

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

**Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten
geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den
Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA**

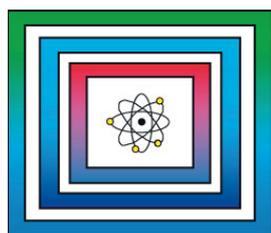
Kurzstudie der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
(BGR), Hannover, April 2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 23 a</p>

Projekt Endlagerkommission

9S2014010000

Abriss der Standortauswahl
und Darstellung
der angewandten
geowissenschaftlichen
Kriterien bei den
Endlagerprojekten in den
Ländern Schweiz, Frankreich,
Schweden, Belgien und USA



Kurzstudie

Hannover, April 2015

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE
HANNOVER

Projekt Endlagerkommission

Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten
geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den
Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA

Kurzstudie

Autoren:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Auftraggeber:	BMWi
Auftragsnummer:	9S2014010000
Geschäftszeichen:	B3.4/B50100-10/2015-0006/002
Datum:	20.04.2015

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Schweiz.....	4
1.1 Das Entsorgungsprogramm im Überblick.....	4
1.2 Vorstudien.....	5
1.3 Das Projekt Gewähr.....	9
1.4 Der Entsorgungsnachweis.....	10
1.5 Sachplan Geologisches Tiefenlager (SGT).....	14
1.5.1 SGT-Etappe 1.....	15
1.5.2 SGT-Etappe 2.....	22
1.5.3 SGT-Etappe 3.....	28
1.6 Literaturverzeichnis.....	29
1.7 Anhang: Tabellen.....	33
2 Frankreich.....	61
2.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl.....	61
2.2 Verlauf der Standortauswahl.....	61
2.2.1 Phase I (bis 1991).....	61
2.2.2 Phase 2 (1991 bis heute).....	62
2.3 Standortauswahlkriterien aufgrund von Empfehlungen und gesetzlichen Vorgaben.....	65
2.4 Zusammenfassung.....	69
2.5 Literaturverzeichnis.....	70
3 Schweden.....	73
3.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl in Schweden.....	73
3.2 Verlauf der Standortauswahl.....	73
3.3 Standortauswahlkriterien.....	75
3.3.1 Allgemeine Anforderungen.....	75
3.3.2 Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen.....	75
3.3.3 Vergleichsfaktoren und Abwägungskriterien.....	77
3.4 Literaturverzeichnis.....	79
4 Belgien.....	81
4.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl in Belgien.....	81
4.2 Verlauf des belgischen Untersuchungsprogramms zur Standortauswahl.....	81
4.3 Auswahl der Kriterien.....	83
4.3.1 Kriterien zur Vorauswahl.....	83
4.3.2 Ableitung möglicher Kriterien für ein zukünftiges Auswahlverfahren.....	87
4.4 Zusammenfassung.....	89
4.5 Literaturverzeichnis.....	90

Seite

5	USA	92
5.1	Historie der Standortauswahl der WIPP-Site.....	92
5.2	Bewertung von Salzformationen in den USA.....	99
5.3	Regelungen für eine Rückholung der Abfälle aus der WIPP-Site.....	101
5.4	Studie über geologische Kriterien zur Standortauswahl.....	102
5.5	Untersuchung alternativer Entsorgungsoptionen.....	102
5.6	Nuclear Waste Policy Act der USA von 1982	102
5.7	Standortkriterien der NRC-Richtlinie 10 CFR 60.....	104
5.7.1	Günstige Bedingungen.....	104
5.7.2	Möglicherweise ungünstige Bedingungen.....	105
5.8	Standortkriterien der DOE-Richtlinien 10 CFR 960.....	107
5.8.1	Eignungsvoraussetzungen.....	107
5.8.2	Günstige Bedingungen.....	109
5.8.3	Möglicherweise ungünstige Bedingungen.....	112
5.8.4	Ausschlusskriterien bezüglich der Vorverschlussphase.....	115
5.8.5	Ausschlusskriterien bezüglich der Nachverschlussphase.....	117
5.9	Abänderungsgesetz von 1987 - Rückholbarkeitsoption	118
5.10	Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future.....	118
5.11	Literaturverzeichnis.....	119
	Tabellenverzeichnis.....	123
	Abbildungsverzeichnis.....	124

Gesamtblattzahl: 124

1 Schweiz

1.1 *Das Entsorgungsprogramm im Überblick*

Die schweizerische Gesetzgebung schreibt geologische Tiefenlagerung für alle radioaktiven Abfälle vor. Die Schweiz legte im Bundesbeschluss zum Atomgesetz vom 6. Oktober 1978 fest, dass die Rahmenbewilligung für ein neues Kernkraftwerk nur erteilt wird, wenn die dauernde und sichere Entsorgung und Endlagerung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle gewährleistet ist. Mit dem Entsorgungsnachweis muss also im Sinne einer Machbarkeitsstudie aufgezeigt werden, dass eine sichere geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz möglich ist (HSK 2005). Das Entsorgungsprogramm der Schweiz zur Suche eines geologischen Tiefenlagers für hoch radioaktive Abfälle, des sogenannten HAA-Lagers, wurde 1978 begonnen. Das HAA-Lager soll abgebrannte Brennelemente (BE) und verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) aufnehmen.

Die Pflicht zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle und die grundsätzlichen Anforderungen an die geologische Tiefenlagerung sind im Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 festgelegt, das am 1. Februar 2005 in Kraft gesetzt wurde. Eingehendere Bestimmungen, besonders die Elemente eines geologischen Tiefenlagers betreffend (u. a. Testbereiche, Pilotlager, Verfüllung und Verschluss), sind in der Kernenergieverordnung (KEV) festgehalten. Die detaillierten Anforderungen an die Langzeitsicherheit sind in der Richtlinie HSK-R-21 (HSK 1993) konkretisiert.

Nach einer langen Zeit der Vorbereitung („wissen wie“) wird die Standortsuche seit 2008 mit dem „Sachplan geologisches Tiefenlager“ orientiert umgesetzt („wissen wo“) (ZUIDEMA 2015):

- 1978 Konzeptbericht nukleare Entsorgung (VSE et al., 1978)
- 1980-2000 Regionale Untersuchungen Nordschweiz (Kristallin/Sedimente)
- 1984 Betriebsaufnahme Felslabor Grimsel (Kristallin)
- 1985 Einreichung Projekt Gewähr (Kristallin)
- 1988 Entscheid Bundesrat Gewähr: Ausdehnung der Untersuchungen auf Tongesteine / Start Sedimentprogramm
- 1996 Betriebsaufnahme Felslabor Mont Terri (Opalinuston)
- 2002 Projekt Opalinuston (Einreichung Entsorgungsnachweis)

- 2006 Entsorgungsnachweis genehmigt durch Bundesrat
- 2008 Start Sachplan geologisches Tiefenlager
- 2029 Rahmenbewilligung Tiefenlager HAA
- Ab 2030 Bau Felslabor Tiefenlager HAA / Bauphase
- 2060 Betriebsaufnahme Tiefenlager

1.2 Vorstudien

Ausgehend von einem breiten Kenntnisstand zur Geologie der Schweiz wurde Ende der Siebzigerjahre eine Evaluation der in Frage kommenden Wirtsgesteine (Kristallin, Steinsalz, Anhydrit, Mergel, Tonsteine) vorgenommen (NAGRA 2008a). Aufgrund eingehender Studien der NAGRA wurden die radioaktiven Abfallarten hierfür in drei Kategorien eingeteilt (siehe Abb. 1). Das Wirtsgestein sollte danach folgenden Anforderungen genügen (VSE et al. 1978):

- geologische Stabilität
- geringe Wasserdurchlässigkeit
- günstige felsmechanische Eigenschaften
- hohe Sorptionsfähigkeit
- gute Wärmeleitfähigkeit (nur für hochaktive Abfälle)

Um die radioaktiven Stoffe aus dem Kreislauf der Lebewesen fernzuhalten, sollte Gebrauch vom Prinzip der Mehrfachbarrieren gemacht werden. Künstliche Barrieren (wie Behälter oder Bentonit) wurden nach VSE et al. (1978) vor allem während der Einlagerungsphase sowie nach einem Versagen der natürlichen Barrieren als wichtig erachtet. Sorgfältig ausgeführt könnten dabei künstliche Barrieren dem Herauslösen von radioaktiven Stoffen derart wirkungsvoll begegnen, dass auf natürliche Barrieren teilweise oder für gewisse Abfälle ganz verzichtet werden kann.

Nach VSE et al. (1978) kann die Isolation eines Endlagers von der Biosphäre im Prinzip durch drei verschiedene Arten von natürlichen Barrieren verwirklicht werden. Jede dieser drei Barrieren soll für sich allein oder in Kombination mit anderen natürlichen Barrieren das Endlager von der Biosphäre vollständig trennen (VSE et al. 1978):

- Barriere durch Wirtsgestein (ein Gesteinskörper, der aufgrund geologischer und technischer Kriterien ein Abfalllager aufnehmen und mit genügender Mächtigkeit allseitig umschließen kann)
- Barriere durch Umgebungsgestein (die das Wirtsgestein umschließenden, lithologisch verschiedenen Gesteinskörper)
- Barriere durch spezielle hydrogeologische Verhältnisse (Grundwasserspiegel liegt tiefer als Abfalllager, oder Porenvolumen des Wirtsgesteins ist mit stagnierendem fossilem Wasser gefüllt)

Eine Analyse der Barrierenwirkung der in der Schweiz nachgewiesenen oder im tieferen Untergrund vermuteten geologischen Formationen führte unter Berücksichtigung der zugrunde gelegten Randbedingungen (siehe Abb. 2: Allgemeine Anforderungen an die Endlager) zu einer Wertung der Lagermöglichkeiten. Sie wurden in VSE et al. (1978) zusammengestellt (siehe Abb. 3).

Abfall-kategorie	Arten und Herkunft des Abfalls	Charakteristische radioaktive Stoffe und Eigenschaften des Abfalls	Halbwertszeit* charakteristischer Nuklide (Jahre)	Ungefähres Abfallvolumen**	Notwendige Isolationszeit
I	Aktivierter Schrott aus Stilllegung/Wartung von Kernkraftwerken	Sperrgut	5	*** 100 m ³	einige Jahre bis mehrere Jahrzehnte
	Übrige Abbruchmaterialien	Metall und Beton (leicht aktiv)	5–30	50 000 m ³	
	Schwachaktive Abfälle aus Medizin, Industrie, Hochschulforschung	verschiedene Nuklide, einzementiert in 200-l-Fässern		400 m ³	
	Sehr schwach aktive Abfälle aus KKW-Betrieb	Harze u. a. in Bitumen oder Zement in 200-l-Fässern	5–30	4 000 m ³	
II	Schwach- und mittelaktive Abfälle aus KKW-Betrieb	Spaltprodukte (Strontium-90, Caesium-137) eingebunden in Bitumen oder Zement in 200-l-Fässern	30	26 000 m ³	einige hundert Jahre
	Schwach- und mittelaktive Abfälle aus Nuklearforschung	Strontium-90, Caesium-137, eingebunden in Bitumen oder Zement in 200-l-Fässern	30	2 000 m ³	
III	Hochaktive Abfälle aus Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente	vorherrschend: – bis 300 Jahre: Strontium-90 – nach 400 Jahren: Aktiniden,**** verglast in Metallbehältern	30 tausende	500 m ³	einige tausend Jahre

*Zeitspanne, in welcher die Aktivität jeweils auf die Hälfte abklingt.
 **Gesamter Abfall aus 5 grossen Kernkraftwerken (total 200 Betriebsjahre) Forschungsanlagen während 40 Betriebsjahren
 *** Ohne Verpackung
 **** Natürliche oder künstliche schwere Atome

Abb. 1: Kategorisierung und Charakterisierung der radioaktiven Abfälle im Hinblick auf die Endlagerung (Quelle: VSE et al. 1978)

	A	B	C
Abfallkategorie	I	II	III
Einlagerungstechnik	Kavernen	Kavernen	Bohrlöcher aus Oberfl. oder Kavernen
Nutzbarer Lagerraum	ca. 30 000 m ³ ³⁾	ca. 50 000 m ³ ³⁾	¹⁾
Minimale Höhe der Kavernen	ca. 10 m	6–10 m	¹⁾
Rückholbarkeit der Abfälle	nein	nein	nein
Isolation von Bio-Hygrosphäre	100 Jahre	500 Jahre	10 000 Jahre
Realisierung der Isolation	Wasserisolation möglich	Isolation durch natürliche Barrieren	Isolation durch natürliche Barrieren
Min. Tiefe	–	geg. durch Überdeckung	600 m
Max. Tiefe	300 m	600 m	2500 m
Minimale Überdeckung	gegen Erosion und EVAs ²⁾ (evtl. künstlich)	während Isolation (natürlich)	(natürlich)
Mächtigkeit des Wirtgesteins	–	¹⁾	¹⁾
Bekannt hydrologische Verhältnisse	ja	ja	ja
Standfestigkeit: (evtl. mit techn. Massnahmen)			
– während Einlagerung	ja	ja	ja
– nach Versiegelung	während 100 a	während 100 a	–
Max. seismische Intensität während Isolationszeit		¹⁾	¹⁾
Wärmeleitung und Temperaturbeständigkeit	–	–	ja ⁴⁾
Zufahrt	mit Tieflader	mit LKW	mit Tieflader (Schwertransport)

¹⁾ siehe Text

²⁾ EVAs = Einwirkung(en) von aussen: siehe Text

³⁾ mehrere Kavernen und etappenweiser Ausbau möglich

⁴⁾ das Wirtgestein muss die Nachzerfallswärme ohne Schaden für die künstlichen und natürlichen Barrieren ableiten können (vgl. auch 6.3.2.4)

Abb. 2: Allgemeine Anforderungen an die Endlagertypen (Quelle: VSE et al. 1978). Abfallkategorien siehe Abbildung 1.

