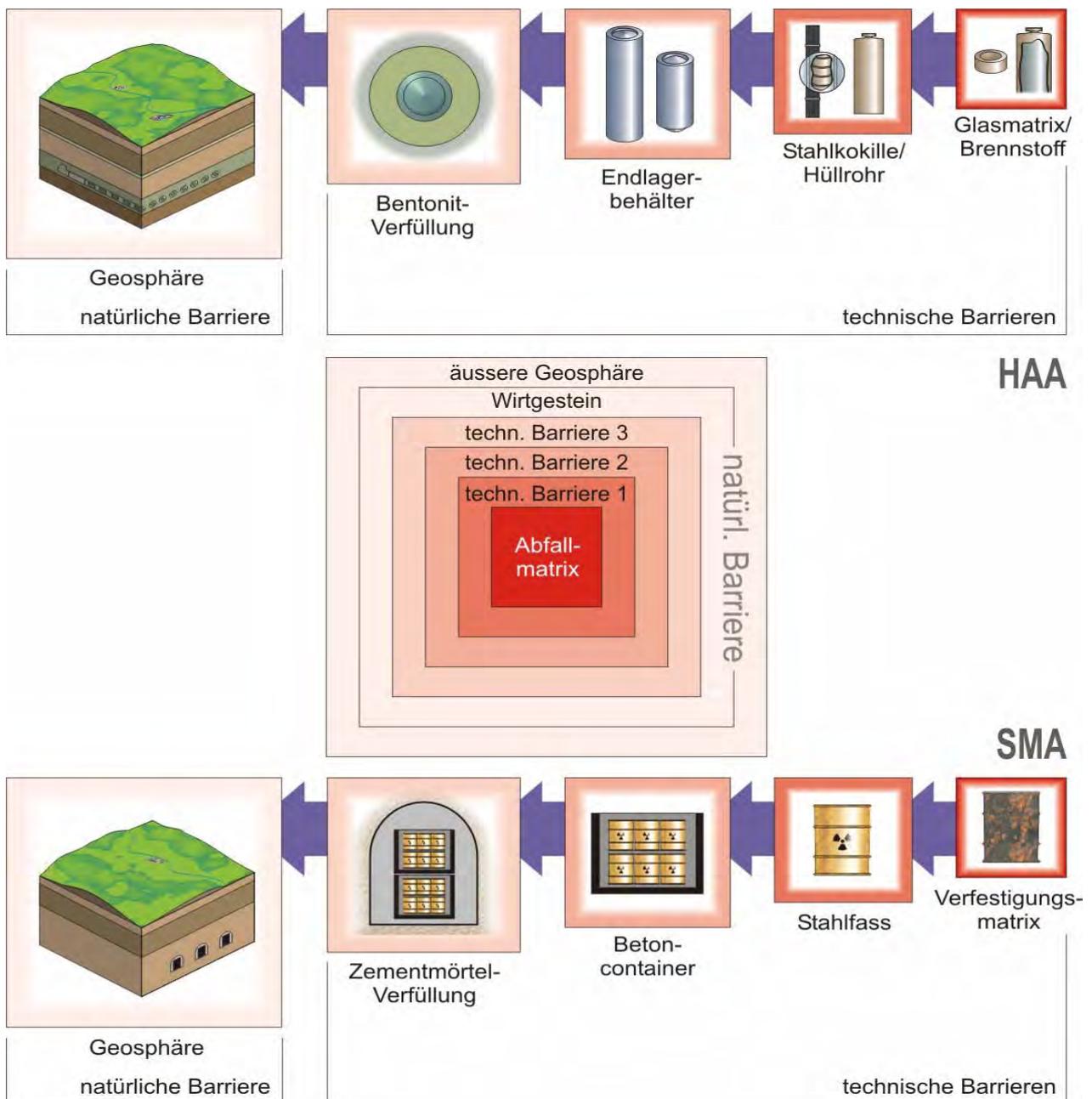
- **Isolation:** Die radioaktiven Abfälle werden vom Lebensraum des Menschen getrennt und fern gehalten. Die physische Trennung verhindert den direkten Kontakt des Menschen mit dem Abfall und damit auch eine direkte Bestrahlung. Weiter schützt eine Anordnung des Lagers tief im Untergrund das Barrierensystem des Lagers vor Prozessen und Ereignissen an der Erdoberfläche (z.B. Terrorismus, Krieg, Unruhen, Klimaänderungen, Vergletscherungen, Erosion, etc).
- **Einschluss:** Die radioaktiven Abfälle werden so lange wie möglich und nötig im Lager eingeschlossen, bis ihre Aktivität durch den radioaktiven Zerfall stark reduziert ist. Während der anfänglichen Phase, in welcher das Gefährdungspotenzial am höchsten ist, wird für HAA ein vollständiger Einschluss (z.B. in Stahlbehältern) angestrebt.
- **Begrenzung der Freisetzung:** Die Radionuklide sind in feste Materialien eingebunden (Glas, Zement, etc.), die nach Versagen des Einschlusses nur sehr langsam von Wasser ausgelaugt werden. Die Freisetzung von mobilisierten Radionukliden wird anschliessend im System der technischen und natürlichen Barrieren durch eine Reihe verschiedener chemischer und physikalischer Prozesse (Löslichkeit, Ausfällung, Sorption, Diffusion, etc.) begrenzt und verzögert. Dadurch wird gewährleistet, dass Radionuklide, wenn überhaupt, nur in unschädlichen Mengen in die Biosphäre austreten.

#### Sicherheitsbarrieren

Die Kernenergiegesetzgebung und die Richtlinie HSK-R-21 verlangen, dass die Langzeitsicherheit durch gestaffelte passive Sicherheitsbarrieren gewährleistet wird. Die Sicherheitsbarrieren sollen verschiedener Art sein und sowohl technische wie auch natürliche Komponenten enthalten. Zusätzlich erwartet die HSK bei einem Mehrfachbarrierensystem, dass eine unerwartete Schwächung einer beliebigen Barriere durch die weiteren Barrieren derart aufgefangen wird, dass weiterhin mit keinen unzulässigen radiologischen Auswirkungen gerechnet werden muss. Diese Interpretation des Begriffs „Mehrfachbarrierensystem“ ist auch international gebräuchlich.

Durch eine geeignete Auslegung des Barrierensystems ist sicherzustellen, dass die Sicherheitsfunktionen erfüllt werden. Hierzu ist das Verhalten der verschiedenen Sicherheitsbarrieren des Barrierensystems unter Berücksichtigung ihres Zusammenwirkens zu analysieren. Wo sinnvoll und möglich werden Anforderungen an die einzelnen Barrieren unter Einbezug der Eigenschaften des zugeordneten Abfallinventars abgeleitet.

Die Nagra hat für das HAA- und das SMA-Lager je ein dem Abfallinventar angepasstes Sicherheitskonzept und Mehrfachbarrierensystem entwickelt (vgl. Figur 3-1). Die technischen Barrieren umfassen von Innen nach Aussen die Abfallmatrix (Glasmatrix/Brennstoff, Verfestigungsmatrix), den Abfallbehälter (Stahlkokille/Hüllrohr, Stahlfass), den Endlagerbehälter (HAA) oder Betoncontainer (SMA) und die Verfüllung (Bentonit oder Zementmörtel). Die natürlichen Barrieren bestehen aus dem Wirtgestein bzw. dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den weiteren geologischen Schichten.



Figur 3-1: Beispiel einer möglichen Auslegung der Sicherheitsbarrieren für das HAA- und das SMA-Tiefenlager (schematische Darstellung nach NTB 92-02).

## **Rolle der Geologie**

Das Gesamtsystem der Sicherheitsbarrieren muss die in der Richtlinie HSK-R-21 definierten quantitativen Schutzziele erfüllen. Je nach Abfallkategorie und Lagertyp sind Zeiträume von mehreren 10'000 bis 1 Mio. Jahren zu betrachten. Besonders die Geosphäre muss über diese langen Zeiträume verlässliche Barriereigenschaften bieten. Das bedeutet hohe Anforderungen an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Dabei ist die Rolle der Geologie bzw. der Geosphäre eine mehrfache:

- Mit der Tiefenlage des Lagers sorgt sie für eine räumliche Trennung der Abfälle von der Biosphäre und den dort ablaufenden schnellen Vorgängen.
- Sie bildet ferner eine physikalisch und chemisch stabile Umgebung, in welcher die technischen Barrieren über lange Zeit wirksam bleiben.
- Schliesslich übernimmt sie mit ihren Eigenschaften eine weitere langfristige Barrierenwirkung, indem sie die Ausbreitung der aus dem Lager freigesetzten Radionuklide verzögert und begrenzt.

Bei der Evaluation geeigneter Standorte für ein geologisches Tiefenlager sind diese Aspekte massgebend.

Die in Kapitel 2 aufgeführten Prinzipien, Grundsätze und gesetzlichen Vorgaben an die geologische Tiefenlagerung sowie das oben dargelegte Sicherheitskonzept mit Sicherheitsfunktionen und Sicherheitsbarrieren stellen die Basis für die Herleitung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation dar. Diese Grundlagen sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt und entsprechend ihrer Relevanz für die Herleitung sicherheitstechnischer Kriterien bewertet. Gewisse Anforderungen können direkt als Kriterien für die Standortwahl und -evaluation umgesetzt werden. Andere fliessen indirekt in die Herleitung von solchen Kriterien ein.

Tabelle 3-1: Grundsätze und Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle sowie Bewertung ihrer Relevanz für die Herleitung von sicherheitstechnischen Kriterien für die Evaluation geeigneter Gebiete bzw. Standorte (++: direkt relevant, als Kriterium übernehmen, +: indirekt relevant, als Input für die Erarbeitung von Kriterien).

<b>Grundsätze und Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung</b>	<b>Relevanz für die Herleitung von Kriterien für die Standortevaluation</b>
<b>Grundsätze</b>	
– Entsorgung der Abfälle grundsätzlich in der Schweiz (KEG)	+
– Entsorgung aller radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern (KEG)	+
– Vereinbar mit Umweltschutz und Raumplanung (KEG)	+
<b>Anforderungen an geologische Tiefenlager</b>	
– <b>Sicherheit</b>	
○ Schutz von Mensch und Umwelt (KEG)	+
○ Quantitative Schutzziele (HSK-R-21)	+
○ Stand von Wissenschaft und Technik (KEG, HSK-R-21)	+
○ Konservativitäten zur Abdeckung von Ungewissheiten (HSK-R-21)	+
○ Sicherer Verschluss (KEG, KEV, HSK-R-21)	+
– <b>Auslegung des Lagers</b>	
○ Gestaffelte passive Barrieren, Redundanz und Diversität (KEV, HSK-R-21)	+
○ Vollständiger Einschluss der HAA während 1000 Jahre (HSK-R-21)	+
○ Gliederung in Hauptlager/Pilotlager/Testbereiche (KEV)	+
○ Überwachung und Rückholbarkeit ohne Beeinträchtigung der Barrierenwirkung (KEV, HSK-R-21)	+
○ Lager innerhalb einiger Jahre verschliessbar (KEV, HSK-R-21)	+
– <b>Standort</b>	
○ Genügende geologische Langzeitstabilität (KEV, HSK-R-21)	++
○ Ausreichende Ausdehnung an geeignetem (d.h. einschlusswirksamen) Wirtgestein (KEV, HSK-R-21)	++
○ Günstige hydrogeologische und geochemische Verhältnisse (KEV, HSK-R-21)	++
○ Gute Explorier- und Prognostizierbarkeit (HSK-R-21)	++
○ Charakterisierbarkeit des Standortes ohne signifikante Beeinträchtigung durch Erkundungstätigkeiten (HSK-R-21)	++

## 4 Herleitung sicherheitstechnischer Kriterien für die Standortevaluation

### 4.1 Herleitung der Kriterien

Aus den in Tabelle 3-1 zusammengefassten Grundsätzen und gesetzlichen Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung und den in Kapitel 3 dargelegten Sicherheitsfunktionen des Barrierensystems lassen sich drei Kriteriengruppen ableiten, die bei der Evaluation potenzieller Standortgebiete bzw. Standorte zu beachten sind.

Die erste Gruppe von Kriterien bezieht sich auf die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches<sup>1</sup>, die für den Beitrag der Geosphäre zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems massgebend sind. Die räumliche Ausdehnung, die hydraulische Durchlässigkeit und die geochemischen Bedingungen sind solche Eigenschaften. Darüber hinaus spielt auch die Beschaffenheit der möglichen Freisetzungspfade eine wichtige Rolle.