Barrieren- typ	Beispiel	Spez. Vorteile	Spez. Nachteile	Mögliche* Zusatzbarr.	Wertung Lagertyp B	Wertung Lagertyp C	
WGD	Steinsalz im Jura östlich von Basel		Speisesalzabbau		0c	0c	
	Steinsalz Neuenburger jura	evtl. grosse Mächtigkeiten		GWS u/o UGP	0c	2a	
	Steinsalz im Untergrund des Mittellandes		evtl. geringe Mächtigkeit	GWS u/o UGP	0c	1a	
	Steinsalz in den Alpen (Bex)		Speisesalzabbau		0c	0c	
	Anhydrit im Tafeljura	Sub-horizontale Lagerung	Geringe Mächtigkeiten (20–40 m)		GWT	2b	0c
	Anhydrit im Faltenjura (in Antiklinalen)	Lokal grosse Mächtigkeiten	Tektonisch gestört			3a	2a
	Anhydrit in den Alpen		Im allgemeinen tektonisch gestört und komplizierte Geometrie		UGP u/o GWT	2b	1b
	Anhydrit im Mesozoikum des Mittellandes					0c	2a
	Ungeklüftetes Kristallin unter dem Jura					2a	3a
	Ungeklüftetes Kristallin unter dem Mittelland					2a	3a
	Ungeklüftetes Kristallin des Aarmassives			Ungeklüftete Bereiche vermutlich seltener als im Mittelland und Jura		1b	2a
	WGP	Opalinuston des Jura	bedeutende Mächtigkeit (bis 100 m)		GWT	3b	1b
		Tone und Mergel des Mittellandes (Molasse und Mesozoikum)		wahrscheinlich geringe Mächtigkeiten		1a	1a
Mergel und Ton-schiefer in den Alpen (Verrucanoschiefer, Aalänienschiefer, Valanginienmergel, Zoophycosdogger)		lokal grosse Mächtigkeit	offene Klüfte? permeable Zwischenlagen	GWT	2b	1b	
UGD	Anhydrit in Antiklinalen des Faltenjuras	Kalk- oder Sandsteinscholle als Wirtgestein			3a	1a	
	Mergel und Tone, das Wirtgestein tekt. bedingt vollst. umschliessend. Tafeljura, Alpen	Kalk- oder Sandstein als Wirtgestein		GWT	2b	1a	
GWT					3b	0c	
	geologische Formationen über dem Grundwasser, sofern Sickerwasser abgeleitet wird. Jura, Mittelland, Alpen				2b	0c	
GWS	Geologische Formationen mit stagnierendem fossilem Wasser, Mittelland				1a	3a	

Legende zur Wertung:

- 0 ungeeignet; 0c Verhältnisse genügend bekannt, um Lagermöglichkeit unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von Tabelle 6–2 vorderhand auszuschliessen
- 1 zweifelhaft
- 2 möglicherweise geeignet
- 3 wahrscheinlich geeignet
- a geologische Verhältnisse schlecht bekannt, Wertung zum Teil aufgrund von Hypothesen
- b geologische Verhältnisse regional bekannt, jedoch fehlen Detaildaten für die endgültige Standortwahl
- c geologische Verhältnisse genügend bekannt zur endgültigen Standortwahl

Abb. 3: Lagermöglichkeiten unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von Abb. 2 (Quelle: VSE et al. 1978). Definitionen siehe Abb. 2.

Diese Tabellen erlaubten die Auswahl einer Reihe von Möglichkeiten, welche Gegenstand des Untersuchungsprogramms der NAGRA bildeten. Für den damals bezeichneten Endlagertyp C (Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente) wurden Steinsalz, Anhydrit, ungeklüftetes Kristallin, Tone und Mergel sowie geologische Formationen mit stagnierendem fossilem Wasser zur Weiteruntersuchung ausgewählt (siehe Abb. 3). Eine endgültige Wahl der günstigsten Formationen und Lokalitäten wurde in dieser Vorstudie noch nicht getroffen. Hierfür wurden ausgedehnte und umfassende geologische Untersuchungen als nötig erachtet.

1.3 Das Projekt Gewähr

Im Jahr 1979 stimmte das Schweizervolk dem «Bundesbeschluss zum Atomgesetz» zu und machte die Erteilung einer Rahmenbewilligung für neue Kernkraftwerke von der Gewährleistung der «dauernden, sicheren Entsorgung und Endlagerung» der radioaktiven Abfälle abhängig. Die Betriebsbewilligungen der bereits bestehenden KKW wurden an den sogenannten Entsorgungsnachweis gebunden. Die KKW-Betreiber hatten dafür bis 1985 ein «Gewähr bietendes» Projekt auszuarbeiten (NAGRA 2008a).

Das Projekt „Gewähr“ ist eine Studie, mit der die sichere Endlagerung aller Sorten radioaktiver Abfälle als machbar nachgewiesen werden sollte (HSK 1986). Die Dokumentation des Projekts Gewähr, die am 23. Januar 1985 eingereicht wurde, liegt als achtbändiger Projektbericht NGB 85-01 bis 08 vor. Dabei ging man von zwei Tiefenlagern aus: einem horizontal zugänglichen Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) im Alpenraum und einem Tiefenlager für hochaktive Abfälle (HAA) in der Nordschweiz. Basierend darauf wurde zunächst das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz untersucht. Die Gründe der NAGRA für die Wahl des Kristallins als Wirtsgestein waren (HSK 2005):

- Bestehende Erkenntnisse aus ausländischen Projekten (insb. Schweden) liegen bereits vor.
- Die guten felsmechanischen Eigenschaften (z.B. Standfestigkeit) erleichtern Bau und Betrieb eines Lagers.
- Aufgrund der damaligen Kenntnisse wurde angenommen, dass großräumige ungestörte Gesteinsblöcke mit geringer Wasserbewegung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz vorliegen.
- Es bestehen keine Rohstoffkonflikte.

Die Wahl der Nordschweiz als Untersuchungsgebiet hängt eng mit der Wahl des Kristallins als Wirtsgestein zusammen. Dabei gelten folgende Mindestanforderungen: Zunächst muss der tektonische Aufbau der Region möglichst ungestört und langfristig sta-

bil sein; die Alpen und der Faltenjura sind aus diesem Grund auszuschließen. Ferner soll das Lager in einer Tiefe zwischen 500 m und 1000 m errichtet werden können; Kristallin liegt nur in der Nordschweiz in dieser Tiefe vor. Somit ergab sich das im Vergleich zur ganzen Schweiz eher kleine Untersuchungsgebiet im Mittelland der Nordschweiz.

Im Zuge der Kristallinuntersuchungen wurden auch potenziell geeignete Sedimentschichten im Deckgebirge charakterisiert, welche den kristallinen Sockel in der Nordschweiz überlagern. Die ausgedehnten Feldarbeiten umfassten sieben Tiefbohrungen und ein Netz regionaler 2D-Seismiklinien. Die Resultate zusammen mit ersten Erkenntnissen aus dem 1984 gebauten und seither betriebenen Felslabor Grimsel sowie Erfahrungen aus internationalen Entsorgungsprogrammen bildeten für die Lagerung von HAA die Grundlage des Projekts Gewähr 1985 (NAGRA 2008a).

Die Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen (HSK) war in ihrem Gutachten (HSK 1986) zum Projekt Gewähr der Ansicht, dass die Suche nach einem geeigneten Standort im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz schwierig, aufwendig und zeitraubend sei. So war beispielsweise 1978 der kristalline Sockel der Nordschweiz noch weitgehend terra incognita, und man sprach von ungeklüftetem, dichtem Kristallin. Aufgrund der Ergebnisse des Projektes Gewähr war man von solchen Idealvorstellungen abgekommen und setzte Klüftung und Wasserzirkulation in die Sicherheitsanalyse ein. Deshalb schien der HSK ein flexibles Vorgehen angezeigt, das sich nicht nur auf Kristallin festlegt, sondern auch Konzepte für die Endlagerung in Sedimentgesteinen prüft. Die HSK empfahl daraufhin der NAGRA, ihre Untersuchungen in dieser Richtung zu verstärken (HSK 1986).

1.4 Der Entsorgungsnachweis

Im Jahr 1988 kam der Bundesrat zu dem Schluss, dass für die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle sowohl der Machbarkeits- als auch der Sicherheitsnachweis erbracht worden waren. Der Nachweis eines genügend großen Gesteinsvorkommens mit geeigneten Eigenschaften (Standortnachweis) sei indes noch nicht überzeugend geführt worden. Der Bund machte zudem zur Auflage, neben der bis dahin prioritär untersuchten Wirtsgesteinsoption Kristallin auch Sedimentgesteine in die Abklärungen einzu beziehen (NAGRA 2008a).

Nach Abschluss der letzten Sondierbohrung im Kristallin (Siblingsen 1989) nahm die NAGRA 1994 eine Auswertung der Möglichkeiten der Lagerung im Kristallin vor. Erst im Jahre 2004 wurden die parallel zu den Sedimentstudien laufenden Untersuchungen zum Kristallin der Nordschweiz mit der Veröffentlichung der Stellungnahme der HSK (HSK 23/73 vom Juli 2004) abgeschlossen. Die HSK kam zum Schluss, dass die Sicher-

heit eines geologischen Tiefenlagers für hochaktive Abfälle im Kristallin gewährleistet ist, wenn ein genügend großer Gesteinskörper mit den in der Sicherheitsanalyse Kristallin-I beschriebenen Eigenschaften gefunden wird. Sie war aber der Ansicht, dass sich seit dem Projekt Gewähr 1985 die Aussichten kaum verbessert haben, einen solchen Gesteinskörper mit der erforderlichen Zuverlässigkeit zu finden und dessen Eigenschaften schlüssig nachzuweisen (HSK 2005).

Das Auswahlverfahren für Sedimente begann 1986, als sich der Bundesratsentscheid zum Projekt Gewähr bereits abzeichnete. Es endete 1994 nach mehreren Zwischenschritten mit der Wahl des Opalinustons im Zürcher Weinland und mit dem Einreichen des Gesuchs für die Sondierbohrung Benken (HSK 2005). Die entsprechenden Sedimentstudien sind in drei Berichten der NAGRA dokumentiert (NTB 88-25, NTB 91-19 und NTB 94-10). Neben Tongesteinen wurden auch andere Formationen in die Betrachtung einbezogen.

So ist beispielsweise die Ausdehnung der Gebiete mit Salzfazies im Muschelkalk und im Keuper in NTB 88-25 auf Beil. 4.7 dargestellt. Salz des Muschelkalkes kann danach in der Ajoie, im Basler und Aargauer Tafeljura, im Faltenjura und im nordwestlichen Teil des Mittellandes erwartet werden. Salz des Keupers ist in der westlichen Ajoie, im Faltenjura südwestlich einer Linie Biel-Porrentruy sowie im Mittelland westlich der Aare zu erwarten. Nur die Salzvorkommen im Tafeljura liegen in relativ geringen Tiefen. Die potentiellen Salzvorkommen der Ajoie dagegen befinden sich in Tiefen um 900 m, diejenigen des westlichen Mittellandes gar in Tiefen bis 1500 m.

Das Auswahlverfahren für Sedimente beinhaltete 4 Schritte (siehe Abb. 4). Sie sind in der HSK-Broschüre von 2005 als Übersicht zusammengefasst:

Erster Schritt: Auswahl geeigneter Wirtsgesteine: Ausgehend von den geologischen Verhältnissen der gesamten Schweiz präsentierte die NAGRA eine Vorauswahl von sieben potenziellen Wirtsgesteinen:

- Rotliegendes (Perm)
- Anhydritgruppe (Trias: Mittl. Muschelkalk)
- Gipskeuper (Trias)
- Opalinuston (Jura)
- Effinger Schichten (Jura)
- Untere Süsswassermolasse (Tertiär)
- Obere Süsswassermolasse (Tertiär).

Von der NAGRA hierfür herangezogene sicherheitsrelevante Eigenschaften zur Wahl des Wirtsgesteins waren:

Ausschlusskriterien:

- Tektonische/seismische Komplexität
- Ungenügende (< 300 m) oder zu große (> 1200 m) Überdeckung

und Beurteilungskriterien:

- Genügende Ausdehnung und Mächtigkeit (mindestens 100 m) des Wirtsgesteins
- Günstige geo- und hydrochemische Verhältnisse
- Geringe Durchlässigkeit des Wirtsgesteins
- Ausreichende Charakterisierung der Fließsysteme für Wasser innerhalb der Formation
- Potenzial zur Selbstabdichtung von Klüften und Störungen, z.B. durch Quelfähigkeit der Tone
- Geologische Langzeitstabilität der Wirtsgesteinsformation
- Verdünnungspotenzial in Grund- und/oder Oberflächengewässern
- Nachweisbarkeit der angenommenen Standorteigenschaften und ihrer zeitlichen Entwicklung

Nach Anwendung dieser Kriterien anhand der sicherheitsrelevanten Eigenschaften und der Kenntnisse über die Verbreitung dieser Wirtsgesteine in der Schweiz wurden zwei Optionen „Untere Süswassermolasse“ und „Opalinuston“ für weitere Untersuchungen ausgewählt.

Zweiter Schritt: Vervollständigung der Datenbasis: Nach dem ersten Schritt verlangte die HSK eine Vervollständigung der Daten zu den zwei gewählten Optionen für die weitergehende Auswahl. Die NAGRA führte zu diesem Zweck gezielte Felduntersuchungen im Opalinuston durch, insb. die 2D-Seismik-Kampagne 1991/92. Ferner wertete sie bestehende Daten über die Untere Süswassermolasse aus.

Dritter Schritt: Wahl des Wirtsgesteins: Die Resultate der Untersuchungen und Auswertungen zeigten, dass die Option Opalinuston gegenüber der Unteren Süswassermolasse eindeutige sicherheitsrelevante Vorteile hat. Die NAGRA beschloss deshalb, die Option Opalinuston in erster Priorität zu verfolgen. Die Option „Untere Süswassermolasse“ wurde als Reserveoption zurückgestellt.

Nachteile der Unteren Süsswassermolasse gegenüber Opalinuston:

- Heterogener Aufbau
- Insbesondere von Sandsteinrinnen durchzogen
- Erschwerte Extrapolation der Daten
- Erheblicher Explorationsaufwand

Vierter Schritt: Wahl der Untersuchungsregion: Die Abgrenzung der Untersuchungsregion mit Opalinuston erfolgte ebenfalls anhand sicherheitsgerichteter Kriterien. Die angewendeten Kriterien wurden in der Region Zürcher Weinland gegenüber den anderen in Frage kommenden Regionen mit Opalinuston eindeutig besser erfüllt. Deshalb wählte die NAGRA das Zürcher Weinland zur Durchführung von erdwissenschaftlichen Untersuchungen. Sie bezeichnete die Regionen Jurasüdfuss-Bözberg und Tafeljura nördlich der Lägern als Reservegebiete.

Kriterien der NAGRA für die Wahl von Regionen mit Opalinuston waren:

- Tiefenlage zwischen 400 m und 1000 m
- Mächtigkeit mindestens 100 m
- Ruhige, tektonisch ungestörte Lagerung
- Keine Anzeichen für neotektonische Aktivitäten

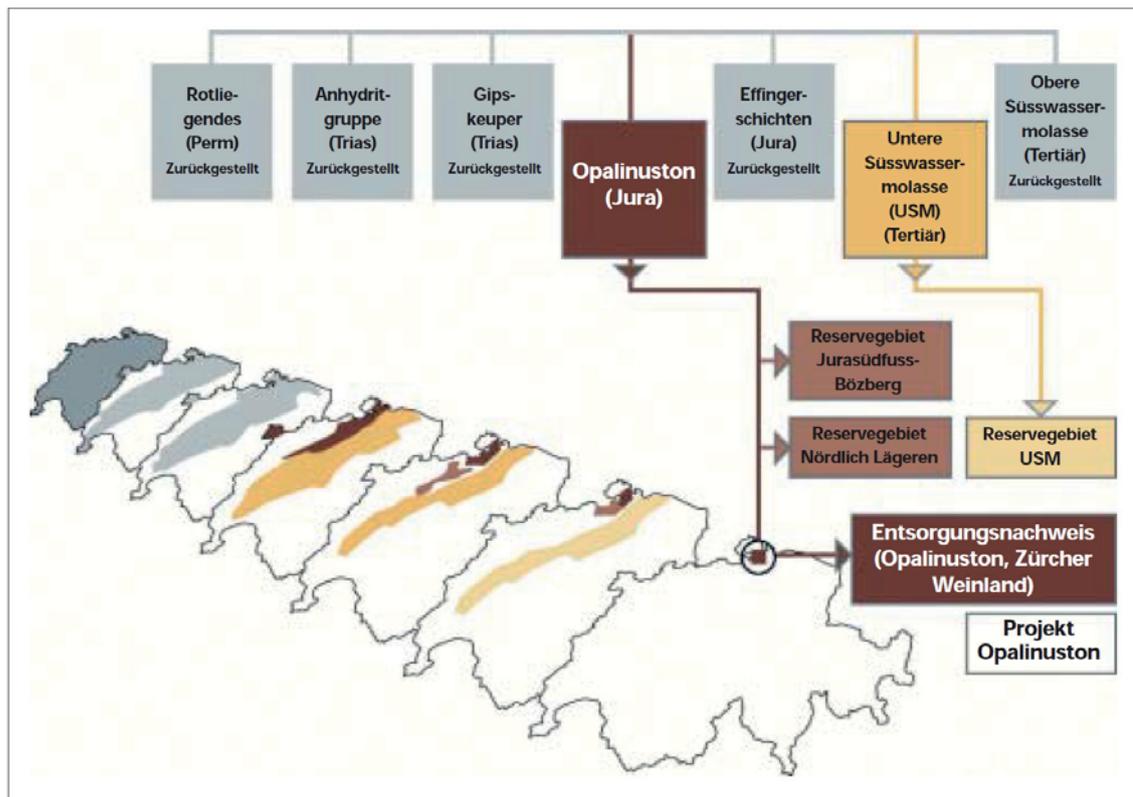


Abb. 4: Systematische Auswahl durch die NAGRA des Sedimentgesteins und der Untersuchungsregion (Quelle: HSK 2005).

1994 wurde nach Zustimmung der Bundesbehörden und ihrer Experten entschieden, in erster Priorität den Opalinuston als Wirtsgestein und das Zürcher Weinland als potenzielles Standortgebiet vertieft zu untersuchen. Es folgten umfangreiche Feldarbeiten und Studien im Zürcher Weinland (3D-Seismik, Bohrung Benken) ergänzt durch Untersuchungen im internationalen Felslabor Mont Terri.

Die Berichte zum Entsorgungsnachweis wurden 2002 dem Bund eingereicht. Als Wirtsgestein wurde der Opalinuston im Zürcher Weinland zugrunde gelegt (NAGRA 2002). Nach Prüfung durch die Aufsichtsbehörden und beigezogene ausländische Experten (wie z. B. AkEnd 2002) bestätigte der Bundesrat im Sommer 2006 die grundsätzliche Machbarkeit der sicheren Tiefenlagerung von hochaktiven Abfällen in der Schweiz.

1.5 Sachplan Geologisches Tiefenlager (SGT)

Der Bundesrat verabschiedete den Sachplan Geologisches Tiefenlager (SGT) für SMA und HAA im April 2008 (BFE 2008). Die Notwendigkeit der Überwachung und Möglichkeit der Rückholung für beschränkte Zeit sind Teil des Konzeptes. Auch ein „Kombilager“ (Lager für BE, HAA, LMA und schwach- und mittelradioaktive Abfälle) am gleichen

Standort, aber mit getrennten Lagerkammern, ist eine Option. Das Programm ist nach ZUIDEMA (2015) gekennzeichnet durch ein schrittweises Vorgehen und Meilensteine mit Entscheidungspunkten (stepwise approach). Erforderliche Unterlagen, Organisationen und Festlegungen (z. B. Gesetze, ENSI-Richtlinien, Sachplan-Verfahren) sind dazu vorhanden. Dies umfasst auch entsprechende Forschungseinrichtungen (wie Labors, Felslabors, Feldarbeiten). Der Einengungsprozess bei der Standortwahl ist dabei sicherheitsgerichtet und das zentrale Element für die sichere Entsorgung („der Standort macht es aus“). Die Standortauswahl erfolgt in drei Etappen und wird mit der Rahmenbewilligung abgeschlossen. Für alle drei Etappen sind umfangreiche Prüfungen vorgesehen, deren Ziel und Ergebnis in unterschiedlicher Form von Experten, Betroffenen und der Öffentlichkeit diskutiert werden können, bevor die den Schritt jeweils abschließenden Entscheidungen getroffen werden. Es ist ausdrücklich festgeschrieben, dass auch ein Rücksprung auf einen vorigen Schritt vorgesehen ist, soweit sich herausstellen sollte, dass die vorgesehene Lösung nicht realisierbar ist oder sich aufgrund neuer Erkenntnisse ein neuer Sachstand ergibt (ESchT 2007a). Derzeit beginnt Etappe 3 des Sachplans Geologisches Tiefenlager.

1.5.1 SGT-Etappe 1

In der ersten Etappe wurden sechs geologische Standortgebiete in fünf Schritten festgelegt (siehe Abb. 5). Sie sind das Resultat einer systematischen, auf Sicherheit ausgerichteten Einengung ausgehend von einer „weißen Karte Schweiz“ (ZUIDEMA 2015). Das Auswahlverfahren (Abb. 5) mit detaillierter Beschreibung der Kriterien (Abb. 6) und ihrer Anwendung (siehe Tabellen 1 bis 3 im Anhang) wird von der NAGRA in NTB 08-03 (NAGRA 2008b) ausführlich dargestellt.

In Schritt 1 der Etappe 1 wurden zunächst die auf das vorgesehene Abfallinventar abgestimmten Vorgaben erarbeitet. In Schritt 2 wurde das Sicherheitskonzept so ausgelegt, dass sich die technischen Barrieren und das Wirtsgestein als geologische Barriere gegenseitig ergänzen. Die Festlegung der Anforderungen an die Geologie erfolgte in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wurden die Indikatoren festgelegt, welche die im Sachplan geologische Tiefenlager aufgeführten Kriterien adäquat erfassen und welche im Verfahren zur Festlegung von geologischen Standortgebieten verwendet werden. In einem zweiten Schritt wurden die Anforderungen bzw. Bewertungsskalen für die Indikatoren festgelegt (siehe Tabelle 1 bis 3 im Anhang).