Die mit der ersten Kriteriengruppe angesprochene Barrierenwirkung der Geosphäre muss langfristig über die erforderlichen Zeiträume hinweg gewährleistet bleiben. Hierzu sind die Kriterien der zweiten Gruppe anzuwenden, die sich auf die Langzeitstabilität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches beziehen. Dazu gehören die Beständigkeit der angesprochenen Eigenschaften und die Erosionsdynamik, die langfristig die Barrierenwirkung beeinträchtigen könnte. Auch das Verhalten des geologischen Umfelds gegenüber den lagerbedingten Einflüssen ist zu betrachten. Zur Verhinderung von menschlichen Eingriffen sollten schliesslich Gebiete mit aus heutiger Sicht nutzungswürdigen Rohstoffen vermieden werden, sofern deren Nutzung einen Konflikt mit dem geologischen Tiefenlager verursachen würden.

Mit den Kriterien der dritten Gruppe wird die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen bewertet. Die Zuverlässigkeit bezieht sich zunächst auf die Erfassung der lokalen Gesteinseigenschaften (Charakterisierbarkeit), dann aber auch auf die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse und auf die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen.

In Ergänzung zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen muss auch gezeigt werden können, dass in der vorgesehenen Gesteinsabfolge und Tiefe ein geologisches Tiefenlager mit den heute vorhandenen technischen Mitteln, gebaut, betrieben und schliesslich langfristig sicher verschlossen werden kann. Für die Evaluation sind deshalb auch Kriterien heranzuziehen, die sich auf die bautechnische Eignung des Gesteins beziehen. Dabei sind vorerst die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen, aber auch die Möglichkeiten zur untertägigen Erschliessung und zur Wasserhaltung anzusprechen.

Es ergeben sich somit insgesamt 13 Kriterien in 4 Gruppen, die in Tabelle 4-1 aufgelistet sind.

---

<sup>1</sup> **Wirtgestein** = die Gesteinsformation, welche das Lager mit seinen Abfällen aufnimmt. **Einschlusswirksamer Gebirgsbereich** = Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des geologischen Tiefenlagers für den betrachteten Isolationszeitraum – im Zusammenwirken mit technischen und geologischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

Tabelle 4-1: Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit.

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	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 Einfluss 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

## 4.2 Erläuterung der Kriterien

Nachfolgend werden die in Tabelle 4-1 aufgeführten Kriterien näher beschrieben, die zu beurteilenden Aspekte dargelegt und ihre Relevanz für die Sicherheit erläutert. Bei der Anwendung der Kriterien zur Beurteilung der Standortmöglichkeiten sind die Anforderungen, wie sie aus der Art der Abfälle (Abfallvolumen, Nuklidinventar, chemisch-physikalische Eigenschaften, etc.) und der Auslegung der technischen Barrieren resultieren, zu berücksichtigen. Die durch die Entsorgungspflichtigen vorzunehmenden Beurteilungen zur Erarbeitung von Vorschlägen von Standortgebieten bzw. Standorten haben sich an diesen Vorgaben zu orientieren.

Tabelle 4-2

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches</b>
<i>Kriterium</i>	<b>1.1 Räumliche Ausdehnung</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird das räumliche Eignungspotenzial (Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, Verbreitung) und die Tiefenlage des Wirtgesteinskörpers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse (z.B. regionale Störungszonen, glazial übertiefte Talrinnen, Fremdgesteinseinschlüsse). In die Beurteilung einzubeziehen sind auch der erforderliche Platzbedarf des Tiefenlagers (inkl. Reserve), das Platzangebot sowie die Flexibilität bei der Anordnung der untertägigen Lagerkavernen und -stollen.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Verhältnisse, bei welchen das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden.

Tabelle 4-3

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>1      Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches</b>
<i>Kriterium</i>	<b>1.2      Hydraulische Barrierenwirkung</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	<p>Beurteilt werden die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hinsichtlich der Wasserführung und des Stofftransportes sowie die regionale hydrogeologische Situation. Zur Sicherstellung der langfristigen Isolation und des Einschlusses der radioaktiven Abfälle werden Gesteine mit geringer Grundwasserbewegung gesucht. Diese hängt von den Eigenschaften des Gesteins, u.a. der hydraulischen Durchlässigkeit unter Berücksichtigung des hydraulischen Gradienten ab, und gibt Hinweis auf die vorherrschenden Transportprozesse (Advektion, Diffusion) und die Wirkung als hydraulische Barriere.</p> <p>In die Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse werden ferner auch indirekte Indikatoren einbezogen wie z. B. die generelle hydrochemische Gliederung und Abgrenzung der verschiedenen Grundwasserstockwerke, erwartete Isotopensignaturen und Verweilzeiten der Tiefenwässer.</p>
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Eine geringe hydraulische Durchlässigkeit führt zu einer geringen Wasserführung. Eine solche ist zunächst für das Verhalten und den Schutz der technischen Barrieren im Tiefenlager günstig. In einer späteren Phase stellt sie auch sicher, dass der Radionuklidtransport im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich nur sehr langsam erfolgen kann (Barrirenwirkung).

Tabelle 4-4

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>1      Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches</b>
<i>Kriterium</i>	<b>1.3      Geochemische Bedingungen</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (u.a. Mineralogie, Chemismus des Wassers, pH-Wert, Redox-Bedingungen, Salinität, Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen, mikrobielle Prozesse) bezüglich Rückhaltung und Verzögerung der Radionuklide (begrenzte Löslichkeit, Sorptionsvermögen) und Langzeitverhalten der technischen Barrieren.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die geochemischen Bedingungen und die Gesteinsbeschaffenheit zu einem guten Radionuklid-Rückhaltevermögen im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Günstig sind auch geochemische Bedingungen, welche die Radionuklid-Rückhaltung in den technischen Barrieren begünstigen und zur langfristigen Beständigkeit der Eigenschaften der technischen Barrieren im Tiefenlager beitragen.

Tabelle 4-5

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>1      Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches</b>
<i>Kriterium</i>	<b>1.4      Freisetzungspfade</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die präferenziellen Radionuklid-Freisetzungspfade im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Zur Ausbreitung und Verzögerung der Radionuklide tragen verschiedene Eigenschaften des Transportpfades bei, wie die Art und Verteilung der Transportpfade im Gestein (poröses oder geklüftetes Medium), die Ausbildung seines Porenraums („Channeling“ = Fliesskanäle) sowie seine Länge und Transmissivität. Dabei ist das Selbstabdichtungsvermögen von Rissen und Klüften zu berücksichtigen, welches wesentlich vom Tongehalt des Gesteins abhängt.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Transportpfade, die zu einer erheblichen Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus dem Wirtgestein bzw. dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Günstig ist dabei eine homogene Verteilung der Fliesswege im Gestein, im Gegensatz zu einer Konzentration des Flusses auf wenige Klüfte, Adern oder andere Inhomogenitäten. Je länger der Nuklidtransport im Gestein dauert, desto grösser ist der Anteil der Radionuklide, die im Gestein zerfallen und somit die Biosphäre nicht erreichen.

Tabelle 4-6

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>2 Langzeitstabilität</b>
<i>Kriterium</i>	<b>2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird die geologische Langzeitstabilität des Standortes und der Gesteinseigenschaften, insbesondere die Möglichkeit einer Beeinträchtigung und Veränderung des Isolationsvermögens des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch geologische Prozesse wie Störung des Gesteinverbandes durch differenzielle Bewegungen (Zerschering, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen, Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten) verursacht durch neotektonische Aktivität (u.a. Seismizität), geochemische Vorgänge (Lösungsprozesse, Karstbildung, Wasser-Gesteins-Wechselwirkungen) oder seltene geologische Ereignisse wie Bruchbildung im Zusammenhang mit starken Erdbeben oder Vulkanismus.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Gebiete und Gesteine, die über den für die Sicherheitsbewertung zu betrachtenden Zeitraum die erforderliche Barrierenwirkung gewährleisten können. Günstig sind Gesteine mit einer geringen Neigung zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten und die bei Deformation eine Selbstabdichtung von Rissen/Klüften/Störungen aufweisen. Günstig sind geologische Situationen, bei denen differenzielle Bewegungen innerhalb des Lagerbereiches unwahrscheinlich sind.

Tabelle 4-7

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>2 Langzeitstabilität</b>
<i>Kriterium</i>	<b>2.2 Erosion</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird der Einfluss der Erosion, d.h. die massgeblichen Faktoren und Prozesse (Tiefenlage des Lagers, Hebungsrate, Erosionsrate und glaziale Tiefenerosion), die zu einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Verringerung der Gesteinsüberdeckung, Auflockerung des Wirtgesteins und Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit) oder zu einer Freilegung des Lagers innerhalb des Betrachtungszeitraumes führen könnten.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist eine Situation (geringe Erosion und/oder grosse Tiefenlage), bei der die Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht oder möglichst spät beeinträchtigt wird.

Tabelle 4-8

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>2 Langzeitstabilität</b>
<i>Kriterium</i>	<b>2.3 Lagerbedingte Einflüsse</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die Auswirkungen des Lagers auf das Wirtgestein (Gasentwicklung der Abfälle und Gastransport, Wärmeeintrag und Wärmeempfindlichkeit, thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Prozesse, chemische Wechselwirkungen, Ausbildung der Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, Reversibilität der Veränderungen, Selbstabdichtungsvermögen). Dabei sind das einzulagernde Abfallinventar und das dafür vorgesehene Lagerkonzept (z.B. Auslegung des Lagers, Materialwahl für die technischen Barrieren) zu berücksichtigen.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Wirtgesteine, bei welchen lagerinduzierte Prozesse zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung ihrer Barrierenwirkung führen. Günstig sind Gesteine, die ein Selbstabdichtungsvermögen von Rissen und Klüften aufweisen und die im Bereich der zu erwartenden Temperaturen wenig wärmeempfindlich bezüglich ihrer hydraulischen, stofflichen und felsmechanischen Eigenschaften sind.

Tabelle 4-9

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>2 Langzeitstabilität</b>
<i>Kriterium</i>	<b>2.4 Nutzungskonflikte</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die nutzungswürdigen Rohstoffe und die sich daraus allfällig ergebenden Nutzungskonflikte. Insbesondere wird beurteilt, ob im oder unterhalb des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus heutiger Sicht wirtschaftlich nutzungswürdige Rohstoffe (z.B. Salz, Kohlenwasserstoffe, Geothermie, Mineralquellen und Thermen) im besonderen Masse vorkommen. Beurteilt wird ferner, ob die Erschliessung und Nutzung der Rohstoffe die Barrierenwirkung des Wirtgesteins beeinträchtigen (Schichtverletzung) oder das Lager direkt treffen könnte.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn keine Rohstoffe, deren Nutzung die Barrierenwirkung des Wirtgesteins signifikant beeinträchtigen würde, in besonderem Masse innerhalb des Standortgebietes vorkommen.

Tabelle 4-10

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen</b>
<i>Kriterium</i>	<b>3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die Möglichkeiten der Charakterisierung der Beschaffenheit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der Erfassung der sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften (Homogenität/Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit, Existenz und Art der Architekturelemente, Variabilität der sicherheitsrelevanten Eigenschaften). Es wird geprüft, ob die benötigten Daten mit genügender Zuverlässigkeit gewonnen werden können.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die Wirtgesteinseigenschaften möglichst homogen sind und ohne übermässig destruktive Untersuchungen ermittelt werden können (keine wesentliche Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins durch Schicht verletzende Untersuchungen). Für die Beurteilung ist es vorteilhaft, wenn relevante Erfahrungen und Kenntnisse über das Wirtgestein oder über vergleichbare Gesteine national und international bereits vorhanden sind.

Tabelle 4-11

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen</b>
<i>Kriterium</i>	<b>3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die geologisch-tektonische Komplexität und die Explorierbarkeit der räumlichen geologischen Verhältnisse (Lagerungsverhältnisse, Ausdehnung und Kontinuität der Schichten, räumliche Konstanz der lithologischen Beschaffenheit, Wirtgesteinsgrenzen, Lage von regionalen Störungszonen, kleinräumige Störungen, etc.). Massgebend ist auch die Zugänglichkeit für Untersuchungen von der Erdoberfläche aus (Quartärbedeckung, topographische Verhältnisse, dichte Besiedlung, Bewaldung, etc.).
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die Lagerungsverhältnisse und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches einfach und von der Erdoberfläche aus gut explorierbar sind (z.B. mit Reflexionsseismik). Günstig ist, wenn die Beobachtungen bzw. Untersuchungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften räumlich inter- und extrapolierbar sind. Günstig ist auch, wenn keine erschwerenden Verhältnisse an der Erdoberfläche vorliegen (z. B. mächtige Quartärlagerungen, schwierige Topographie, ausgedehnte dichte Siedlungsräume, dichte Bewaldung).