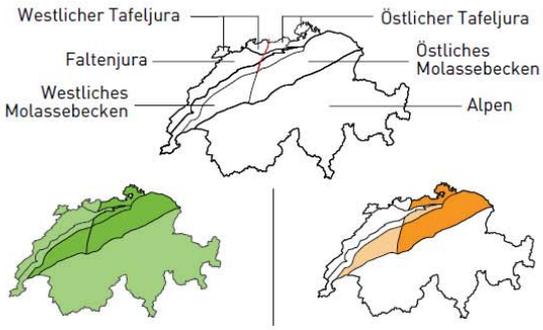
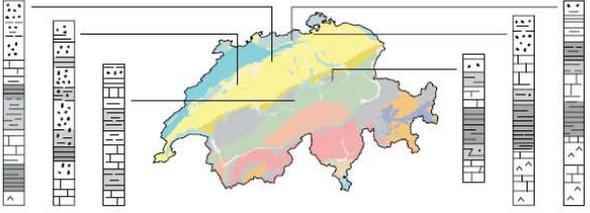
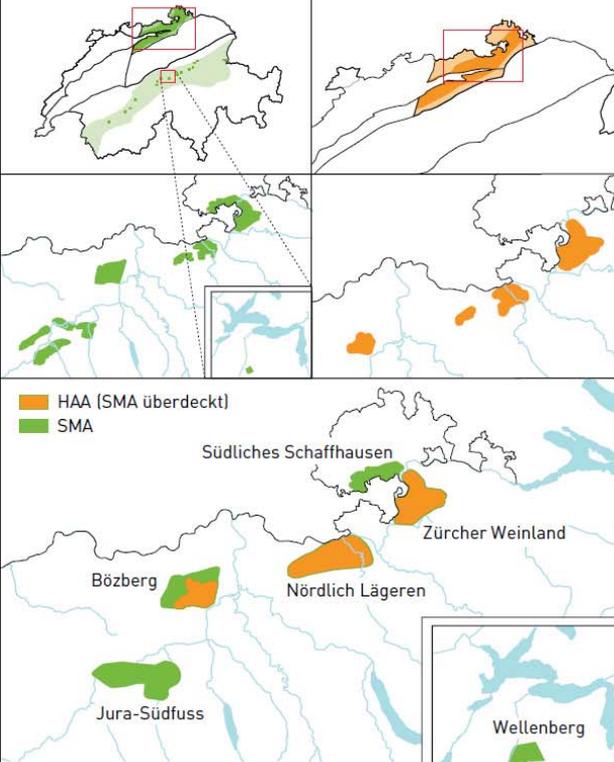
Schritte gemäss Sachplan	Lager SMA	Lager HAA
<p>Schritte 1 und 2: Abfallzuteilung, Barrieren-/Sicherheitskonzept, Anforderungen und Vorgaben</p>	<p>Festlegung der Abfallzuteilung, des Barrierenkonzepts sowie der Anforderungen beziehungsweise Bewertungsskalen bezüglich Betrachtungszeiträume, Platzbedarf, Tiefenlage, Wirtgesteinsseigenschaften, Hebung/Erosion etc.</p>	
<p>Schritt 3: Identifikation und Bewertung der weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume</p> <p>Evaluation der grossräumigen Verhältnisse bezüglich Hebung/Erosion, Geodynamik, geologischer Komplexität und räumlicher Verhältnisse. Die Evaluation ergibt «günstig bis sehr günstig» (dunkelgrün/dunkelorange), «ungünstig bis bedingt günstig» (hellgrün/hellorange) oder «ungenügend» (weiss) bewertete geologisch-tektonische Grossräume.</p>		
<p>Schritt 4: Auswahl bevorzugter Wirtgesteine</p> <p>Auswahl potenzieller Wirtgesteine anhand des Gesteinsinventars (dargestellt als 27 repräsentative stratigraphische Sammelprofile). Die Bewertung der potenziellen Wirtgesteine führt schrittweise zur Auswahl von bevorzugten Wirtgesteinen und deren Verbreitungsräumen.</p>		
<p>Schritt 5: Festlegung der geologischen Standortgebiete</p> <p>Zuerst werden innerhalb der weiter betrachteten Verbreitungsräume Karten erstellt für die bevorzugten Wirtgesteine in geeigneter Tiefenlage und mit genügender Mächtigkeit. Dann werden bevorzugte Bereiche abgegrenzt durch Berücksichtigung der Berandung durch regionale Störungszonen, übertiefte Felsrinnen, Zonen mit Anzeichen kleinräumiger Zergliederung (diffus gestörte Zonen) und konzeptionell zu meidenden Zonen mit ungünstigem tektonischem Regime (Neotektonik). Die Bewertung dieser bevorzugten Bereiche führt weiter zu prioritären Bereichen. Diese prioritären Bereiche wiederum ergeben, zusammen mit den überlappenden beziehungsweise in der Nähe liegenden bevorzugten Bereichen, schliesslich die geologischen Standortgebiete. Die Festlegung der Grenzen der geologischen Standortgebiete berücksichtigt die Ungewissheiten in den räumlichen Daten. Die Bewertung der Bereiche bildet die Basis für die Bewertung der geologischen Standortgebiete.</p>		

Abb. 5: Auswahl von geologischen Standortgebieten (Schritte gemäß SGT, Etappe 1) (Quelle: NAGRA 2008)

Eine ausführliche Diskussion der Schritte 1 und 2 zu Abfallzuteilung, Barrierensystem und Anforderungen an die Geologie ist im technischen Bericht NTB 08-05 (NAGRA 2008c) zu finden. Die sicherheitsbezogenen sowie die erdwissenschaftlichen Grundlagen für die Schritte 3 bis 5 des Auswahlverfahrens sind in den Referenzberichten NTB 08-05 (NAGRA 2008c) und NTB 08-04 (NAGRA 2008d) dokumentiert.

In den Schritten 3 bis 5 (Großräume, Wirtsgesteine und Konfiguration) wurden gemäß Sachplan 13 Kriterien angewendet (BFE 2008, NAGRA 2008a). Diese 13 geowissenschaftlichen „Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit“ zeigt Abbildung 6. Die Kriterien sind entsprechend ihrer Funktion und Bedeutung für die Langzeitsicherheit und Machbarkeit eines Tiefenlagers in vier Kriteriengruppen eingeteilt (siehe Abb. 6). Ihre Anwendung in den Verfahrensschritten wurde zunächst detailliert qualitativ beschrieben (siehe Tabellen 1 und 2 im Anhang: aus BFE 2008, Tabellen A1-1 bis A1-12 Seite 52-56 sowie A1-14 Seite 59-62). Diesen sicherheitstechnischen Kriterien wird im Standortauswahlverfahren oberste Priorität eingeräumt (ESchT 2006, 2008). Dabei gilt der Grundsatz:

- Die Sicherheit hat oberste Priorität; der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt muss gewährleistet sein.
- Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumplanung, Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft.

Kriteriengruppen / Kriterien

1. Eigenschaften des Wirtsgesteins beziehungsweise 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 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

Abb. 6: Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (Quelle: NAGRA 2008)

Tabelle 3 im Anhang zeigt die Kriterien und die zugeordneten Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren für die Einengungsprozedur in den Schritten 3 bis 5. Sie entspricht der Tabelle 2.5-2 (Seite 56-86) in NTB 08-03. Die Schritte 3 bis 5 zeichnen sich durch ein mehrstufiges Verfahren bei der Anwendung der Kriterien aus (siehe Tabelle 3 im Anhang):

- Anwendung von Mindestanforderungen: Varianten, die nicht alle Mindestanforderungen erfüllen, werden ausgeschlossen.
- Für die verbleibenden Varianten werden in den Schritten 4 und 5 sicherheitsgerichtete verschärfte Anforderungen eingeführt. Varianten, die diese verschärfte Anforderungen nicht erfüllen, werden zurückgestellt.
- Bewertung: Die Bewertung der dann noch verbleibenden bevorzugten Varianten erfolgt anhand einer vierstufigen Bewertungsskala (sehr günstig, günstig, bedingt günstig und ungünstig) und wird zur Prioritätensetzung genutzt (siehe Abb. 7).

Bei der Identifizierung geeigneter geologisch-tektonischer Großräume (Schritt 3) gilt das Hauptaugenmerk der Langzeitstabilität der geologischen Situation (Geodynamik und Neotektonik, Hebung bzw. Erosion) und den typischen räumlichen Verhältnissen und ihrer Explorierbarkeit (regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse). Am Ende von Schritt 3 werden die Großräume zusammenfassend bewertet und verglichen. Die als geeignet erachteten Großräume werden weiter betrachtet, die ungenügenden ausgeschlossen. Aus Gründen der Langzeitstabilität werden die Alpen und aus Gründen der räumlichen Verhältnisse und ihrer Explorierbarkeit werden der westliche Tafeljura, der Faltenjura und die westliche Subjurasische Zone ausgeschlossen. Für das Tiefenlager HAA werden die Großräume östlicher Tafeljura, Molassebecken und östliche Subjurasische Zone weiter betrachtet.

Für die Identifizierung potenziell geeigneter Wirtsgesteine und einschlusswirksamer Gebirgsbereiche (Schritt 4) sind die Gesteinseigenschaften (insbesondere die Beständigkeit der Gesteinseigenschaften (Potenzial für Verkarstung), die hydraulische Durchlässigkeit und für Sedimentgesteine – ihr Selbstabdichtungsvermögen) unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung sowie das Potenzial für eine geeignete Geometrie der Gesteinsvorkommen (Mächtigkeit, minimale und maximale Tiefenlage, laterale Ausdehnung) sowie machbare geotechnische Eigenschaften ausschlaggebend. Als Grundlage für die Identifizierung von geeigneten sedimentären Wirtsgesteinen wird die Schweiz in Areale aufgeteilt, deren geologischer Aufbau durch repräsentative Gesteinsabfolgen charakterisiert und in Sammelprofilen dargestellt werden kann. Damit verfügt man über das Inventar der in den Großräumen vorhandenen Gesteine. Die kristallinen Gesteine werden separat bewertet. Alle Sediment-Formationen, die in den Sammelprofilen nicht

eine Mächtigkeit von mindestens hundert Meter haben und die nicht gering wasserdurchlässig sind, werden ausgeschlossen (siehe Abb. 7). Für die Auswahl der bevorzugten Wirtsgesteine werden verschärfte Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit und die Charakterisierbarkeit der Wirtsgesteine, insbesondere die zuverlässige Lokalisierung und Charakterisierung höher durchlässiger Fließpfade, gestellt. Wirtsgesteine, die die Anforderungen und Vorgaben nicht erfüllen, werden nicht weiter berücksichtigt (siehe Abb. 7). Am Ende von Schritt 4 werden die Wirtsgesteine zusammenfassend bewertet und verglichen (NAGRA 2008a).

Prüfung von Wirtsgesteinen		Mindestanforderungen								Verschärfte Anforderungen			
Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigrafisch)	Verbreitung	Hydraulische Durchlässigkeit	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	Potential zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	Mächtigkeit	Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtsgesteins	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Laterale Ausdehnung	Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Variabilität Gesteinseigenschaften (Charakterisierbarkeit)
Kalkstein-Formationen verschiedenen Alters	Östlicher Tafeljura / östl. Subjurass. Zone	■	■	zT									
Sandstein-Formationen verschiedenen Alters	Östlicher Tafeljura / östl. Subjurass. Zone	■	■										
Evaporitabfolgen der Trias	Östlicher Tafeljura / östl. Subjurass. Zone				gk		gk		zT	zT			
Opalinuston	Östlicher Tafeljura / östl. Subjurass. Zone	Alle Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen erfüllt											
Tongesteinsabfolge Brauner Dogger	Tafeljura	Alle Mindestanforderungen erfüllt											
Effinger Schichten	Östlicher Tafeljura / östl. Subjurass. Zone	Alle Mindestanforderungen erfüllt											
USM (Marnes Bariolées s. str.)	Westliches Molassebecken	Alle Mindestanforderungen erfüllt											
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	Östliches Molassebecken	Alle Mindestanforderungen erfüllt											
Quartäre Seeablagerungen	Molassebecken						■		zT				
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz	Alle Mindestanforderungen erfüllt											

Legende	<input type="checkbox"/> Mindestanforderung erfüllt	<input type="checkbox"/> Verschärfte Anforderungen erfüllt
 Bevorzugtes Wirtsgestein	 Mindestanforderung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt	 Verschärfte Anforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt
 Potenzielles Wirtsgestein	 Gekoppelte Eigenschaften, zumindest eine der beiden Mindestanforderungen ist nicht erfüllt	 Nicht weiter betrachtet
	 Mindestanforderung im betrachteten Verbreitungsraum zum Teil nicht erfüllt	

Abb. 7: Prüfung von Wirtsgesteinen in Schritt 4 aufgrund von Mindest- und verschärften Anforderungen: Zusammenfassung der Evaluation für das Tiefenlager HAA (NAGRA 2008a).

Für ein HAA-Lager konnte der Opalinuston als einziges Wirtsgestein festgelegt werden. Für die Evaporitabfolgen der Trias beispielsweise wurde folgendes Fazit gezogen (NTB 08-04 auf Seite 104): Obwohl Anhydrit bzw. anhydritreiche Gesteinsabfolgen in früheren Phasen der Standortevaluation als mögliche Wirtsgesteine betrachtet wurden, werden sie aufgrund der Nichterfüllung der im Rahmen des SGT definierten Mindestanforderun-

gen sowohl für HAA als auch für SMA ausgeschlossen. Steinsalz wird ebenfalls ausgeschlossen, weil es die Mindestanforderung an die Mächtigkeit nicht erreicht und es sich um einen in der Schweiz nur beschränkt vorhandenen Rohstoff handelt.

Bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen (Schritt 5) stehen die räumlichen geologischen Verhältnisse im Vordergrund. Dazu gehören die Mächtigkeit in geeigneter Tiefenlage (minimale Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion und glaziale Tiefenerosion sowie bzgl. Gesteins-Dekompaktion; maximale Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Verhältnisse) und die laterale Ausdehnung (unter Berücksichtigung von regionalen geologischen Elementen) sowie die lokale geologisch-tektonische Situation. Dazu werden für die Wirtsgesteine Bereiche bestimmt, welche die Mindestanforderungen und danach die verschärften Anforderungen erfüllen. Aufgrund einer vergleichenden Bewertung der verbleibenden Bereiche werden die geologischen Standortgebiete vorgeschlagen, die nach den Vorgaben im Sachplan zusammenfassend zu bewerten sind. Das Ergebnis ist mit einer qualitativen Werteskala mit den Werten «sehr geeignet», «geeignet», «bedingt geeignet» und «weniger geeignet» darzustellen (NAGRA 2008a). Ein Beispiel der Bewertung der bevorzugten Bereiche im Opalinuston zeigt Abb. 8.

Kriterium / Kriteriengruppe		①	②	③	④
		Bevorzugte Bereiche mit Opalinuston			
Gesamtbewertung für bevorzugte Bereiche		P	P		P
1	Eigenschaften Wirtgestein	●	●	●	●
1.1	Räumliche Ausdehnung	●	●	●	●
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	●	●	●	●
1.3	Geochemische Bedingungen	●	●	●	●
1.4	Freisetzungspfade	●	●	●	●
2	Langzeitstabilität	●	●	●	●
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	●	●	●	●
2.2	Erosion	●	●	●	●
2.3	Lagerbedingte Einflüsse	●	●	●	●
2.4	Nutzungskonflikte	●	●	●	●
3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	●	●	●	●
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	●	●	●	●
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	●	●	●	●
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	●	●	●	●
4	Bautechnische Eignung	●	●	●	●
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	●	●	●	●
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	●	●	●	●



Abb. 8: Vergleichende Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5 für ein Tiefenlager HAA auf Stufe Kriterien und Kriteriengruppe gemäß SGT (NAGRA 2008a)

Etappe 1 wurde am 30. November 2011 abgeschlossen. Im Ergebnis lag eine Gesamtaussage auf einer qualitativen Werteskala mit sechs geeigneten Standortgebieten vor (ESchT 2007b).

1.5.2 SGT-Etappe 2

In Etappe 2 wurden in den sechs vorgeschlagenen und genehmigten Standortgebieten potenzielle Standorte identifiziert, wobei zusätzlich raumplanerische, ökologische und sozio-ökonomische Aspekte berücksichtigt wurden. Die NAGRA hatte bis Ende Mai 2014 – gestützt auf die Zusammenarbeit mit den Regionen und den Kantonen – in jeder Standortregion mindestens ein Standortareal für die Oberflächenanlage eines Tiefenlagers bestimmt (NAGRA 2015b).

Das Vorgehen in Etappe 2 (NAGRA 2015b) wurde entsprechend den Vorgaben des Sachplans und der ENSI festgelegt (Schritt 1). Das prioritäre Wirtsgestein für ein SMA-Lager wurde festgelegt (Schritt 2). Für ein HAA-Lager wurde bereits in Etappe 1 der Opalinuston als prioritäres Wirtsgestein festgelegt. Für jedes Standortgebiet wählte die NAGRA die optimale räumliche Konfiguration: Sie wählte den optimalen Lagerperimeter für das prioritäre Wirtsgestein innerhalb des Gebiets. Ziel war die sicherheitsorientierte Optimierung der Standortgebiete (Schritt 3). Die Eignung der optimierten Lagerperimeter – zusammen mit ihrem prioritären Wirtsgestein – wurde anhand der Dosisintervalle aus den Sicherheitsanalysen und der 13 qualitativen Kriterien (SGT) bewertet (Schritt 4). In der Gesamtbewertung (Schritt 5) beurteilte die NAGRA die Stärken beziehungsweise Schwächen der einzelnen Standortgebiete anhand der zugehörigen Lagerperimeter und nahm eine vergleichende Bewertung vor.

Wie gut sich ein Standortgebiet für ein geologisches Tiefenlager eignet, wurde zuerst anhand von Dosisberechnungen (siehe Abbildung 9) geprüft. Danach wurden die Standortgebiete aufgrund ihrer geologischen Eigenschaften bewertet (NAGRA 2015b).

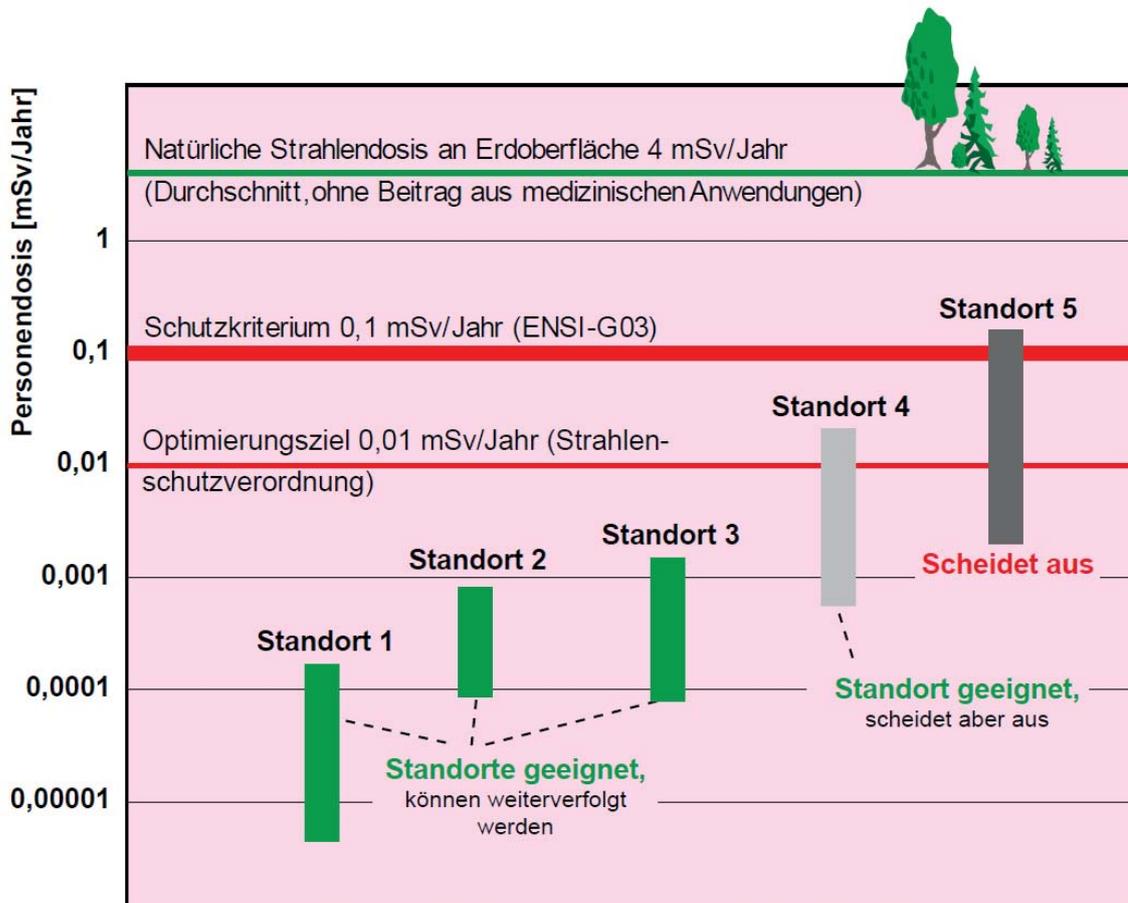


Abb. 9: In einer Zusammenstellung der Dosisintervalle (Säulen in Grafik) lassen sich Standorte (hier schematisch) sicherheitstechnisch vergleichen. Als Bewertungsmaßstab für die Sicherheit respektive für die Wirksamkeit der geologischen Barriere gilt das vom ENSI festgelegte Dosis-Schutzkriterium von 0,1 mSv/Jahr für eine Person. In der Abbildung mit hypothetischen Beispielen bedeutet dies: Standort 5 scheidet aus. Aus der Strahlenschutzverordnung abgeleitet, gilt das Optimierungsziel von 0,01 mSv/Jahr. Die Dosisintervalle der geologischen Standortgebiete müssen unterhalb dieses Optimierungsziels liegen oder – falls dies nicht der Fall ist – mit dem Dosisintervall des besten Standorts (Standort 1) überlappen. Standort 4 erfüllt dies nicht und scheidet deshalb aus (NAGRA 2015b).

Für den sicherheitstechnischen Vergleich der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 wurden spezifische entscheidungsrelevante Merkmale und Indikatoren – gemäß ENSI-Vorgaben – definiert (NAGRA 2014, NAGRA 2015a) (siehe Abb. 10):

- Wirksamkeit der geologischen Barriere: Die Barrierenwirkung bestimmt, wie gut die im geologischen Tiefenlager eingelagerten radioaktiven Stoffe zurückgehalten werden und dort zerfallen. Die geologische Barriere umfasst das Wirtsgestein und die darunter- und darüberliegenden Rahmengesteine.

- Langzeitstabilität der geologischen Barriere: Eine geeignete Langzeitstabilität sorgt dafür, dass die notwendige Barrierenwirkung über den Betrachtungszeitraum erhalten bleibt. Die Abnahme der Radiotoxizität der eingelagerten Abfälle als Folge des radioaktiven Zerfalls ist ausschlaggebend für die Länge des Betrachtungszeitraums, welcher für das HAA-Lager 1 Million Jahre beziehungsweise für das SMA-Lager 100 000 Jahre beträgt. Für die Langzeitstabilität sind die Erosion und mögliche differenzielle Bewegungen im Untergrund wichtig.
- Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet: Die Explorierbarkeit bestimmt, wie genau und zuverlässig Lage und Parameter der sicherheitsrelevanten geologischen Schichten bestimmt werden können (z.B. sedimentäre Ablagerungen wie harte Kalkbänke mit erhöhter Durchlässigkeit). Die Charakterisierbarkeit beschreibt, wie genau und zuverlässig die für die Barrierenwirkung kritischen Eigenschaften erfasst werden können (z.B. einzelne wasserführende Klüfte).
- Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers: Hierbei wird die Schädigung des Wirtsgesteins in direkter Umgebung der Lagerkammern beurteilt. Analysiert werden seine Barrierenwirkung und die mögliche Beeinträchtigung der technischen Barrieren als Folge des Baus der Lagerkammern. Hier wird auch der Zugang nach untertage vom Standortareal zum untertägigen Lagerperimeter geprüft. Weiter wird geprüft, ob das Platzangebot innerhalb des Standortgebiets genügend groß ist.

Eine detaillierte Liste der bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Kriterien und Indikatoren zeigt Tabelle 4 (entspricht Tab. 2.3-2 in NTB 14-01) im Anhang.

Bei der qualitativen Bewertung der Wirtsgesteine und Lagerperimeter wurden – ähnlich wie in Etappe 1 für die Bewertung der geologischen Standortgebiete – die 13 Kriterien zur Standortevaluation (vgl. Abb. 6) verwendet. Neben den Eigenschaften des Wirtsgesteins werden auch Aspekte der Langzeitstabilität, der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und der bautechnischen Eignung bewertet. Anhand aller Kriterien und Indikatoren (siehe Abb. 11 und Tabelle 4 im Anhang) wurde jeweils geprüft, ob die Wirtsgesteine und Lagerperimeter beziehungsweise die geologischen Standortgebiete insgesamt mindestens die qualitative Bewertung «geeignet» erhalten (NAGRA 2015b).