Tabelle 4-12

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen</b>
<i>Kriterium</i>	<b>3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird die Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen (z.B. durch Modellvorstellungen zur Klimaentwicklung und Geodynamik, Hinweise auf rezente Bewegungen, Seismizität), die im Betrachtungszeitraum einen Einfluss auf das Einschlussvermögen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches haben können. Beurteilt werden ferner unabhängige Evidenzen des Langzeiteinschlusses (z.B. alte Porenwässer, natürliche Tracerstoffe und ihre Verteilung).
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig ist, wenn die sicherheitsrelevanten Eigenschaften und die Geometrie des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über die erforderlichen Zeiträume genügend zuverlässig prognostizierbar sind.  Günstig sind Wirtgesteine mit unabhängigen Evidenzen der Langzeitisolation (z. B. der Einschluss alter Porenwässer) oder die Anwesenheit/Verteilung natürlicher Tracerstoffe, die auf eine langfristig geringe Wasserzirkulation schliessen lassen.

Tabelle 4-13

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>4 Bautechnische Eignung</b>
<i>Kriterium</i>	<b>4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen für Bau, Betrieb, Überwachung und Verschluss des geologischen Tiefenlagers (u.a. Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten, Verformungseigenschaften der Gesteine, Tiefenlage und Gebirgsspannungen, Stabilität der Hohlräume, natürliche Gasführung).
<i>Relevanz für die Machbarkeit</i>	Günstig sind bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse, bei denen sich durch die Tiefenlage keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) oder beim Verschluss des Lagers ergeben. Günstig ist, wenn der Verschluss der Lagerteile ohne technische Probleme mit der erforderlichen Abdichtung realisiert werden kann.

Tabelle 4-14

<i>Kriteriengruppe</i>	<b>4 Bautechnische Eignung</b>
<i>Kriterium</i>	<b>4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung</b>
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die Bedingungen für die Erschliessung der Lagerkavernen und -stollen, insbesondere die bautechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse für Erstellung, Betrieb und Unterhalt der Zugangsbauwerke zu den Lagerkavernen und -stollen, inkl. natürlicher Gasführung.
<i>Relevanz für die Machbarkeit</i>	Günstig ist, wenn keine wesentlichen hydrogeologischen und geotechnischen Probleme oberhalb der Lagerebene zu erwarten sind.

## 5 Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien bei der Standortevaluation

### 5.1 Etappe 1: Auswahl von potenziellen Standortgebieten

Für die Erarbeitung von Vorschlägen geeigneter Standortgebiete für geologische Tiefenlager haben die Entsorgungspflichtigen aus sicherheitstechnischer Sicht folgende anwendungsge-rechte Sequenz von Fragestellungen zu beantworten:

- Wie werden die Abfälle den beiden Lagertypen HAA und SMA zugeteilt?
- Welche Anforderungen müssen unter Berücksichtigung des zugeteilten Abfallinventars und des zugehörigen Sicherheits- bzw. Barrierenkonzeptes an die standortbezogenen geologischen Verhältnisse gestellt werden?
- Wo liegen geeignete geologisch-tektonische Grossräume, die den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen?
- Welche Gesteine in diesen Grossräumen eignen sich potenziell als Wirtgesteine bzw. als einschlusswirksame Gebirgsbereiche?
- Wo liegen potenzielle Wirtgesteine in geeigneter Konfiguration (Ausbildung, Anordnung, Tiefenlage, Mächtigkeit, Erschliessung der untertägigen Bauwerke) vor?

Für die Erarbeitung von Vorschlägen für potenzielle Standortgebiete ergibt sich damit ein Vorgehen in fünf Schritten, welches in der nachfolgenden Tabelle 5-1 zusammengefasst ist:

#### Schritt 1: Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen HAA und SMA

Das Konzept der Entsorgungspflichtigen geht von zwei Lagern aus: eines für die hochaktiven Abfälle (HAA-Lager) und eines für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA-Lager). Es sind grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten denkbar, die Abfallkategorien nach KEV (HAA, ATA und SMA) auf die beiden Lagertypen aufzuteilen. Es obliegt den Entsorgungspflichtigen, geeignete Lösungen vorzuschlagen, die durch die Behörden geprüft werden.

Als ersten Schritt in Etappe 1 müssen die Entsorgungspflichtigen die Abfallkategorien den beiden Lagertypen HAA und SMA zuteilen. Für die Zuteilung der Abfallkategorien oder Teile davon sind in erster Linie folgende Abfalleigenschaften massgebend:

- Inventar und Halbwertszeiten der Radionuklide
- Auswahl der sicherheitstechnisch relevanten Nuklide (Wertung der radiologischen Toxizität)
- Abfallvolumen
- Materialeigenschaften (Abfallmatrix, -behälter) und ihre möglichen Auswirkungen auf das Wirtgestein
- Wärmeentwicklung
- Gehalt an potenziell Gas produzierenden Bestandteilen (Metalle, Organika)
- Gehalt an Komplexbildnern

## **Schritt 2: Festlegung des Sicherheitskonzeptes und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation**

Basierend auf dem zugeteilten Abfallinventar müssen die Entsorgungspflichtigen das Sicherheitskonzept für die beiden Lagertypen HAA und SMA beschreiben und anhand von generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen (siehe Anhang IV) die Anforderungen und Zielvorgaben an die geologische Barriere darlegen und die sicherheitstechnischen Kriterien gemäss Tabelle 4-1 soweit möglich quantifizieren. Dazu haben die Entsorgungspflichtigen für die beiden Lagertypen folgende Vorgaben festzulegen und zu erläutern:

- Barrieren- und Sicherheitskonzept des Lagers,
- Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des gesamten Lagers,
- Quantitative Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre bezüglich des zu betrachtenden Zeitraumes, der Grösse und des Platzbedarfs des Lagers,
- Quantitative Zielvorgaben bezüglich Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches,
- Qualitative Bewertungsskala (z.B. sehr günstig / günstig / bedingt günstig / ungünstig) für die Anwendung der weiteren Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit (vgl. Tabelle 4-1). Der Bewertungsmassstab wird in Bezug auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft erläutert. Neben der qualitativen Bewertungsskala ist auch das Vorgehen bei der zusammenfassenden Bewertung zu beschreiben. Die zusammenfassende Bewertung der Standortgebiete ist auf einer entsprechenden qualitativen Bewertungsskala der Eignung (das heisst: sehr geeignet / geeignet / bedingt geeignet / weniger geeignet) darzustellen.

## **Schritt 3: Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume**

Zur Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume, welche den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen, sind die folgenden Kriterien und Aspekte zu berücksichtigen und zu bewerten:

- Grossräumige Erosion (Kriterium 2.2)
- Langzeitstabilität: differenzielle Bewegungen, neotektonische Aktivität und Seismizität (Kriterium 2.1 )
- Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen (Kriterium 3.3)
- Grossräumige geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2)

#### **Schritt 4: Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche**

Zur Identifikation von Wirtgesteinen bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichen innerhalb der geeigneten Grossräume, die sich zur Aufnahme eines Tiefenlagers eignen könnten, sind die folgenden Kriterien und Aspekte zu berücksichtigen und zu bewerten:

- Grundsätzliches räumliches Eignungspotenzial des Wirtgesteins: Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und Verbreitung in geeigneter Tiefenlage (Kriterium 1.1).
- Eigenschaften bezüglich Wasserführung und Stofftransport: hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2).
- Geochemische Bedingungen und Rückhalteeigenschaften (Kriterium 1.3).
- Präferenzielle Freisetzungspfade und ihre Eigenschaften (Kriterium 1.4).
- Langfristiges Wirtgesteinsverhalten: Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Kriterium 2.1).
- Verhalten bezüglich lagerbedingter Einflüsse (Kriterium 2.3).
- Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen: Gesteins- und Gebirgsfestigkeit, Verformungseigenschaften (Kriterium 4.1).
- Geologisch-tektonische Komplexität, Charakterisierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften und Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterien 3.1 und 3.2).

#### **Schritt 5: Identifikation geeigneter Konfigurationen**

Zur Identifikation geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche in geeigneter Konfiguration sind die folgenden Kriterien und Aspekte zu berücksichtigen und zu bewerten:

- Tiefenlage, Mächtigkeit und laterale Ausdehnung unter Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse (Kriterium 1.1).
- Potenziell nutzbares Lagervolumen in Relation zum Bedarf aufgrund der bekannten und für den Standort vorgesehenen maximalen Lagerkapazität: Platzbedarf/Platzangebot (Kriterium 1.1).
- Hydrogeologische Verhältnisse und Eigenschaften bezüglich Wasserführung: hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2).
- Präferenzielle Freisetzungspfade und ihre Eigenschaften (Kriterium 1.4).
- Einfluss der Erosion: Tiefenlage des Lagers, Hebung, grossräumige Erosion, glaziale Tiefenerosion (Kriterium 2.2).
- Nutzungswürdige Rohstoffe und allfällige Nutzungskonflikte (Kriterium 2.4).
- Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen für den Bau des Tiefenlagers (Kriterium 4.1).
- Geotechnische und hydrogeologische Bedingungen oberhalb des Lagerbereichs: untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2).

- Langzeitstabilität: Neotektonisch potenziell aktive Elemente (differenzielle Bewegungen) auf regionalem Massstab, geologische Entwicklungsgeschichte und Prognostizierbarkeit möglicher klimatischer und geologischer Langzeitveränderungen (Kriterien 2.1 und 3.3).
- Geologisch-tektonische Komplexität, Charakterisierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften und Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterien 3.1 und 3.2).

Tabelle 5-1: Übersicht der Schritte 1-5 der Etappe 1: Abfallzuteilung (Schritt 1), Festlegung der Vorgaben für das Einengungsverfahren (Schritt 2) und zu beurteilende Aspekte, zugeordnete Kriterien und relevante Indikatoren für die Umsetzung (Schritte 3-5).

Schritt	Vorgaben für das Einengungsverfahren	Relevante Grössen bzw. Eigenschaften
<p><b>1.</b> Abfallzuteilung auf die beiden Lager SMA und HAA</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuteilung der Abfallkategorien oder Teile davon auf die beiden Lagertypen SMA und HAA</li> </ul>	<p>Abfallvolumen, Nuklidinventar, Toxizität, chemische und physikalische Eigenschaften</p>
<p><b>2.</b> Festlegung des Sicherheitskonzeptes und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzeptes</li> <li>- Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit</li> <li>- Quantitative Anforderungen und Zielvorgaben an das Wirtgestein und die Geosphäre</li> <li>- Qualitative Bewertungsskala für die weiteren Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit</li> </ul>	<p>Ausgestaltung der technischen Barrieren, Auslegung der Lagerstollen bzw. -kavernen</p> <p>Resultate der generischen Sicherheitsbetrachtungen</p> <p>Quantifizierung von:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betrachtungszeitraum</li> <li>- Grösse und Platzbedarf des Lagers</li> <li>- Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches</li> </ul>

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 4-1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
<b>3.</b> Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume	Einfluss Erosion	2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum
	Langzeitstabilität: Differenzielle Bewegungen, neotektonische Aktivität und Seismizität; Prognostizierbarkeit der möglichen geologischen Langzeitveränderungen	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Messdaten und Modellvorstellungen zur Geodynamik, zur Neotektonik (inkl. Seismizität), zu geochemischen Vorgängen oder seltenen geologischen Ereignissen.
	Geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Regionales Störungsmuster, Lagerungsverhältnisse und Kontinuität der interessierenden Schichten
<b>4.</b> Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche	Räumliches Eignungspotenzial	1.1 Räumliche Ausdehnung	Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und Verbreitung in geeigneter Tiefenlage
	Wasserführung und Stofftransport	1.2 hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit (unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten), vorherrschende Transportprozesse (Advektion, Diffusion), Verweilzeiten der Tiefenwässer (z.B. Isotopensignaturen)
	Geochemie	1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie, pH, Redox-Bedingungen, Salinität, Sorptionsvermögen, mikrobielle Prozesse
	Präferenzielle Transportpfade und ihre Eigenschaften	1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade (Kluftnetzwerk vs. poröses Medium), Ausbildung des Porenraums, Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade, Selbstabdichtungsvermögen bezüglich Klüfte und Störungen
	Gesteinsverhalten über lange Zeiträume	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Langzeitveränderungen, Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten, Verkarstungsfähigkeit, Selbstabdichtungsvermögen
	Verhalten bezüglich lagerbedingter Einflüsse	2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten, Gasentwicklung und Gastransport, chemische Wechselwirkungen, Wärmeeintrag/Wärmeleitfähigkeit, Selbstabdichtungsvermögen neuer Klüfte
	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage und erwartete Gebirgsspannungen, Gesteinsfestigkeiten, Verformungsverhalten