Nach der qualitativen Gesamtbewertung erfüllen von den sechs Standortgebieten drei die hohen Sicherheitsanforderungen und sind für ein geologisches Tiefenlager geeignet (siehe Abb. 12). Sie weisen im detaillierten Vergleich jedoch entscheidende Unterschiede auf.

Kriteriengruppen (4) Kriterien (13)	Indikatoren	Indikatoren und ihre Anwendung					
		Etappe 1	Wirtgestein		Etappe 2		
			Qualitative Bewertung	Auswahl prioritäres Wirtgestein	Abgrenzung optimierter Lager-perimeter	Lagerperimeter/ Standortgebiete	Qualitative Bewertung
1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschusswirksamen Gebirgsbereichs							
1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (unter Berücksichtigung von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	x			x	x	e
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	x			x	x	e
	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	x			x	x	e
	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	x			x	x	e
	Mächtigkeit	x	x	e		x	e
	Regionale tektonische Elemente a) Abstand zu regionalen Störungszonen (Etappe 1) b) Zu meidende tektonische Zonen (Etappe 2)	x			x		
	Laterale Ausdehnung	x	Findet Verwendung im Indikator «Platzangebot untertags».				
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Platzangebot untertags				x	x	e
	Hydraulische Durchlässigkeit	x	x	e		x	e
1.3 Geochemische Bedingungen	Grundwasserstockwerke	x				x	e
	Mineralogie	x	x			x	
	pH-Wert	x	x			x	
	Redox-Bedingungen	x	x			x	
	Salinität	x	x			x	
	Mikrobielle Prozesse	x	x			x	
	Kolloide	x	x	e		x	e
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	x	x	e		x	e
	Homogenität des Gesteinsaufbaus	x	x	e		x	e
	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	x	x	e		x	e
	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	x	x	e		x	e
	Tonmineralgehalt	x	Fliesst in die Bewertung diverser Indikatoren ein, z. B. «Selbstabdichtungsvermögen».				
	Selbstabdichtungsvermögen	x	x	e		x	e
2 Langzeitstabilität							
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	x				x	e
	Seismizität	x				x	e
	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen	x	Wird in Etappe 2 nicht verwendet.				
	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	x	Wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet gemäss Hinweis in ENSI 2010b.				
2.2 Erosion	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	x	x	e		x	e
	Erosion im Betrachtungszeitraum	x				x	e
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	x	x			x	
	Chemische Wechselwirkungen	x	x			x	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	x	x			x	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	x	[x]			[x]	
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	x	x			x	
	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	x				x	
	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins	x				x	
	Mineral- und Thermalwassernutzung	x				x	
	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds	x				x	
3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen							
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Diffus gestörte Zonen	x	Wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet, da abgedeckt durch regionale geologische Elemente.				
	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	x	x	e		x	e
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Erfahrungen	x	x			x	
	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse	x	Wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet. In Etappe 1 nur für geologisch-tektonische Grossräume verwendet.				
	Kontinuität der interessierenden Schichten	x	Wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet. Detailliertere Erfassung durch die Indikatoren «Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund» und «Explorationsbedingungen an Oberfläche».				
	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	x	x	e		x	e
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Explorationsbedingungen an Oberfläche	x				x	
	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)	x	Wird in Etappe 2 nicht mehr verwendet. Detailliertere Erfassung anhand Indikator «Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen».				
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	x	x			x	
	4 Bautechnische Eignung						
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften	x	x			x	
	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	x				x	e
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	x				x	

Abb. 10: Kriteriengruppen, Kriterien, Indikatoren und ihre Anwendung. Ein «x» oder («x») bedeutet, dass dieser Indikator berücksichtigt wird; «e» steht für entscheidungsrelevanter Indikator (NAGRA 2015b).

Kriteriengruppen	HAA	Zürich Nordost	HAA	Nördlich Lägern	HAA	Jura Ost	SMA	Südranden	SMA	Zürich Nordost	SMA	Nördlich Lägern	SMA	Jura Ost	SMA	Jura-Sidlaus	SMA	Wittenberg
Kriterien																		
Indikatoren																		
GESAMTBEWERTUNG																		
Eigenschaften des WG/EG																		
Räumliche Ausdehnung																		
Mächtigkeit																		
Platzangebot untertags																		
Hydraulische Barrierenwirkung																		
Hydraulische Durchlässigkeit																		
Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression																		
Grundwasserstockwerke																		
Geochemische Bedingungen																		
Mineralogie																		
pH																		
Redox-Bedingungen																		
Salinität																		
Mikrobielle Prozesse																		
Kolloide																		
Freisetzungspfade																		
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums																		
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade																		
Selbstabdichtungsvermögen																		
Homogenität des Gesteinsaufbaus																		
Länge der massgebenden Freisetzungspfade																		
Langzeitstabilität																		
Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften																		
Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)																		
Seismizität																		
Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)																		
Erosion																		
Erosion im Betrachtungszeitraum																		
Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen																		
Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion																		
Lagerbedingte Einflüsse																		
Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten																		
Chemische Wechselwirkungen																		
Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas																		
Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur																		
Nutzungskonflikte																		
Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins																		
Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins																		
Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins																		
Mineral- und Thermalwassernutzungen																		
Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrundes																		
Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen																		
Charakterisierbarkeit der Gesteine																		
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit																		
Erfahrungen																		
Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse																		
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund																		
Explorationsbedingungen an der Oberfläche																		
Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen																		
Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)																		
Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation																		
Bautechnische Eignung																		
Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen																		
Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften																		
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)																		
Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung																		
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen																		
Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)																		

Die qualitative Gesamtbewertung ist für alle Standortgebiete mindestens «geeignet».

WG = Wirtgestein
 EG = Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

sehr günstig
 günstig
 bedingt günstig
 ungünstig
 nicht relevant für SMA, keine Wärmeentwicklung

Abb. 11: Qualitative Bewertung der Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager beziehungsweise das SMA-Lager (gemäß NTB 14-01).

Entscheidrelevante Merkmale / Entscheidrelevante Indikatoren	Zürich Nordost	Nördlich Lägern	Jura Ost
Wirksamkeit der geologischen Barriere			
Hydraulische Durchlässigkeit	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Selbstabdichtungsvermögen	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Homogenität des Gesteinsaufbaus	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Mächtigkeit	sehr günstig	sehr günstig	günstig
Länge der massgebenden Freisetzungspfade	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Kolloide	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Langzeitstabilität der geologischen Barriere			
Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	sehr günstig	günstig	günstig
Selbstabdichtungsvermögen	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Erosion im Betrachtungszeitraum	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	sehr günstig	sehr günstig	günstig
Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	sehr günstig	sehr günstig	günstig
Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	günstig	sehr günstig	sehr günstig
Seismizität	günstig	günstig	günstig
Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet			
Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
Bautechnische Machbarkeit			
Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	günstig	bedingt günstig	sehr günstig
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	günstig	günstig	sehr günstig
Platzangebot untertags	günstig	ungünstig	günstig



Abb. 12: Ergebnis des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete für ein HAA-Lager (NAGRA 2015b).

Die Gesamtbewertung für die Wirksamkeit sowie die Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere ist der Mittelwert der Bewertungen der zugeordneten entscheidungsrelevanten Indikatoren. Man geht davon aus, dass diese Indikatoren sich gegenseitig kompensieren. Für die Langzeitstabilität der geologischen Barriere und die bautechnische Machbarkeit ergibt sich die Gesamtbewertung aus der tiefsten Bewertung eines zugeordneten entscheidungsrelevanten Indikatoren. Dies beruht darauf, dass diese Indikatoren alle gleich wichtig und unabhängig voneinander sind. Ein günstiges Platzangebot kann zum Beispiel nicht schlechte geotechnische Verhältnisse wettmachen.

Im Januar 2015 schlug die NAGRA vor, Zürich Nordost und Jura Ost als mögliche geologische Standortgebiete für ein Tiefenlager für hochaktive Abfälle (HAA) in Etappe 3 vertieft zu untersuchen. Im Vergleich zum Standortgebiet Nördlich Lägern weisen sie günstigere Bedingungen auf.

1.5.3 SGT-Etappe 3

In Etappe 3 werden die beiden vorgeschlagenen Standortgebiete mittels 3D-Seismik und Sondierbohrungen vertieft untersucht. Die Eignung der gewählten Standortgebiete ist für die Rahmenbewilligungsgesuche zu überprüfen, gemäß den Kriterien der Langzeitsicherheit sowie der technischen Machbarkeit und Betriebssicherheit.

Weitere Aufgaben sind die Abgrenzung der Lagerbereiche Untertage und die Anordnung und Auslegung der Anlage in ihren Grundzügen. Darunter fällt die Planung einer möglichen Streckenführung für die Zugangsbauwerke (Schacht, Rampe oder Kombination von beidem) nach Untertage. Für diese Aufgaben sind Daten für folgende Themen zu erheben:

- Anordnung der Untertagebauten, geeigneter Lagerbereiche und Strukturen innerhalb und in direkter Umgebung der Lagerbereiche
- Eigenschaften und Parameter des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Analyse der Barrierenwirkung und für die Anlagenplanung
- Langzeitentwicklung (z. B. Erosionsszenarien, tektonische Elemente)
- Mögliche Nutzungskonflikte (z. B. Kohlenwasserstoffe, Geothermie)
- Unterlagen für die Anlagenplanung (z.B. geomechanische Bedingungen für die Untertagebauten, geotechnische Informationen für den Bau der Zugänge nach Untertage, Baugrunduntersuchungen)

Die NAGRA wird gestützt auf diese erdwissenschaftlichen Untersuchungen gegen 2020 bekannt geben, für welche Standortgebiete sie Rahmenbewilligungsgesuche für ein HAA- und SMA-Lager oder ein Kombilager ausarbeiten wird. Danach reicht die NAGRA die Rahmenbewilligungsgesuche voraussichtlich 2022 ein. Für die weitere Konkretisierung ist wiederum die Zusammenarbeit mit den Standortkantonen, Regionen und Gemeinden vorgesehen (NAGRA 2015c).

1.6 Literaturverzeichnis

Vorstudie

Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE), Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und -projektanten (GKBP), Konferenz der Überlandwerke (UeW) und Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (1978): «Konzept für die nukleare Entsorgung in der Schweiz».

Projektberichte Gewähr 1985 der NAGRA (alle Januar 1985)

NGB 85-01 Nukleare Entsorgung Schweiz: Konzept und Übersicht über das Projekt Gewähr 1985

NGB 85-02 Radioaktive Abfälle: Eigenschaften und Zuteilung auf die Endlager-Typen

NGB 85-03 Endlager für hochaktive Abfälle: Bautechnik und Betriebsphase

NGB 85-04 Endlager für hochaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren

NGB 85-05 Endlager für hochaktive Abfälle: Sicherheitsbericht

NGB 85-06 Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Bautechnik und Betriebsphase

NGB 85-07 Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Das System der Sicherheitsbarrieren

NGB 85-08 Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Sicherheitsbericht

Sedimentstudien

NAGRA (1988): Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Beilagenband.-- NAGRA, NTB 88-25: Baden, Schweiz.

NAGRA (1990): Sedimentstudie - Zwischenbericht 1990. Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen.-- NAGRA, NTB 91-19: Baden, Schweiz.

NAGRA (1994): Sedimentstudie - Zwischenbericht 1993. Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen.-- NAGRA, NTB 94-10: Baden, Schweiz.

Gutachten zum Projekt Gewähr

HSK (1986): Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA).-- Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen HSK 23/28, 123 Seiten, BFE.

HSK (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. Richtlinie HSK-R-21/d für schweizerische Kernanlagen, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Villigen, Schweiz.

HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA.--SK 23/73, 109 S., Würenlingen, Schweiz.

HSK (2005): Entsorgungsnachweis: Etappe auf einem langen Weg.-- Broschüre, Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, HSK-AN-5262, Villigen, Schweiz.

Sachplan

NAGRA (2002): Projekt Opalinuston. „Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle“.-- NAGRA, NTB02-03: 560 S., 204 Fig., 80 Tab., 7 App.; Wettingen, Schweiz.

BFE (2008): Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil.-- Bundesamt für Energie (BFE): 92 S.; Bern, Schweiz.

NAGRA (2008a): Entsorgungsprogramm und Standortgebiete für geologische Tiefenlager –Zusammenfassung.- Broschüre, November 2008, NAGRA, Wettingen.

NAGRA (2008b): «Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse»; NAGRA Technischer Bericht NTB 08-03. NAGRA, Wettingen.

- NAGRA (2008c): «Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie»; NAGRA Technischer Bericht NTB 08-05. NAGRA, Wettingen.
- NAGRA (2008d): «Vorschlag geologischer Standortgebiete für ein SMA- und ein HAA-Lager: Geologische Grundlagen»; NAGRA Technischer Bericht NTB 08-04, Wettingen.
- NAGRA (2014): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Textband.-- NAGRA Technischer Bericht NTB 14-01, Wettingen.
- NAGRA (2015a): Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Vorschläge der NAGRA für Etappe 3.-- Broschüre, 8 Seiten, Wettingen.
- NAGRA (2015b): Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Sicherheitstechnischer Vergleich: Vorschläge für Etappe 3.-- Broschüre, 63 Seiten, Wettingen.
- NAGRA (2015c): Standortgebiete für geologische Tiefenlager. Erdwissenschaftliche Untersuchungen für Etappe 3.-- Broschüre, 8 Seiten, Wettingen.
- ZUIDEMA, P. (2015): Das Forschungsprogramm zu Tongesteinen in der Schweiz: Aktueller Stand, zukünftiger Forschungsbedarf und Mechanismen der Forschungskontrolle (Schwerpunkt HAA-Lager).-- Vortrag auf ESK-Workshop zur deutschen Endlagerforschung am 20./21. Januar 2015 in Bonn.
- ESchT:
- ESchT (2006): Kurzstellungnahme der Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“ vom 24.8.2006, 7 Seiten.
- ESchT (2007a): Stellungnahme zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“ Basierend auf dem Entwurf des Schweizer Bundesamt für Energie (BFE) vom 11.01.2007.: Anhang I: Verfahrensstruktur – Entspricht das Verfahren internationalen Empfehlungen zu Standortauswahlverfahren?

ESchT (2007b): Stellungnahme zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“
Basierend auf dem Entwurf des Schweizer Bundesamt für Energie (BFE)
vom 11.01.2007. Anhang II: Zur Bedeutung quantitativer und qualitativer
Auswahlkriterien.

ESchT (2008): Pressemitteilung zum Konzeptteil „Sachplan Geologische Tiefenlager“.
Basierend auf der vom Schweizer Bundesrat verabschiedeten Fassung vom
02.04.2008, 5 Seiten.

AkEnd:

AkEnd (2002): Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland.-
72 Seiten, April 2002.

1.7 Anhang: Tabellen

Tab. 1: Beschreibung und Anwendung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (aus BFE 2008, Tabellen A1-1 bis A1-13, Seite 52-56)

<i>Kriteriengruppe</i>	1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches
<i>Kriterium</i>	1.1 Räumliche Ausdehnung
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird das räumliche Eignungspotential (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.

<i>Kriteriengruppe</i>	1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches
<i>Kriterium</i>	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	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. 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.
<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 (Barrierenwirkung).

<i>Kriteriengruppe</i>	1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches
<i>Kriterium</i>	1.3 Geochemische Bedingungen
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches
<i>Kriterium</i>	1.4 Freisetzungspfade
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt werden die präferenziellen Radionuklid-Freisetzungspfade im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Zur Ausbreitung der Nuklide 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. Bei der Ausbreitung entlang von Rissen und Klüften im Gestein ist das Selbstabdichtungsvermögen 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.

<i>Kriteriengruppe</i>	2 Langzeitstabilität
<i>Kriterium</i>	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
<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 Gesteinsverbandes 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 die 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.

<i>Kriteriengruppe</i>	2 Langzeitstabilität
<i>Kriterium</i>	2.2 Erosion
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	2 Langzeitstabilität
<i>Kriterium</i>	2.3 Lagerbedingte Einflüsse
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	2 Langzeitstabilität
<i>Kriterium</i>	2.4 Nutzungskonflikte
<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 Mass 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.

<i>Kriteriengruppe</i>	3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
<i>Kriterium</i>	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
<i>Kriterium</i>	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse
<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 Quartärablagerungen, schwierige Topographie, ausgedehnte dichte Siedlungsräume, dichte Bewaldung).

<i>Kriteriengruppe</i>	3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen
<i>Kriterium</i>	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	4 Bautechnische Eignung
<i>Kriterium</i>	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen
<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.

<i>Kriteriengruppe</i>	4 Bautechnische Eignung
<i>Kriterium</i>	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung
<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.

Tab. 2: 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) (aus BFE 2008, Tabelle A1-14, Seite 59-62).

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

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
3. Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume	Einfluss Erosion	2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
	Langzeitstabilität: Differenzielle Bewegungen, neotektonische Aktivität und Seismizität; Prognostizierbarkeit möglicher geologischer 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
4.			
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, Tongehalt, 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/Gastransport, chemische Wechselwirkungen, Wärmeeintrag/-leitfähigkeit, Selbstabdichtungsvermögen neuer Klüfte

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage und erwartete Gebirgsspannungen, Gesteinsfestigkeiten, Verformungsverhalten
	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
5. Identifikation geeigneter Konfigurationen	Tiefenlage, Mächtigkeit und laterale 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/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, Hebungsrate, Erosionsrate, übertiefte Täler mit rinnenförmigen Quartärfüllungen (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

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
	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)
	Langzeitstabilität: differentielle 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

Tab. 3: Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren für die Einengungsprozedur der Schritte 3 bis 5 in Etappe 1 (Legende: MA – Mindestanforderung, VA – verschärfte Anforderung (wird teilweise auch in der Definition der Bewertungsskalen verwendet), BS – Bewertungsskala, (x) – Anwendung nur für HAA-Lager. Die Reihenfolge der Indikatoren folgt der Tabelle A1-14 im SGT (BFE 2008). In den verschiedenen Schritten werden z. T. zusätzliche Kriterien und Indikatoren berücksichtigt. Präzisierungen zu den Indikatoren stehen in eckigen Klammern).

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für das SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum [Betrachtung der Hebungsrates und bei ausgeprägter grossräumiger Topographie, Betrachtung des Potenzials für lokale Erosion]	x			≤ 2 mm/a <i>Sehr günstig</i> : ≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte) <i>Günstig</i> : 0.4 – 1 mm/a <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): 1 – 2 mm/a Zusätzlich für Alpen und Faltenjura, bei der Bewertung Berücksichtigung des Potenzials für lokale Erosion.	≤ 0.4 mm/a <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): ≤ 0.4 mm/a (inkl. negative Werte) <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> : – Potenzial für lokale Erosion durch Ausschluss von Grossräumen (Alpen, Faltenjura) durch andere Indikatoren berücksichtigt.
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik	x			Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik.	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik.
					<i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden	<i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität zu erwarten <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren kann eine gewisse grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität nicht ausgeschlossen werden

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Seismizität			x	Dieser Indikator wird nur zur Beschreibung der Grossräume verwendet; eine konfigurations-spezifische Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.1.	
	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen			x	Dieser Indikator wird nur bei der Beschreibung der Grossräume, nicht aber bei der Bewertung verwendet.	
	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)	x			Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet.	Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren wird keine vulkanische Aktivität erwartet.
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik	x			Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig</i> : MA erfüllt (aufgrund der strengen MA entfallen die Bewertungsstufen <i>günstig</i> , <i>bedingt günstig</i> und <i>ungünstig</i>)	
					Für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich	Für den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität möglich <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität nur bedingt möglich
1.1 Räumliche Ausdehnung	Laterale Ausdehnung [Potenzial ¹⁾]	x			Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 2 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km).	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (≥ 4 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km).

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume (SCHRITT 3)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Laterale Ausdehnung [Potenzial ¹⁾]			×	Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich (<i>sehr günstig</i>), einige Bereiche wahrscheinlich (<i>günstig</i>), wenige Bereiche wahrscheinlich (<i>ungünstig bis bedingt günstig, graduelle Abstufung</i>).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse [Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse für Anordnung der Lagerkammern]	×			Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können.	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
				×	Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Mehrere, teilweise auch grössere Bereiche wahrscheinlich (<i>sehr günstig</i>), einige Bereiche wahrscheinlich (<i>günstig</i>), wenige Bereiche wahrscheinlich (<i>ungünstig bis bedingt günstig, graduelle Abstufung</i>).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.
	Kontinuität der interessierenden Schichten			×	Potenzial vorhanden für Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können: Hoher Grad an Kontinuität (<i>sehr günstig</i>), mittlerer Grad an Kontinuität (<i>günstig</i>), geringer Grad an Kontinuität (<i>ungünstig bis bedingt günstig, graduelle Abstufung</i>).	Wie SMA, aber grössere unzergliederte Bereiche notwendig.