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 4-1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
	Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine  3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Homogenität der Gesteinseigenschaften (inkl. Architekturelemente), Erfahrungen  Geologisch-tektonische Situation, Komplexität, Explorationsverhältnisse
<b>5.</b> Identifikation geeigneter Konfigurationen	Tiefenlage, Mächtigkeit und Ausdehnung; Platzbedarf/Platzangebot	1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage, Mächtigkeit und laterale Ausdehnung unter Berücksichtigung der geologisch-tektonischen Verhältnisse (regionale Störungszonen, glazial übertiefte Talrinnen, Fremdgesteinseinschlüsse); Platzangebot, Flexibilität und Reserven
	Wasserführung, hydrogeologische Verhältnisse	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit und zu erwartende hydraulische Gradienten, Transportprozesse (Advektion/Diffusion), Grundwasserstockwerke
	Präferenzielle Transportpfade und ihre Eigenschaften	1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade (Kluftnetzwerk vs. poröses Medium), Ausbildung des Porenraums, Länge und Transmissivität - präferenzieller Freisetzungspfade, Selbstabdichtungsvermögen bezüglich Klüfte und Störungen
	Einfluss Erosion	2.2 Erosion	Tiefenlage, Hebungsrates, Erosionsrate, übertiefte Täler mit rinnenförmigen Quartärablagerungen (glaziale Tiefenerosion)
	Rohstoffe und Nutzungskonflikte	2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen, Geothermie, Mineralquellen und Thermen
	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage bzw. erwartete Gebirgsspannungen, Gesteins- und Gebirgsfestigkeit, Verformungseigenschaften
	Bedingungen für die Erschliessung der Lagerkavernen und -stollen	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Zugänglichkeit der Untertagebauwerke, geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse (inkl. Grundwasserleiter, Karst, natürliche Gasführung)

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 4-1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
	Langzeitstabilität: Differenzielle Bewegungen und Neotektonik; Prognostizierbarkeit möglicher geologischer Langzeitveränderungen	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften  3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Modellvorstellungen zur Klimaentwicklung und zur Geodynamik, Hinweise auf differentielle Bewegungen (u.a. Geomorphologie, Seismizität), Abstand zu potenziell aktiven oder reaktivierbaren Störungen.  Langzeitveränderungen, Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten, Verkarstungsfähigkeit, Selbstabdichtungsvermögen.  Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation.
	Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine  3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Geologisch-tektonische Situation, kleinräumige Störungen, Homogenität / Heterogenität der Gesteinsbeschaffenheit und Variabilität der Gesteinseigenschaften (inkl. Architekturelemente, Häufigkeit von Klüften und Störungen), Möglichkeiten für 3D-Seismik, Bohrungen

Nach Ausführung dieser fünf Auswahlsschritte haben die Entsorgungspflichtigen eine zusammenfassende Bewertung der Standortgebiete vorzulegen. Die Bewertungsergebnisse der einzelnen Kriterien werden dabei mit Hilfe einer Bewertungsmatrix zu einem Gesamturteil über die Eignung der Standortgebiete zusammengezogen. Das Ergebnis wird auf der entsprechenden qualitativen Werteskala (d.h. sehr geeignet / geeignet / bedingt geeignet / weniger geeignet) dargestellt. Das Vorgehen und das Ergebnis sind in einem Bericht zu dokumentieren, mit welchem die Entsorgungspflichtigen Vorschläge für potenzielle Standortgebiete unterbreiten. Als potenzielle Standortgebiete kommen nur solche in Frage, welche mindestens die Bewertung „bedingt geeignet“ erreicht haben.

### Überprüfung der Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit

Bei der Überprüfung der vorgeschlagenen Standortgebiete haben die Behörden folgende Fragen zu prüfen:

- Ist die Charakterisierung der Abfallkategorien vollständig und die Zuteilung auf die beiden Lagertypen HAA und SMA nachvollziehbar (Schritt 1)?
- Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologisch-tektonische Situation, an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und an den Standort nachvollziehbar und genügend (Schritt 2)?
- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke der Vororientierung?
- Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?

- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete transparent und nachvollziehbar?
- Können die Behörden den Vorschlägen aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

Das Ergebnis der Überprüfungen wird in einem Gutachten (HSK) und in Form von Stellungnahmen (KNE, KNS) festgehalten.

## **5.2 Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten**

In Etappe 2 werden von den Entsorgungspflichtigen innerhalb der in Etappe 1 vorgeschlagenen und genehmigten Standortgebiete unter Berücksichtigung von Sicherheit und technischer Machbarkeit sowie raumplanerischen, wirtschaftlichen und sozioökonomischen Aspekten potenzielle Standorte identifiziert und aus diesen schliesslich mindestens zwei Standorte je für HAA und SMA zur Aufnahme in die Objektblätter als Zwischenergebnis vorgeschlagen. Die Erarbeitung von Vorschlägen erfolgt in folgenden zwei Schritten:

### **Schritt 1: Bezeichnung von Standorten in den ausgewählten Standortgebieten**

In den ausgewählten Standortgebieten bezeichnen die Entsorgungspflichtigen in einem ersten Schritt potenzielle Standorte: In Zusammenarbeit mit den betroffenen Kantonen und Regionen erarbeiten sie Vorschläge für die Anordnung und Ausgestaltung der Oberflächenanlagen und schlagen untertägige Lagergebiete vor.

### **Schritt 2: Vergleichende Bewertung und Vorschlag von mindestens zwei Standorten**

Für die im Schritt 1 bezeichneten Standorte führen die Entsorgungspflichtigen quantitative provisorische Sicherheitsanalysen durch (vgl. Anhang IV). Ausgehend vom vorgesehenen Abfallinventar und den Eigenschaften der geplanten technischen Barrieren sowie des Wirtgesteins müssen die provisorischen Sicherheitsanalysen insbesondere Auskunft geben über:

- das Rückhaltevermögen des Gesamtsystems (technische und geologische Barrieren und ihre Wechselwirkungen) und die maximale Dosis aus den realistisch zu erwartenden Freisetzungen,
- den Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit, und
- das Langzeitverhalten der Barrieren.

Die Ergebnisse der quantitativen provisorischen Sicherheitsanalysen – zusammen mit der qualitativen Bewertung der übrigen sicherheitstechnischen Kriterien und Aspekten gemäss Tabelle 4-1 – führen durch eine Gesamtbewertung zum Vorschlag von mindestens zwei Standorten je für HAA und SMA. Bei der Erarbeitung von Standortvorschlägen haben die Entsorgungspflichtigen folgende Vorgaben zu beachten:

- Der Standort muss das Dosis-Schutzziel von 0.1 mSv pro Jahr der Richtlinie HSK-R-21 erfüllen können.
- Es darf kein Standort als Zwischenergebnis vorgeschlagen werden, der aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse eindeutig als weniger geeignet bewertet ist

als die anderen. Die Bewertung und der Vergleich der Standorte haben nach einem standardisierten Vorgehen zu erfolgen (siehe Anhang IV).

- Die wirtschaftlichen und sozioökonomischen Aspekte dürfen nur unter im obigen Sinn sicherheitsmässig vergleichbaren Standorten für die Auswahl ausschlaggebend sein (Sicherheit hat oberste Priorität).

Die Entsorgungspflichtigen müssen das Vorgehen und die Ergebnisse der Etappe 2 in einem Bericht dokumentieren und ihre Auswahl von mindestens zwei Standorten begründen.

### **Überprüfung der Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit**

Die von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Standorte werden von den zuständigen behördlichen Stellen (HSK) und von Fachkommissionen (KNE, KNS) überprüft und beurteilt. Die Behörden und Kommissionen stellen insbesondere fest, ob die Wahl der Standorte aus sicherheitstechnischer Sicht gerechtfertigt ist.

Die Überprüfung hat u.a. folgende Fragen zu beantworten:

- Haben die Entsorgungspflichtigen die Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (Tabelle 4-1) bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge transparent und nachvollziehbar?
- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis?
- Können die Behörden die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen nachvollziehen?
- Können die Behörden die Resultate der Abwägungen aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien nachvollziehen und dem Resultat der gesamtheitlichen Bewertung zustimmen?
- Können die Behörden den Standortvorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zustimmen?

Das Ergebnis der Überprüfung wird in einem Gutachten der HSK und in Form von Stellungnahmen (KNE, KNS) festgehalten.

### **5.3 Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren**

In dieser Etappe wählen die Entsorgungspflichtigen den Standort, an welchem das geologische Tiefenlager realisiert werden soll und bereiten für dieses ein Rahmenbewilligungsgesuch vor.

#### **Wahl des Standortes**

Aus den als Zwischenergebnis bezeichneten und im Sachplan festgehaltenen Standorten wählen die Entsorgungspflichtigen den Standort, an welchem das Tiefenlager realisiert werden soll. Um diese Wahl treffen und begründen zu können, müssen die grundsätzlichen Kenntnisse der Standorte auf einem für den Vergleich erforderlichen Stand sein. Falls nötig sind dazu die Kenntnisse der Standorte mit erdwissenschaftlichen Untersuchungen zu ergänzen. Die Ergebnisse – zusammen mit der Bewertung weiterer Aspekte gemäss Konzeptteil des Sachplanes – führen dann durch eine Abwägung und gesamtheitliche Betrachtung zur Standortwahl durch die Entsorgungspflichtigen.

### **Vorbereitung und Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs**

Für den gewählten Standort haben die Entsorgungspflichtigen die für die Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuches erforderlichen Daten, Unterlagen und Berichte zu erarbeiten. Die Eignung des Standortes muss durch erdwissenschaftliche Untersuchungen bestätigt sein. Zu diesem Zweck werden ergänzende Untersuchungen nötig sein, sofern diese nicht bereits für die Wahl des Standortes durchgeführt wurden.

Der Gesuchsteller hat gemäss Artikel 62 KEV zusätzlich zu den Gesuchsunterlagen nach Artikel 23 KEV einen Bericht mit folgenden Angaben einzureichen:

- ein Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich der Sicherheit des geplanten Tiefenlagers;
- eine Bewertung der für die Auswahl des Standortes ausschlaggebenden Eigenschaften;
- die Höhe der Kosten.

Die erforderlichen Unterlagen für ein Rahmenbewilligungsgesuch nach Artikel 23 KEV umfassen neben einem Sicherheits- und Sicherungsbericht auch einen Umweltverträglichkeitsbericht (Umweltverträglichkeitsprüfung 1. Stufe gemäss Umweltschutzgesetz), einen Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung sowie das Konzept für die Beobachtungsphase und den Verschluss. Sie müssen zeigen, dass die Voraussetzungen für die Erteilung der Rahmenbewilligung gemäss Artikel 13 KEG erfüllt sind. Ein wesentlicher Aspekt ist der Nachweis der Langzeitsicherheit nach Verschluss des Tiefenlagers.

### **Inhalt der Rahmenbewilligung**

In der Rahmenbewilligung festgelegt werden der Bewilligungsinhaber, der Standort, der Zweck der Anlage, die Grundzüge des Projektes, die maximal zulässige Strahlenexposition für Personen in der Umgebung der Anlage, die Kriterien, bei deren Nichterfüllung ein vorgesehener Lagerbereich wegen fehlender Eignung ausgeschlossen wird und ein vorläufiger Schutzbereich (Artikel 14 KEG). Als Grundzüge des Projektes gelten die ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten (ober- und unterirdisch) sowie die Kategorien der einzulagernden Abfälle und die maximale Lagerkapazität.

### **Überprüfung der Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit**

Das Rahmenbewilligungsgesuch wird von den zuständigen Fachstellen des Bundes geprüft. Es wird insbesondere festgestellt, ob die Auslegungsgrundsätze gemäss Artikel 11 Absatz 2 KEV sowie die Anforderungen in Artikel 64 bis 69 KEV gebührend beachtet wurden.

Die wichtigste von den überprüfenden Stellen zu beantwortende Frage ist, ob der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt sichergestellt werden kann. Die erdwissenschaftlichen Eigenschaften des Standortes spielen in dieser Hinsicht eine zentrale Rolle; die geforderte Sicherheit muss aber vom gesamten System, bestehend aus den zur Einlagerung vorgesehenen Abfällen, aus den geplanten technischen Barrieren und aus den umliegenden natürlichen Barrieren erbracht werden. Die Kriterien, anhand welcher die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers bewertet wird, sind in der Richtlinie HSK-R-21, Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, festgehalten.

Das Ergebnis der Überprüfung wird in einem HSK-Gutachten sowie in Stellungnahmen (KNE, KNS) festgehalten. Darin werden auch die vom Gesuchsteller vorgeschlagenen Eignungskriterien bzw. Ausschlusskriterien gemäss Artikel 63 KEV beurteilt.

### **Erteilung der Rahmenbewilligung und weitere Untersuchungen**

Über die Erteilung der Rahmenbewilligung entscheidet der Bundesrat (Artikel 48 KEG) basierend auf den eingeholten Gutachten und Stellungnahmen. Er unterbreitet den Entscheid der Bundesversammlung zur Genehmigung. Der Beschluss der Bundesversammlung über die Genehmigung einer Rahmenbewilligung untersteht dem fakultativen nationalen Referendum. Die Rahmenbewilligung legt den Standort fest (Artikel 14 KEG); gleichzeitig erfolgt im Sachplan die Festsetzung des Standorts gemäss Raumplanungsgesetz.

Nach Erteilung der Rahmenbewilligung sind im Hinblick auf den Bau des geologischen Tiefenlagers vertiefte erdwissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen, die einen Sondierstollen oder Sondierschacht und ein Felslabor auf der Lagerebene umfassen. Die Untersuchungen müssen so ausgerichtet sein, dass die Erfüllung der in der Rahmenbewilligung festgelegten Eignungskriterien geprüft werden kann. Die Charakterisierung des Standorts und des Wirtgesteins muss unter Tage soweit fortgesetzt werden, dass die Standorteigenschaften bestätigt und ein Gesuch um Baubewilligung eingereicht werden kann.

## Abkürzungen und Begriffsbestimmungen

Abfallkategorien	In Art. 51 KEV sind drei Kategorien definiert, in welche die radioaktiven Abfälle einzuteilen sind. a. hochaktive Abfälle (HAA): abgebrannte Brennelemente, die nicht wiederaufgearbeitet werden, und verglaste Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen) b. alphatoxische Abfälle (ATA): Abfälle, deren Gehalt an Alphastrahlern den Wert von 20'000 Bq/g konditionierter Abfall übersteigt c. schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA): alle anderen radioaktiven Abfälle.
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung.
ATA	Alphatoxische Abfälle (siehe Abfallkategorien).
Beobachtungsphase	Definition gemäss Art. 3 KEG: Längerer Zeitraum, während dessen ein geologisches Tiefenlager vor dem Verschluss überwacht wird und die radioaktiven Abfälle ohne grossen Aufwand zurückgeholt werden können.
BFE	Bundesamt für Energie.
Biosphäre	Lebensraum des Menschen. Dazu zählen der Boden und die umgebenden Gewässer (Grund- und Oberflächenwässer), die eventuell als Trinkwasserreservoir genutzt werden.
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Teil des geologischen Untergrundes, der bei normaler Entwicklung des geologischen Tiefenlagers im Zusammenwirken mit den technischen Barrieren den Einschluss und die Rückhaltung der Radionuklide sicherstellen muss.
EKRA	Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle.
Entsorgung	Definition gemäss Art. 3 KEG: Konditionierung, Zwischenlagerung und Lagerung der radioaktiven Abfälle in einem geologischen Tiefenlager.
Geologische Barrieren	Geologische Einheiten zwischen dem Lager und der Biosphäre, die das Lager vor den Vorgängen in der Biosphäre schützen und die Ausbreitung der Radionuklide behindern.
Geologisches Tiefenlager	Definition gemäss Art. 3 KEG: Anlage im geologischen Untergrund, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird.
Geosphäre	Gesamtheit der geologischen Einheiten zwischen dem Lager und der Biosphäre.
HAA	Hochaktive Abfälle (siehe Abfallkategorien).
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen.
IAEA	Internationale Atomenergie Agentur. Als autonome wissenschaftlich-technische Sicherheitsbehörde sorgt die IAEA im Auftrag der Vereinten Nationen für eine friedliche Nutzung der Kernenergie und für eine Verhinderung einer militärischen Nutzung dieser Technologie durch strikte Überwachungsmaßnahmen (Safegards).
ICRP	International Commission on Radiological Protection.
Joint Convention	Gemeinsames internationales Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle.
KEG	Kernenergiegesetz vom 21. März 2003.
KEV	Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004.

KNE	Kommission Nukleare Entsorgung
KNS	Kommission für Nukleare Sicherheit
Langzeitsicherheit	Dauernder Schutz von Mensch und Umwelt nach Verschluss eines geologischen Tiefenlagers.
Radionuklid	Definition gemäss Strahlenschutzverordnung: Nuklid, das spontan unter Strahlungsemission zerfällt.
Sicherheitsanalyse	Bezogen auf die Nachverschlussphase eines geologischen Tiefenlagers ist es die Untersuchung des langfristigen Verhaltens des Mehrfachbarrierensystem unter Einwirkung aller möglicher Vorgänge, die Ermittlung der Auswirkungen dieser Entwicklung auf die Sicherheitsfunktionen und schliesslich die Berechnung der sich daraus ergebenden Strahlendosen bzw. des Risikos.
Sicherheitsbarrieren	Technische Mittel und geologische Einheiten, welche die Sicherheitsfunktionen eines Tiefenlagers wahrnehmen.
Sicherheitsfunktionen	Übergeordnete Wirkungen des Systems von technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers, welche den dauernden Schutz von Mensch und Umwelt gewährleisten müssen. Üblicherweise unterscheidet man die drei Funktionen Isolation, Einschluss und Begrenzung der Freisetzung.
Sicherheitskonzept	Beschreibung, wie die Langzeitsicherheit erbracht wird.
Sicherheitsnachweis	Nachweis aufgrund einer Sicherheitsanalyse, dass die Sicherheitsanforderungen erfüllt werden.
SGT	Sachplan Geologische Tiefenlager.
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle (siehe Abfallkategorien).
Technische Barrieren	Reihe von technischen Mitteln zum Einschluss der radioaktiven Abfälle und zur Rückhaltung der Radionuklide. Sie umfassen von innen nach aussen die Abfallmatrix, den Abfallbehälter, einen Überbehälter sowie die Verfüllung der Einlagerungstollen oder -kavernen.
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
Verschluss	Definition gemäss Art. 3 KEG: Verfüllen und Versiegeln aller untertägigen Teile und des Zugangstollens des geologischen Tiefenlagers nach Abschluss der Beobachtungsphase.
Wirtgestein	Gesteinsformation, in welcher ein geologisches Tiefenlager erstellt wird..

## Referenzen

AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.

Andersson J., Ström A., Svemar C., Almén K.-E., Ericsson L.O. (2000): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation, SKB TR-00-12, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

BFE (2006): Sachplan Geologische Tiefenlager, Entwurf Konzeptteil. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Entwurf 6. Juni 2006.

BFE (2007): Sachplan Geologische Tiefenlager, Entwurf Konzeptteil. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Energie BFE, Entwurf 11. Januar 2007.

Bork M., Kindt A., Nierste G., Walterscheidt K.-H. (2001): Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, GRS-A-2834.

CCE (1992): Endlagerung radioaktiver Abfälle: Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers. Kommission der Europäischen Gemeinschaften (CCE), Serie „Euradwaste“, Nr. 6, EUR 14598 DE.

EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Schlussbericht im Auftrage des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.

HSK (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle, Richtlinie für schweizerische Kernanlagen, HSK-R-21.

HSK (1984): Gutachten zu den Sondiergesuchen NSG 15, NSG 16, NSG 17 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, HSK 23/17.

HSK (1999): Entsorgungsnachweis für HAA/LMA - Option Endlager im Opalinuston, Beurteilungskonzept für den Standortnachweis, HSK 23/57.

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

IAEA (1994): Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Guide, Safety Series No. 111-G-4.1.

IAEA (1995): Principles of Radioactive Waste Management, Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F.

IAEA (1997): Joint Convention on the Safety of Spent Fuel and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC/546.

IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, IAEA Safety Standards No. WS-R-4.

ICRP (2000): Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste, ICRP Publication 81, Pergamon Press, Oxford and New York (2000).

Nagra (1983): Die Endlagerung schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schweiz, Evaluation der potentiellen Standortgebiete, Band 1, Grundlagen, Bewertungskriterien und Ergebnisse, NTB 83-15.

Nagra (1985): Nukleare Entsorgung Schweiz, Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985, NGB 85-01.

Nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. NTB 88-25.

Nagra (1992): Nukleare Entsorgung Schweiz – Konzept und Realisierungsplan. NTB 92-02.

Nagra (1994): Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg, NTB 94-06.

Nagra (1991): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990. NTB 91-19.

Nagra (1994): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993. NTB 94-10.

Nagra (2002): Project Opalinus Clay, Safety Report, NTB 02-05.

NEA (1991): Disposal of high-level Radioactive Wastes, Radiation protection and Safety Criteria, Proceedings of an NEA Workshop, Paris, 5-7 November 1990. – Nuclear Energy Agency (NEA), OECD, Paris.

SKB (1995): General Siting Study 95, Siting of a deep repository for spent nuclear fuel, SKB TR-95-34, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

SKB (2000): Integrated account of method, site selection and programm prior to the site investigation phase, SKB TR-01-03, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.

SKI (1990): Regulatory Guidance for Radioactive Waste Disposal – an Advisory Document. HSK, SKI, SSI, Technical Report 90:15.

VSE, GKBP, UeW, Nagra (1978): Konzept für die nukleare Entsorgung in der Schweiz.

## Anhang I

# Safety Requirements for Geological Disposal

Auszug aus IAEA (2006):

Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements

Safety Standard No. WS-R-4

### **Requirements relating to government responsibility**

The government is required to provide an appropriate national legal and organizational framework within which a geological disposal facility can be sited, designed, constructed, operated and closed. This shall include the definition of the steps in the facility's development and licensing, the clear allocation of responsibilities, the securing of financial and other resources, and the provision of independent regulatory functions.

### **Requirements for regulatory body responsibility**

The regulatory body shall establish the regulatory requirements for the development of geological disposal facilities and shall set out the procedures for meeting the requirements for the various stages of the licensing process. It shall also set conditions for the development, operation and closure of a geological disposal facility and shall carry out such activities as are necessary to ensure that the conditions are met.

### **Operator responsibility requirements**

The operator of a geological disposal facility shall be responsible for its safety. The operator shall carry out safety assessments and develop a safety case, and shall carry out all the necessary activities for siting, design, construction, operation and closure, in compliance with the regulatory requirements and within the national legal infrastructure.

### **Requirements concerning the importance of safety in the development process**

Throughout the development of a geological disposal facility, an appropriate understanding of the relevance and implications for safety of the available options shall be developed by the operator, for achieving the ultimate goal of providing an optimized level of operational and post-closure safety.

### **Requirements regarding passive safety**

The operator shall site, design, construct, operate and close the geological disposal facility in such a way that post-closure safety is ensured by passive means and does not depend on actions being taken after the closure of the facility.

### **Requirements for an adequate understanding and confidence in safety**

The operator of a geological disposal facility shall develop an adequate understanding of the features, events and processes that influence its post-closure safety over suitably long time periods, so that a sufficient level of confidence in safety is achieved.

**Requirements for multiple safety functions**

The natural and engineered barriers shall be selected and designed so as to ensure that post-closure safety is provided by means of multiple safety functions. That is, safety shall be provided by means of multiple barriers whose performance is achieved by diverse physical and chemical processes. The overall performance of the geological disposal system shall not be unduly dependent on a single barrier or function.

**Requirements concerning containment**

The engineered barriers, including the waste form and packaging, shall be so designed, and the host geological formation shall be so selected, as to provide containment of the waste during the period when the waste produces heat energy in amounts that could adversely affect the containment, and when radioactive decay has not yet significantly reduced the hazard posed by the waste.

**Isolation requirements**

The geological disposal facility shall be sited in a geological formation and at a depth that provide isolation of the waste from the biosphere and from humans over the long term, for at least several thousand years, with account taken of both the natural evolution of the geological disposal system and disturbing events.

**Requirements for step by step development and evaluation**

Geological disposal facilities shall be developed in a series of steps, each supported, as necessary, by iterative evaluations of the site, of the options for design and management, and of the performance and safety of the geological disposal system.

**Requirements concerning preparation of the safety case and safety assessment**

A safety case and supporting safety assessment shall be prepared and updated by the operator, as necessary, at each step in the development, operation and closure of the geological disposal facility. The safety case and safety assessment shall be sufficiently detailed and comprehensive to provide the necessary technical input for informing the regulatory and other decisions necessary at each step.

**Requirements on the scope of the safety case and safety assessment**

The safety case for a geological disposal facility shall describe all the safety relevant aspects of the site, the design of the facility, and the managerial and regulatory controls. The safety case and its supporting assessments shall illustrate the level of protection provided and shall provide assurance that safety requirements will be met.

**Requirements concerning documentation of the safety case and safety assessment**

The safety case and its supporting safety assessments shall be documented to a level of detail and quality sufficient to support the decision to be made at each step and to allow for their independent review.

**Requirements on site characterization**

The site for a geological disposal facility shall be characterized at a level of detail sufficient to support both a general understanding of the characteristics of the site, including its past evolution and its probable future natural evolution over the period of interest with regard to safety, and a specific understanding of the impact on safety of features, events and processes associated with the site and the facility.

**Requirements for geological disposal facility design**

The geological disposal facility and its engineered barriers shall be designed to contain the waste with its associated hazard, to be physically and chemically compatible with the geological environment, and to provide post-closure safety features that complement those afforded by the host geological environment. The facility and its engineered barriers shall be designed to ensure safety during the operational period.

**Requirements for geological disposal facility construction**

A geological disposal facility shall be constructed in accordance with the design as described in the approved safety case and safety assessments. It shall be constructed in such a way as to preserve the post-closure safety functions of the geological barrier that have been shown to be important by the safety case. The construction shall be carried out to ensure safety during the operational period.

**Requirements for geological disposal facility operation**

A geological disposal facility shall be operated in accordance with the conditions of the licence and the relevant regulatory requirements to maintain safety during the operational period, and in such a manner as to preserve the post-closure safety functions assumed in the safety case.

**Requirements for geological disposal facility closure**

A geological disposal facility shall be closed in such a way that the safety functions shown by the safety case to be important for the post-closure period are provided for. Plans for closure, including the transition from active management of the facility, shall be well defined and practicable, so that closure can be carried out safely at an appropriate time.

**Requirements on waste acceptance**

Waste packages and unpackaged waste accepted for geological disposal shall conform to criteria consistent with the safety case for aspects of the operational and post-closure safety of the geological disposal facility.

**Requirements concerning monitoring programmes**

A programme of monitoring shall be defined and carried out prior to and during the construction and operation of a geological disposal facility. This programme shall be designed to collect and update the information needed to confirm the conditions necessary for the safety of workers and members of the public and the protection of the environment during the operation of the facility and to confirm the absence of any conditions that could reduce the post-closure safety of the facility.

**Requirements concerning post-closure and institutional controls**

Plans shall be prepared for the post-closure period to address institutional control and the arrangements for maintaining the availability of information on the geological disposal facility. These plans shall be consistent with passive safety and shall form part of the safety case on which authorization to close the facility is granted.

**Requirements in respect of nuclear safeguards**

Nuclear safeguards requirements shall be considered in the design and operation of a geological disposal facility to which nuclear safeguards apply, and shall be implemented in such a way as not to compromise the safety of the geological disposal facility.

**Requirements concerning management systems**

Management systems to provide for quality assurance shall be applied to all safety related activities, systems and components throughout all the steps of the development and operation of a geological disposal facility. The level of assurance for each aspect shall be commensurate with its importance to safety.

## Anhang II

### Site Selection Guidelines

Auszug aus IAEA (1994):  
Siting of Geological Disposal Facilities, Safety Guide  
Safety Series No. 111-G-4.1

#### **Geological setting**

The geological setting of a repository should be amenable to overall characterization and have geometrical, physical and chemical characteristics that combine to inhibit the movement of radionuclides from the repository to the environment during the time period of concern.

#### **Future natural changes**

The host rock should not be liable to be affected by future geodynamic phenomena (climatic changes, neotectonics, seismicity, volcanism, diapirism) to such an extent that these could unacceptably impair the isolation capability of the overall disposal system.

#### **Hydrogeology**

The hydrogeological characteristics and setting of the geological environment should tend to restrict groundwater flow within the repository and should support safe waste isolation for the required times.

#### **Geochemistry**

The physicochemical and geochemical characteristics of the geological and hydrogeological environment should tend to limit the release of radionuclides from the disposal facility to the accessible environment.

#### **Events resulting from human activities**

The siting of a disposal facility should be made with consideration of actual and potential human activities at or near the site. The likelihood that such activities could affect the isolation capability of the disposal system and cause unacceptable consequences should be minimized.

#### **Construction and engineering conditions**

The surface and underground characteristics of the site should permit application of an optimized plan of surface facilities and underground workings and the construction of all excavations in compliance with appropriate mining rules.

#### **Transportation of waste**

The site should be located such that radiation exposure of the public and the environmental impacts of transporting the waste to the site are within acceptable limits.

#### **Protection of the environment**

The site should be located such that the quality of the environment will be adequately protected and the potentially adverse impacts can be mitigated to an acceptable degree, taken into account technical, economic, social and environmental factors.

#### **Land use**

In the selection of suitable sites, land use and ownership of land should be considered in connection with possible future development and regional planning in the area of interest.

#### **Social impacts**

The site should be located so that the overall societal impact of implementing a repository system at the site is acceptable. Beneficial effects of the siting of a repository in a region or area should be enhanced whenever feasible and any negative societal impacts should be minimized.

## Anhang III

### Joint Convention

Auszug aus der Joint Convention (1997)  
betreffend Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle  
(deutsche Übersetzung, aus der Botschaft des Bundesrates vom 31. März 1999)

#### **Art. 11: Allgemeine Sicherheitsanforderungen**

Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen, dass in allen Stufen der Behandlung radioaktiver Abfälle der Einzelne, die Gesellschaft und die Umwelt angemessen vor strahlungsbedingter und sonstiger Gefährdung geschützt sind.

Zu diesem Zweck trifft jede Vertragspartei die geeigneten Massnahmen,

- i) um sicherzustellen, dass der Kritikallität und der Abführung der während der Behandlung radioaktiver Abfälle entstehenden Restwärme angemessen Rechnung getragen wird;
- ii) um sicherzustellen, dass die Erzeugung radioaktiver Abfälle auf das praktisch mögliche Mindestmass beschränkt wird;
- iii) um die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Schritten der Behandlung radioaktiver Abfälle zu berücksichtigen;
- iv) um durch die Anwendung geeigneter Schutzmethoden, die von der staatlichen Stelle genehmigt worden sind, auf nationaler Ebene für einen wirksamen Schutz des Einzelnen, der Gesellschaft und der Umwelt zu sorgen, und zwar im Rahmen innerstaatlicher Rechtsvorschriften, die international anerkannten Kriterien und Normen gebührend Rechnung tragen;
- v) um die biologische, chemische und sonstige Gefährdung, die mit der Behandlung radioaktiver Abfälle verbunden sein kann, zu berücksichtigen;
- vi) um sich zu bemühen, Handlungen zu vermeiden, deren vernünftigerweise vorhersehbare Auswirkungen auf künftige Generationen grösser sind als die für die heutige Generation zulässigen;
- vii) um zu versuchen, künftigen Generationen keine unangemessenen Belastungen aufzubürden.

#### **Art. 12: Vorhandene Anlagen und frühere Tätigkeiten**

Jede Vertragspartei trifft zur gegebenen Zeit die geeigneten Massnahmen,

- i) um die Sicherheit jeder Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle, die zu dem Zeitpunkt, zu dem dieses Übereinkommen für die Vertragspartei in Kraft tritt, vorhanden ist, zu überprüfen und um sicherzustellen, dass nötigenfalls alle zumutbaren und praktisch möglichen Verbesserungen zur Erhöhung der Sicherheit dieser Anlage vorgenommen werden;

- ii) um die Folgen früherer Tätigkeiten zu überprüfen und dann zu entscheiden, ob aus Strahlenschutzgründen ein Eingreifen erforderlich ist, wobei zu beachten ist, dass die Verminderung der Beeinträchtigung infolge der Verringerung der Strahlenbelastung so erheblich sein soll, dass sie den Schaden und die Kosten, einschliesslich der sozialen Kosten, eines solchen Eingreifens rechtfertigt.

### **Art. 13 Wahl des Standorts geplanter Anlagen**

(1) Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen, dass für eine geplante Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle Verfahren festgelegt und angewendet werden,

- i) um die Bewertung aller einschlägigen standortbezogenen Faktoren zu ermöglichen, welche die Sicherheit einer solchen Anlage während ihrer Betriebsdauer sowie die Sicherheit eines Endlagers nach dem Verschluss beeinträchtigen könnten;
- ii) um die Bewertung der mutmasslichen Auswirkungen einer solchen Anlage auf die Sicherheit des einzelnen, der Gesellschaft und der Umwelt zu ermöglichen, wobei eine mögliche Veränderung der Standortbedingungen von Endlagern nach dem Verschluss zu berücksichtigen ist;
- iii) um der Öffentlichkeit Informationen über die Sicherheit einer solchen Anlage zugänglich zu machen;
- iv) um Konsultationen mit Vertragsparteien in der Nachbarschaft einer solchen Anlage aufnehmen zu können, soweit sie durch diese Anlage betroffen sein könnten, und um die Übermittlung allgemeiner Daten über die Anlage an sie auf ihr Verlangen zu ermöglichen, damit diese die mutmasslichen Auswirkungen der Anlage auf die Sicherheit ihres Hoheitsgebiets beurteilen können.

(2) Zu diesem Zweck trifft jede Vertragspartei die geeigneten Massnahmen, um durch die Wahl des Standorts nach den allgemeinen Sicherheitsanforderungen des Artikels 11 sicherzustellen, dass diese Anlagen keine unannehmbaren Auswirkungen auf andere Vertragsparteien haben.

### **Art. 14 Auslegung und Bau von Anlagen**

Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen,

- i) dass bei der Auslegung und dem Bau einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle geeignete Vorkehrungen zur Begrenzung möglicher strahlungsbedingter Auswirkungen auf den Einzelnen, die Gesellschaft und die Umwelt, auch aufgrund von Ableitungen oder unkontrollierten Freisetzungen, getroffen werden;
- ii) dass im Stadium der Auslegung Planungskonzepte und, soweit erforderlich, technische Vorschriften für die Stilllegung einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle, ausgenommen Endlager, berücksichtigt werden;
- iii) dass im Stadium der Auslegung technische Vorschriften für den Verschluss eines Endlagers ausgearbeitet werden;
- iv) dass sich die bei der Auslegung und dem Bau einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle eingesetzten Techniken auf Erfahrung, Erprobung oder Analyse stützen.

**Art. 15: Bewertung der Anlagensicherheit**

Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen,

- i) dass vor dem Bau einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle entsprechend der von der Anlage ausgehenden Gefährdung und unter Berücksichtigung ihrer Betriebsdauer eine systematische Sicherheitsbewertung und eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt vorgenommen werden;
- ii) dass ausserdem vor dem Bau eines Endlagers für die Zeit nach dem Verschluss eine systematische Sicherheitsbewertung und eine Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt vorgenommen und die Ergebnisse anhand der von der staatlichen Stelle festgelegten Kriterien bewertet werden;
- iii) dass vor Inbetriebnahme einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle auf den neuesten Stand gebrachte detaillierte Fassungen der Sicherheitsbewertung und der Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt erstellt werden, sofern dies zur Vervollständigung der unter Ziffer i genannten Bewertungen für notwendig erachtet wird.

**Art. 16: Betrieb von Anlagen**

Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen,

- i) dass die Genehmigung für den Betrieb einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle auf geeigneten Bewertungen nach Artikel 15 beruht und von der Durchführung eines Programms zur Inbetriebnahme abhängt, das zeigt, dass die Anlage, wie sie gebaut wurde, den Auslegungs- und Sicherheitsanforderungen entspricht;
- ii) dass die aus Erprobungen, der Betriebserfahrung und den Bewertungen nach Artikel 15 hervorgehenden betrieblichen Grenzwerte und Bedingungen festgelegt und bei Bedarf überarbeitet werden;
- iii) dass Betrieb, Wartung, Überwachung, Inspektion und Erprobung einer Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle in Übereinstimmung mit festgelegten Verfahren erfolgen. Bei einem Endlager werden die dabei erzielten Ergebnisse dazu verwendet, die Gültigkeit getroffener Annahmen nachzuweisen und zu prüfen und die Bewertungen nach Artikel 15 für die Zeit nach dem Verschluss auf den neuesten Stand zu bringen;
- iv) dass die ingenieurtechnische und technische Unterstützung in allen sicherheitsbezogenen Bereichen während der Betriebsdauer einer Anlage zur Verfügung steht;
- v) dass Verfahren zur Beschreibung und Trennung radioaktiver Abfälle angewendet werden;
- vi) dass für die Sicherheit bedeutsame Ereignisse der staatlichen Stelle rechtzeitig vom Inhaber der Genehmigung gemeldet werden;
- vii) dass Programme zur Sammlung und Analyse einschlägiger Betriebserfahrungen aufgestellt werden und dass die Ergebnisse daraus gegebenenfalls als Grundlage des Handelns dienen;

- viii) dass für eine Anlage zur Behandlung radioaktiver Abfälle, ausgenommen Endlager, Stilllegungspläne ausgearbeitet und bei Bedarf unter Verwendung von Informationen, die während der Betriebsdauer dieser Anlage gesammelt wurden, auf den neuesten Stand gebracht und von der staatlichen Stelle überprüft werden;
- ix) dass Pläne für den Verschluss eines Endlagers ausgearbeitet und bei Bedarf unter Verwendung von Informationen, die während der Betriebsdauer dieser Anlage gesammelt wurden, auf den neuesten Stand gebracht und von der staatlichen Stelle überprüft werden.

**Art. 17: Behördliche Massnahmen nach dem Verschluss**

Jede Vertragspartei trifft die geeigneten Massnahmen, um sicherzustellen, dass nach dem Verschluss eines Endlagers

- i) die von der staatlichen Stelle benötigten Unterlagen über die örtlichen Gegebenheiten, die Auslegung und Bestände der betreffenden Anlage aufbewahrt werden;
- ii) bei Bedarf aktive oder passive behördliche Kontrollen wie etwa Überwachungen oder Zugangsbeschränkungen durchgeführt werden;
- iii) gegebenenfalls eingegriffen wird, wenn zu irgendeiner Zeit während einer aktiven behördlichen Kontrolle eine ungeplante Freisetzung radioaktiver Stoffe in die Umwelt erkannt wird.

## Anhang IV

# Stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen von der Etappe 1 zur Etappe 3

### 1. Einleitung

Nach internationalen Empfehlungen zeichnet sich ein Standortauswahlverfahren durch eine breite Anlage der Standortsuche, ein schrittweises Einengen der in Frage kommenden Gebiete und der Anwendung sicherheitsorientierter Kriterien aus. Der Sachplan Geologische Tiefenlager folgt diesen Grundsätzen und definiert deshalb drei Etappen, welche basierend auf bisherigen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der geologischen Kenntnisse der Schweiz zu Standorten für die benötigten geologischen Tiefenlager führen.

Der Nachweis der Sicherheit eines HAA- und SMA-Lagers stellt zum Teil unterschiedliche Anforderungen an das Wirtgestein und dessen langfristiges Einschliessvermögen, denn die eingelagerten Abfälle unterscheiden sich bezüglich chemisch-physikalischer Eigenschaften, Zerfallscharakteristik, Toxizität und Gefährdungspotenzial. Deshalb können erst dann quantitative Anforderungen an die geologische Barriere gestellt werden, wenn das Abfallinventar (Abfallvolumen, Nuklidinventar, chemisch-physikalische Beschaffenheit der Abfallgebinde etc.) für die Planung festgelegt ist. Die Entsorgungspflichtigen definieren deshalb als erstes die Abfallzuweisung auf die beiden Lagertypen (SMA und HAA) und leiten darauf basierend für jeden Lagertyp quantitative Mindestanforderungen an die geologischen Barrieren ab. Diese dienen als Zielvorgaben für das im Sachplan festgehaltene Standortauswahlverfahren, das eine schrittweise Einengung möglicher Standorte bzw. Wirtgesteine und eine stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen von Etappe 1 bis Etappe 3 vorsieht.

Als wichtigste Einflussfaktoren für die Standortevaluation wurden 13 Einzelkriterien erkannt, die das Einschliessvermögen des Gesteins, die Langzeitbeständigkeit der Barrierenwirkung, die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen sowie die bautechnischen Eigenschaften betreffen (Tabelle 4-1). Die Kriterien, beziehungsweise die zu beurteilenden Aspekte, sind in der Regel in ihrer sicherheitsbezogenen Wirkung miteinander verknüpft. Nur bei extrem ungünstigen Werten kann ein Einzelkriterium entscheiden, dass ein Gebiet oder ein Standort als ungeeignet ausscheidet. Im Allgemeinen ist es die Gesamtheit der aufgeführten Kriterien, die eine Beurteilung der Eignung bzw. der Sicherheit ermöglicht. Dazu ist eine integrale Sicherheitsbetrachtung erforderlich.

Die Anforderungen an die Sicherheit geologischer Tiefenlager für radioaktive Abfälle sind in der Richtlinie HSK-R-21 festgehalten<sup>2</sup>. HSK-R-21 definiert die grundsätzlichen Prinzipien und Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung, sowie konkrete quantitative Schutzziele, die ein geologisches Tiefenlager einhalten muss. Die quantitativen Anforderungen (Dosis- und Risiko-

---

<sup>2</sup> Diese Richtlinie wurde vor der neuen Kernenergiegesetzgebung erarbeitet und verwendet anstelle des neu eingeführten Begriffs der geologischen Tiefenlagerung noch den Begriff der Endlagerung. Gemäss KEV Art. 11 regelt die HSK spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager in Richtlinien. Eine entsprechende neue Richtlinie G03 ist gegenwärtig in Bearbeitung und wird HSK-R-21 ersetzen. Das nachfolgend verwendete Schutzziel von 0.1 mSv/Jahr der gegenwärtigen Richtlinie HSK-R-21 wird beibehalten.

Schutzziele) leiten sich aus der Strahlenschutzgesetzgebung (StSG und StSV) sowie aus internationalen Empfehlungen (ICRP, IAEA) ab. Die Freisetzung von Radionukliden aus einem verschlossenen Tiefenlager darf nach HSK-R-21 zu keinen jährlichen Individualdosen führen, die 0.1 mSv überschreiten. Diese Dosislimite ist im internationalen Vergleich tief angesetzt (ICRP empfiehlt maximal 0.3 mSv pro Jahr) und bildet den Bewertungsmaßstab für die radiologische Sicherheit.

Um ein auf die Sicherheit ausgerichtetes Auswahlverfahren, welches den Vergleich von möglichen geologischen Standortgebieten und Standorten erlaubt, durchführen zu können, sind in allen Schritten des Auswahlverfahrens Sicherheitsbetrachtungen notwendig. Die zu Beginn von Etappe 1 geforderte *generische Sicherheitsbetrachtung* dient der Herleitung der quantitativen Anforderungen und Zielvorgaben an die geologische Barriere unter Berücksichtigung des definierten Abfallinventars. Die *provisorische Sicherheitsanalyse* der Etappe 2 umfasst eine quantitative Analyse des Einschluss- und Rückhaltevermögens des Wirtgesteins und des Verhaltens des Gesamtsystems und dient dem sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte. Die *Sicherheitsanalyse* der Etappe 3 erfolgt im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsverfahren und ist detaillierter und umfassender. Sie stützt sich auf vor Ort erhobene Daten und dient dem Nachweis der Langzeitsicherheit des geplanten Tiefenlagers, wie sie in der Kernenergiegesetzgebung gefordert wird. Im Folgenden wird diese stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen näher erläutert.

## 2. Generische Sicherheitsbetrachtung (Etappe 1)

**Ziel:** Die generische Sicherheitsbetrachtung hat zum Ziel, ausgehend von einem definierten Abfallinventar die quantitativen Anforderungen und Vorgaben an die geologische Barriere herzuleiten und die standortrelevanten Kriterien gemäss Tabelle 4-1 soweit möglich zu quantifizieren. Sie gilt nicht als Sicherheitsnachweis für geologische Tiefenlager.

**Inhalt:** Die generische Sicherheitsbetrachtung ist eine orientierende quantitative Analyse des Einschluss- und Rückhaltevermögens des Gesamtsystems oder einzelner Teile davon. Sie berücksichtigt das definierte Abfallinventar und die vorgesehenen technischen Barrieren sowie eine oder mehrere modellhafte geologische Situationen. Die Analyse stützt sich beim Abfallinventar und den technischen Barrieren soweit möglich auf spezifische Daten oder, falls solche nicht vorliegen oder nicht einfach zu erheben sind, auf generische (allgemeine, typische) Materialkennwerte. Für die geologischen Barrieren werden generische Eigenschaften verwendet, die durch die vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen belegbar sind.

Mit der generischen Sicherheitsbetrachtung werden die erwarteten Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems und die quantitativen Zielvorgaben an die Eigenschaften der geologischen Barriere begründet. Der Bewertungsmaßstab wird in Bezug auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft erläutert. Für die Herleitung der quantitativen Zielvorgaben an die geologische Barriere (Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, hydraulische Durchlässigkeit) dient den Entsorgungspflichtigen das Dosis-Schutzziel der Richtlinie HSK-R-21 von 0.1 mSv/Jahr.

### 3. Provisorische Sicherheitsanalyse (Etappe 2)

**Ziel:** Die provisorische Sicherheitsanalyse hat zum Ziel, über die Wirkung und das Verhalten der einzelnen Barrieren Auskunft zu geben und zu zeigen, ob die berechneten Dosen unterhalb des Dosis-Schutzziels der Richtlinie HSK-R-21 liegen. Numerische Berechnungen sind Teil der provisorischen Sicherheitsanalyse des jeweiligen Standorts. Die Ergebnisse der Analysen dienen dem sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten und geben auch Hinweise auf den Umfang der notwendigen weiteren Untersuchungen in Etappe 3, um die erforderliche Datensicherheit für ein Rahmenbewilligungsgesuch zu erreichen.

**Inhalt:** Die in Etappe 2 geforderten provisorischen Sicherheitsanalysen müssen aufgrund des Lagerkonzepts unter Berücksichtigung des definierten Abfallinventars und aufgrund der verfügbaren technischen und wissenschaftlichen Daten insbesondere Auskunft geben über:

- Rückhaltevermögen des Gesamtsystems (technische und geologische Barrieren und ihre Wechselwirkungen) und die maximale Dosis aus den realistischere zu erwartenden Freisetzungen (Referenzszenarium);
- Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit;
- Langzeitverhalten der Barrieren.

In der provisorischen Sicherheitsanalyse wird die mögliche Freisetzung von Radionukliden (Migration der Nuklide vom Tiefenlager bis in die Biosphäre) quantitativ bestimmt. Der Analyse werden ein definiertes Abfallinventar sowie begründete Annahmen und Erwartungswerte zu den Eigenschaften der vorgesehenen technischen und geologischen Barrieren zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der Wasserfließwege in der Geosphäre und der Biosphäre sowie der möglichen Aufnahme der Radionuklide über das Trinkwasser und die Nahrung wird die Dosis für eine Einzelperson berechnet und beurteilt. Als Bewertungsmaßstab für die Sicherheit gilt das in HSK-R-21 festgelegte Dosis-Schutzziel von 0.1 mSv/Jahr.

In die Bewertung sind zusätzlich Aspekte des Systemverhaltens und der Robustheit einzubeziehen. Darunter ist folgendes zu verstehen:

- Variabilität bzw. Ungewissheiten der in den Modellierungen verwendeten Parametern und ihr Einfluss auf die Dosisberechnungen;
- Sensitivität der errechneten Dosis auf ein von den Erwartungen abweichendes Systemverhalten;
- Verlässlichkeit der räumlichen und zeitlichen Prognose (Explorierbarkeit, Prognostizierbarkeit, Zuverlässigkeit der Daten).

### 4. Vergleich von Standorten (Etappe 2)

Als Zwischenergebnis in Etappe 2 darf kein Standort vorgeschlagen werden, der aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse und der weiteren sicherheitstechnischen Aspekte eindeutig als weniger geeignet bewertet ist als die anderen. Gleichzeitig dürfen Standorte nicht aufgrund von Dosisdifferenzen ausgeschlossen werden, die nur durch Ungewissheiten der zugrunde gelegten Daten verursacht werden.

Für den sicherheitstechnischen Vergleich von potenziellen Standorten ist ein standardisiertes Vorgehen erforderlich, das einerseits die quantitativen Ergebnisse der provisorischen Sicher-

heitsanalysen berücksichtigt und andererseits auch den qualitativen Aspekten der Sicherheitsbetrachtungen Rechnung trägt. Der Vergleich enthält folgende drei Elemente:

- 1) Darlegung der quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (Referenzszenarium, zeitlicher Verlauf der Personendosiskurve).
- 2) Diskussion der Robustheit des Tiefenlagersystems gegenüber internen und externen Störereignissen und Aufzeigen der Ungewissheiten/Variabilitäten in den in den Modellierungen verwendeten Parametern und deren Einfluss auf die Personendosiskurve.
- 3) Bewertung der übrigen (qualitativen) Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (z.B. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, mögliche Beeinträchtigung durch Tiefenerosion). Weitere qualitative Sicherheitsindikatoren (z.B. Verweil- oder Einschlusszeiten natürlicher Tracerstoffe im Porenwasser des Wirtgesteins) sind zu berücksichtigen, soweit vorhanden.

Der sicherheitstechnische Vergleich der Standorte erfolgt zuerst durch die nachfolgend beschriebene Methode, die auch einen Vergleich der numerischen Berechnungen beinhaltet. Dabei werden die erwartete Entwicklung des Gesamtsystems (Tiefenlager, Nahfeld, Geosphäre) sowie seine Robustheit und die Ungewissheiten und Variabilitäten in den quantitativen Parametern berücksichtigt. Standorte, die sich bei diesem Vergleich als eindeutig weniger geeignet als andere erweisen oder das Dosis-Schutzziel nicht erfüllen, scheiden aus.

Die verbleibenden Standorte werden anschliessend anhand der qualitativen Sicherheitskriterien gemäss Punkt 3) bewertet. Ein Standort kann ausscheiden, falls bei dieser Bewertung eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standorten festgestellt werden.

### **Vergleichsmethode für die numerischen Berechnungen**

Für den Vergleich von Standorten werden die Resultate der numerischen Berechnungen herangezogen und anhand zweier radiologischer Kriterien bewertet. Das erste Kriterium ist das in HSK-R-21 festgelegte Schutzziel von 0.1 mSv/Jahr, das zweite der aus der Strahlenschutzverordnung StSV abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr, unterhalb welchem alle Standorte als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet werden.

Die Festlegung eines unteren Schwellenwerts für die potenzielle jährliche Personendosis ist nach der schweizerischen Strahlenschutzgesetzgebung gerechtfertigt. Gemäss StSV wird auf eine weitergehende strahlenschutztechnische Optimierung verzichtet, falls Personen eine effektive Dosis von weniger als 0.01 mSv pro Jahr akkumulieren.

Der Vergleich zwischen möglichen Standorten wird deshalb wie folgt durchgeführt:

- Für jeden Standort soll mit einem Referenzszenarium der Zeitverlauf der realistischerweise zu erwartenden Dosen berechnet werden (Referenzfall). Das Referenzszenarium beschreibt die wahrscheinliche Entwicklung des Gesamtsystems (Tiefenlager, Nahfeld, Geosphäre und Nuklidtransport bis in die Biosphäre). Die in die Modellierung eingehenden Annahmen und Parameterwerte für den Referenzfall werden von den Entsorgungspflichtigen begründet. Sie geben gemäss Stand von Wissenschaft und Technik eine realistische Situation wieder. Diese Berechnung zeigt den zeitlichen Verlauf der Personendosis, deren Maximum den maximalen Wert der Personendosis im Referenzfall ergibt (grüner Punkt in Abbildung 1).

- Um für das Referenzszenarium die Robustheit sowie den Einfluss von Ungewissheiten und Variabilitäten beurteilen zu können, wird das Verhalten des Tiefenlagers für andere Entwicklungen (z.B. erhöhter Wasserfluss, früheres Versagen der HAA-Behälter, pessimistischere Werte für die Sorption) berechnet. Die Aufsichtsbehörde legt zu diesem Zweck ein standardisiertes Parametervariationsverfahren innerhalb des Referenzszenariums fest. Durch dieses Verfahren wird das Maximum der Personendosis im Parametervariationsverfahren ermittelt (roter Punkt in Abbildung 1).
- Für jeden Standort ergibt sich daraus ein charakteristisches Dosisintervall als Mass für seine sicherheitstechnische Eignung. Das Dosisintervall erstreckt sich dabei von der im Referenzfall berechneten maximalen Dosis bis zu dem mit dem Parametervariationsverfahren bestimmten Dosismaximum (blaues Intervall in Abbildung 1).

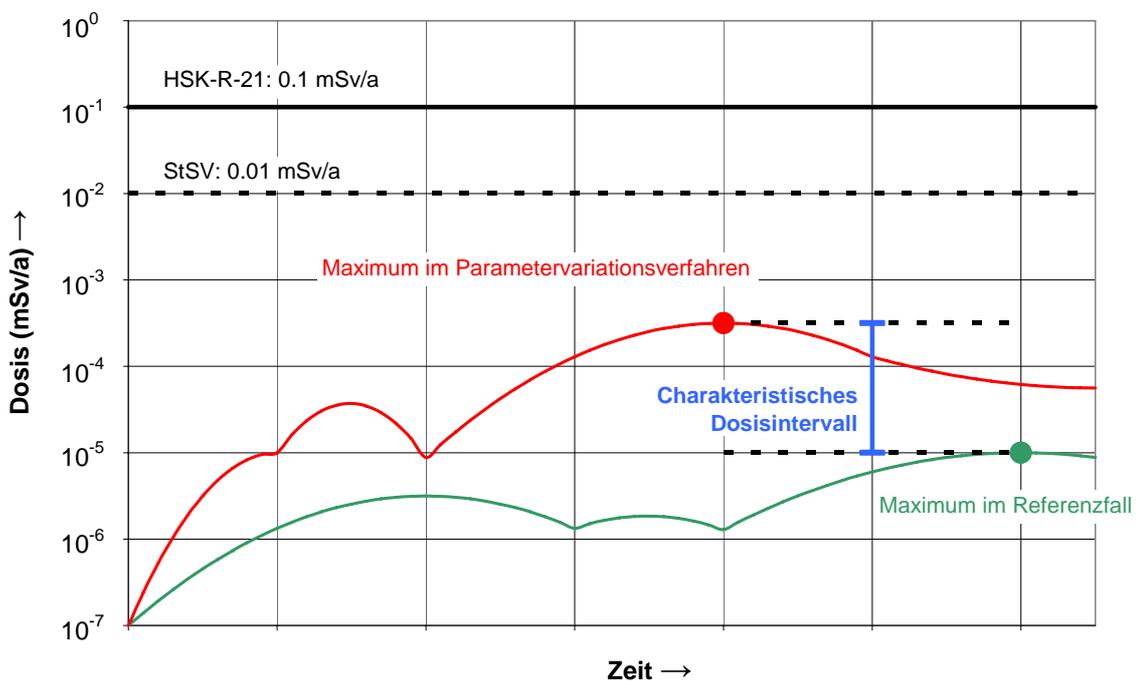


Abbildung 1: Ermittlung des in der Vergleichsmethode verwendeten charakteristischen Dosisintervalls für einen Tiefenlagerstandort: Der zeitliche Verlauf der berechneten Dosen wird für den Referenzfall (grün) und für die mit dem Parametervariationsverfahren definierten Fälle (rot) berechnet. Die jeweiligen Dosismaxima sind eingezeichnet (roter und grüner Punkt), sie legen das charakteristische Dosisintervall (blau) für den Standort fest. Anmerkung: Die eingezeichneten Dosiskurven sind hypothetische Beispiele.

- Berücksichtigt werden nur Standorte, deren Dosisintervalle unterhalb des in HSK-R-21 definierten Schutzziels von 0.1 mSv/a liegen. Diese Standorte werden als sicherheitstechnisch geeignet eingestuft. Die übrigen Standorte scheiden aus.
- Keine sicherheitstechnische Unterscheidung zwischen Standorten wird vorgenommen, falls ihre Dosisintervalle unterhalb von 0.01 mSv/a liegen. Diese Standorte werden als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet.
- Ein Standort, bei dem ein Teil des Dosisintervalls zwischen 0.01 und 0.1 mSv/a liegt, bleibt im Standortauswahlverfahren, falls sein Dosisintervall mit dem Dosisintervall des

Standorts mit den niedrigsten Dosen (Standort 1 in Abbildung 2) überlappt. Dieses Vergleichskriterium des Dosisintervalls wird verwendet, damit ein möglicherweise geeigneter Standort nicht aufgrund einer allenfalls noch unvollständigen Datengrundlage frühzeitig aus dem Verfahren ausscheidet.

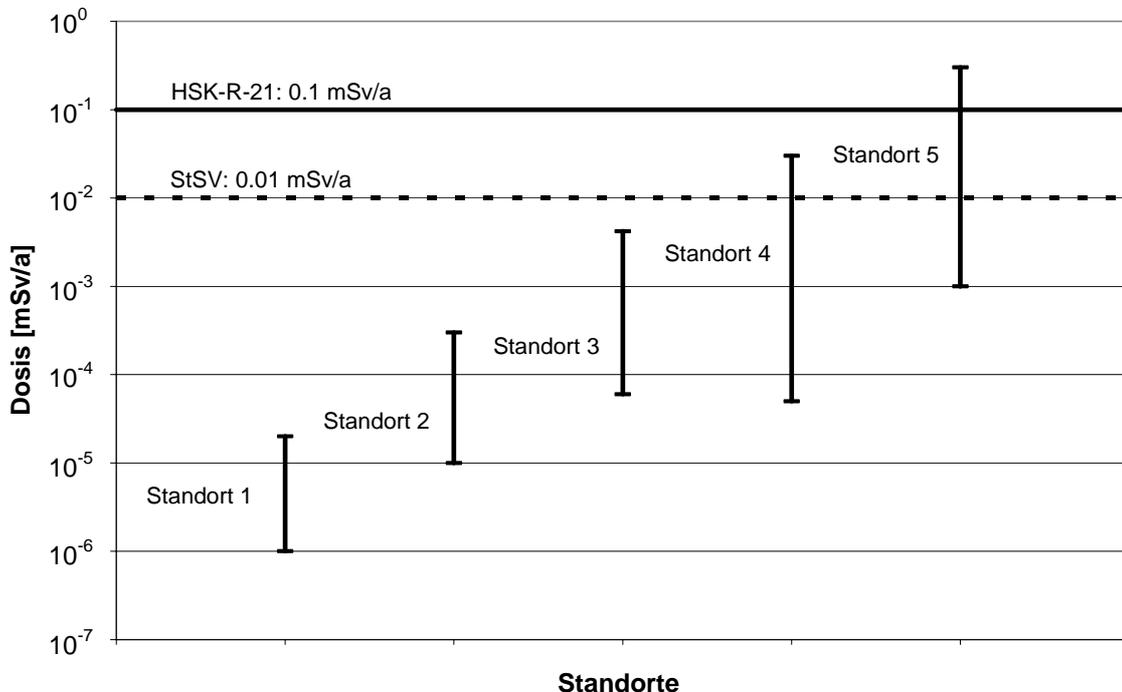


Abbildung 2: Dosisintervalle der provisorischen Sicherheitsanalysen für fünf hypothetische Standorte (die in verschiedenen Wirtgesteinen liegen können). Jeder Standort wird mit dem radiologisch besten Standort (Standort mit tiefster Dosis im Referenzfall, im Beispiel Standort 1) verglichen. In diesem Beispiel scheidet Standort 5 aus, da der obere Wert des Intervalls der Dosismaxima über dem Schutzziel der HSK-R-21 von 0.1 mSv/a liegt. Standorte 1, 2, 3 und 4 sind sicherheitstechnisch geeignet, da ihre charakteristischen Dosisintervalle unterhalb des Schutzziels von 0.1 mSv/a liegen. Standorte 1, 2 und 3 gelten ausserdem sicherheitstechnisch als gleichwertig, da ihre Dosisintervalle unter dem Schwellenwert von 0.01 mSv/a liegen. Standort 4 wird für weitere Verfahrensschritte ausgeschlossen, da sein Dosisintervall nicht mit demjenigen des besten Standorts (Standort 1) überlappt und über 0.01 mSv/Jahr hinausgeht.

## 5. Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsverfahren (Etappe 3)

**Ziel:** Ziel der Sicherheitsanalyse ist die Erbringung des Sicherheitsnachweises auf Stufe Rahmenbewilligung gemäss KEG (Artikel 12-14) und KEV (Artikel 22-23, 62).

**Inhalt:** Die Sicherheitsanalyse ist gemäss den Anforderungen von KEG, KEV und den Vorgaben der Richtlinie HSK-R-21 vorzunehmen. Die provisorische Sicherheitsanalyse des Standorts wird dabei entsprechend vertieft und mit einer umfassenden Szenarien- und Risikoanalyse ergänzt.