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Mächtigkeit [Potenzial ²⁾]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: ≥ 100 m (Sedimentgesteine) bzw. ≥ 50 m (Sedimentgesteine mit Akkumulationspotenzial) ≥ 200 m (Kristallingesteine)	
	Laterale Ausdehnung [Potenzial ²⁾]	×			≥ 2 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km	≥ 4 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Potenzial ²⁾ für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)	≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine) ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine)
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion [Potenzial ²⁾ für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			≥ 200 m u.T.	≥ 400 m u.T.
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]	×			$K_v \leq 10^{-9}$ m/s (AZ: Alternative Abfallzuteilung); $K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ: Referenz-Abfallzuteilung) Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	$K_v \leq 10^{-10}$ m/s Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]		×		$K_h \leq 10^{-9}$ m/s (AZ) $K_h \leq 10^{-10}$ m/s (RZ)	$K_h \leq 10^{-10}$ m/s
	Tongehalt	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') vorliegen: mittlerer Tongehalt ≥ 25 % (bei Sedimentgesteinen ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	<i>Sehr günstig:</i> $K_v \leq 10^{-12}$ m/s <i>Günstig:</i> $10^{-12} < K_v \leq 10^{-11}$ m/s <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): $10^{-11} < K_v \leq 10^{-10}$ m/s Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation [Verweilzeiten der Tiefenwässer, Isotopensignaturen, etc.]			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 3.3.	
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> > 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe <i>Günstig:</i> 4 – 40 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe <i>Bedingt günstig:</i> < 4 % Tonminerale, Glimmer, Zeolithe <i>Ungünstig:</i> keine der obigen Minerale	
	pH			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> pH 7 – 9 <i>Günstig:</i> pH 6 – 7 <i>Bedingt günstig:</i> – <i>Ungünstig:</i> pH > 9 oder < 6	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.3 Geochemische Bedingungen	Redox-Bedingungen			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> reduzierende Bedingungen gepuffert durch Minerale (z.B. Pyrit, Siderit) <i>Günstig:</i> – <i>Bedingt günstig:</i> reduzierende Bedingungen, aber keine puffernden Minerale <i>Ungünstig:</i> Nitrat > 1 g/L	
	Salinität			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> Ionenstärke 0.005 – 0.01 Mol/L <i>Günstig:</i> Ionenstärke 0.01 – 0.7 Mol/L <i>Bedingt günstig:</i> – <i>Ungünstig:</i> Ionenstärke < 0.005 oder > 0.7 Mol/L	
	Mikrobielle Prozesse			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): ungünstige Bedingungen für hohe mikrobiologische Aktivität, d.h. Poren wesentlich kleiner als 1 μ m, keine offenen Klüfte und ein knappes Nährstoffangebot <i>Bedingt günstig:</i> grössere Poren (μ m bis mm) oder Klüfte und hohes Nährstoffangebot inkl. Elektronenakzeptor (z.B. Sulfat) <i>Ungünstig:</i> –	
	Kolloide			×	Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> Kolloide sind immobil (Filtration) und Ionenstärke > 0.005 Mol/L (geringe Kolloidstabilität) <i>Günstig:</i> graduelle Abstufung zwischen <i>sehr günstig</i> und <i>bedingt günstig</i> <i>Bedingt günstig:</i> schlechte Kolloidfiltration und kleine Huminstoffkonzentrationen im Porenwasser (10^{-6} – 10^{-4} g/L) <i>Ungünstig:</i> schlechte Kolloidfiltration und Ionenstärke < 0.005 Mol/L (hohe Kolloidstabilität), Huminstoffe im Porenwasser > 10^{-4} g/L	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> (äquivalent) poröses Medium <i>Günstig:</i> Wasserführung in Diskontinuitäten mit beschränktem Channeling und günstigen Bedingungen für Matrixdiffusion <i>Bedingt günstig:</i> Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und mässigen Bedingungen für Matrixdiffusion <i>Ungünstig:</i> Wasserführung in Diskontinuitäten mit ausgeprägtem Channeling und ungünstigen Bedingungen für Matrixdiffusion	
	Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade	×			$T \leq 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt $\geq 25\%$ (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	$T \leq 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt $\geq 25\%$ (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.
				×	<i>Sehr günstig:</i> $T \leq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>Günstig:</i> $10^{-10} < T \leq 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> $10^{-9} < T \leq 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.	<i>Sehr günstig:</i> $T \leq 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>Günstig:</i> $10^{-11} < T \leq 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> $10^{-10} < T \leq 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ Bei der Bewertung, Berücksichtigung der Ungewissheiten und der tektonischen Überprägung.
Tongehalt	×				Identische Anforderungen für SMA und HAA: Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen (Indikator 'Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade'): mittlerer Tongehalt $\geq 25\%$ (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
1.4 Freisetzungspfade	Selbstabdichtungsvermögen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Selbstabdichtungsvermögen unter Berücksichtigung der unter In-Situ-Bedingungen des untertägigen Lagerbereichs zu erwartenden Prozesse (Schliessen von Klüften / Diskontinuitäten durch elastische / plastische Deformationen und Quellen bzw. Desintegration der Gesteinsmatrix): <i>Sehr günstig:</i> ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen <i>Günstig:</i> signifikantes Selbstabdichtungsvermögen <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> kein oder nur geringes Selbstabdichtungsvermögen	
	Homogenität des Gesteinsaufbaus		(x)		–	Homogener Aufbau des WG; WG enthält keine mehrere Meter mächtige und über hunderte von Metern ausgedehnte Elemente mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereigenschaften.
					×	<i>Günstig bis sehr günstig (graduelle Abstufung):</i> VA für HAA erfüllt <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> VA für HAA nicht erfüllt
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung.	
				×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> Verkarstung ist nicht möglich <i>Günstig:</i> Verkarstung ist unter speziellen Bedingungen nicht vollständig auszuschliessen <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> gewisses Verkarstungspotenzial vorhanden	
	Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Transporteigenschaften im Nahbereich infolge Auflockerungszone für Langzeitsicherheit unter Berücksichtigung der Ausdehnung und des Selbstabdichtungsvermögens der Auflockerungszone sowie der Erfolgsaussichten für baulichen Massnahmen zum Ausräumen / Unterbruch der Auflockerungszone in Schlüsselzonen. <i>Sehr günstig</i> : sehr kleine Auflockerungszone oder hohes Selbstabdichtungspotenzial, keine durchgehende hydraulische Verbindung entlang der Lagerstollen oder der Versiegelungsstrecken, kein hydraulischer Kurzschluss zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen <i>Günstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): Auflockerungszone wenig bis teilweise relevant oder weitgehend ohne Einfluss bzw. nicht dominant für den Radionuklidtransport (abhängig von den oben angegebenen Eigenschaften wie Selbstabdichtungsvermögen, mögliche bauliche Massnahmen etc.) <i>Ungünstig</i> : Auflockerungszone relevant oder massgebend für den Radionuklidtransport	
	Chemische Wechselwirkungen			×	Identische Anforderungen für SMA und HAA: <i>Sehr günstig</i> : Ausdehnung der pH-Fahne auf direkte Umgebung der Lagerkammern begrenzt, keine signifikante Mineralumwandlung durch O ₂ -Oxidation <i>Günstig</i> : Ausdehnung der pH-Fahne auf nähere Umgebung der Lagerkammern begrenzt, aber erhöhte Ungewissheit bezüglich Ausdehnung; keine signifikante Mineralumwandlung durch O ₂ -Oxidation <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): weitläufige Ausdehnung der pH-Fahne entlang von Fließpfaden; signifikante Mineralumwandlung durch O ₂ -Oxidation	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig</i> : Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; bauliche Massnahmen zur Speicherung oder Ableitung der im Lager produzierten Gase sind nicht notwendig <i>Günstig</i> : Gas kann ohne Beeinträchtigung der Barriereigenschaften durch das Wirtgestein entweichen; zusätzlich sind aber voraussichtlich bauliche Massnahmen zur untertägigen Speicherung eines Teils der im Lager produzierten Gase notwendig <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): es ist ungewiss, ob Gas ohne Beeinträchtigung der Barriereigenschaften durch das Wirtgestein entweichen kann, es sind deshalb bauliche Massnahmen zur Ableitung der im Lager produzierten Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig (graduelle Abstufung nach Gasspeicher- und Gastransportkapazität des Wirtgesteins)	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(×)	– (nicht relevant)	<i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): Temperatur stellt kein Problem dar oder kann durch geringfügige bauliche oder betriebliche Massnahmen (z.B. durch Einlagerungsdichte) kontrolliert werden <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): Temperatur kann durch bauliche oder betriebliche Massnahmen mit erheblichem Aufwand kontrolliert werden
	Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins [unter Berücksichtigung der Tiefenlage]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte im Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung).	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins [unter Berücksichtigung der Tiefenlage]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> kein identifiziertes Nutzungspotenzial (keine Rohstoffe vorhanden, oder Rohstoffe sind zwar vorhanden, aber anderweitig viel einfacher und in praktisch unbeschränkter Menge erhältlich bzw. abbaubar) <i>Günstig:</i> mögliche Rohstoffvorkommen mit ungeklärtem aber wahrscheinlich geringem oder fraglichem Nutzungspotenzial <i>Bedingt günstig:</i> nachgewiesene Rohstoffvorkommen mit möglichem Nutzungspotenzial, ohne derzeitige Nutzung, Rohstoffexploration im Gange oder geplant <i>Ungünstig:</i> hohes Rohstoffpotenzial mit aktiver Förderung	
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Kein kohäsionsloses, praktisch unkonsolidiertes Gestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung (sehr engständig und kleine Festigkeiten in den Trennflächen).	
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Potenzial ²⁾ für Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]	×			Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Graduelle Abstufung gemäss nachfolgenden Festigkeiten (einaxiale Druckfestigkeit) mit Abzügen bei starker Anisotropie (infolge Schichtung und Schieferung), Heterogenität und Wasserzutritt (in Anlehnung an SIA-Klassifikation): <i>Sehr günstig:</i> hohe Festigkeiten (> 100 MPa) <i>Günstig:</i> mittlere bis hohe Festigkeiten (20 – 100 MPa) <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> kleine bis mittlere Festigkeiten (5 – 20 MPa)	
					Einengung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.1.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit [inkl. Architekturelemente]		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine bevorzugten Fliesspfade, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteigenschaften haben (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente) und die nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind.	
	Erfahrungen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> keine Diskontinuitäten und sedimentären Architekturelemente von Relevanz für den Radionuklidtransport <i>Günstig:</i> alle anderen Fälle (die VA erfüllen) <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –	
					×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> es gibt Erfahrungen aus langjährigen, fortgeschrittenen Lagerprojekten in gleichen bzw. in sehr ähnlichen Gesteinformationen und in ähnlicher geologischer Konfiguration (gute Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland <i>Günstig:</i> es gibt Erfahrungen in ähnlichen Gesteinformationen, die geologische Konfiguration ist aber verschieden (teilweise eingeschränkte Übertragbarkeit) im In- und/oder Ausland <i>Bedingt günstig:</i> es gibt zwar relevante Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung, die Unterschiede betreffend Wirtgestein und geologische Konfiguration sind aber signifikant (mässige Übertragbarkeit) <i>Ungünstig:</i> es gibt keine relevanten Erfahrungen für die geologische Tiefenlagerung in derartigen Gesteinformationen
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> gut kartierbarer seismischer Markerhorizont an einer Wirtgesteins-Grenzfläche oder in der Nähe (bis ca. 100 m) und ein schwächerer aber weitgehend erkennbarer, räumlich begrenzter Reflektor an bzw. in der Nähe der anderen Grenzfläche; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente > 10 km <i>Günstig/bedingt günstig:</i> graduelle Abstufung <i>Ungünstig:</i> kein geeigneter seismischer Reflektor an den Wirtgesteins-Grenzflächen oder in der Nähe einer der Grenzflächen; laterale Korrelationslängen relevanter geologischer Elemente < 0.5 km	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche (SCHRITT 4)						
3.3 Prognosierbarkeit der Langzeitveränderungen	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation [Verweilzeiten der Tiefenwässer, Isotopensignaturen, etc.]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> mehrere klare unabhängige Evidenzen für Langzeitisolationsvermögen <i>Günstig:</i> mindestens eine klare unabhängige Evidenz für Langzeitisolationsvermögen <i>Bedingt günstig:</i> es gibt gewisse Hinweise, die als unabhängige Evidenz für das Langzeitisolationsvermögen gedeutet werden können <i>Ungünstig:</i> es sind keine unabhängigen Evidenzen bekannt	
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage]	×			Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ³⁾) ≤ 800 m u.T. (Sedimentgesteine), ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine).	Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ³⁾) ≤ 900 m u.T. (Sedimentgesteine), ≤ 1200 m u.T. (Kristallingesteine).
			×		Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 700 m u.T. für östliche Subjurassische Zone ⁴⁾ . Effinger Schichten und Mergel: keine Verschärfung notwendig (VA = MA).	Für Opalinuston keine Verschärfung für Tafeljura s.str. und Vorfaltenzone notwendig (VA = MA); Lagerebene (Mitte notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich) ≤ 800 m u.T. für östliche Subjurassische Zone.
			×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 4.1.		
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.2.	
	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T.	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompression		×		Opalinuston: Top notwendiger ⁵⁾ einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 300 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig. Effinger Schichten und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m u.T. Mergel-Formationen des Helvetikums: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T.	Opalinuston: Top notwendiger ⁵⁾ einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m u.T., wo obere Rahmengesteine nicht notwendig; ≥ 500 m u.T., wo obere Rahmengesteine notwendig.
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.2.	
	Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	×			Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen ⁶⁾ .	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 400 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen ⁶⁾ .
			×		Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen, ≥ 200 m unter Felsoberfläche ausserhalb übertiefter Felsrinnen ⁶⁾ .	Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 500 m unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen; ≥ 400 m unter Felsoberfläche ausserhalb übertiefter Felsrinnen ⁶⁾ .
				×	Bewertung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 2.2.	
	Mächtigkeit	×			Nutzbare ⁷⁾ Mächtigkeit ≥ 100 m. Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis des Wirtgesteins: Opalinuston: je ≥ 20 m; Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': kein Mindestabstand; Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: je ≥ 50 m.	Nutzbare ⁷⁾ Mächtigkeit ≥ 100 m. Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston: je ≥ 20 m.

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
I.1 Räumliche Ausdehnung	Mächtigkeit		×		Nutzbare ⁸⁾ Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmengesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden. Nutzbare Mächtigkeit ≥ 150 m für Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit Rahmengesteinen (davon ≥ 75 m innerhalb 'Brauner Dogger'). Nutzbare Mächtigkeit ≥ 200 m für Efflinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums (bei beiden sind keine Rahmengesteine vorhanden).	Nutzbare ⁸⁾ Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Rahmengesteinen, mit Abzug von 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden. Abstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston je ≥ 40 m.
				×	<i>Sehr günstig:</i> Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': nutzbare Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen und unteren Rahmengesteinen ≥ 200 m und Mächtigkeit 'Brauner Dogger' mit oberen Rahmengesteinen ≥ 100 m Efflinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: nutzbare Mächtigkeit ≥ 250 m <i>Günstig:</i> alle anderen Fälle (die VA erfüllen) <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –	<i>Sehr günstig:</i> Opalinuston: nutzbare Mächtigkeit Opalinuston ≥ 100 m und obere und untere Rahmengesteine je ≥ 25 m, wobei als untere Rahmengesteine nur die Zone bis Top Arietenkalk betrachtet wird <i>Günstig:</i> alle anderen Fälle (die VA erfüllen) <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
I.1 Räumliche Ausdehnung	Abstand zu regionalen Störungszonen	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Abstand geht von einem Richtwert von 200 m aus und wird vergrössert, wo dies durch vorhandene geologische Daten (z.B. kartierte Sekundärbrüche, verdickte oder gestörte Bereiche in seismischen Profilen, erhöhte Neigung auf Isohypsenkarten) angezeigt ist.	
	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Randzone Hegau-Bodensee-Graben wird gemieden.	
	Diffus gestörte Zonen [mit Anzeichen für kleinräumige tektonische Zergliederung]		×		Identische Anforderungen für SMA und HAA: Diffus gestörte Zonen werden gemieden.	
	Laterale Ausdehnung [vereinfachte Prüfung unter Berücksichtigung aller bereichsbegrenzenden Elemente; mehrmalige Anwendung in Schritt 5]	×			≥ 3 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)	≥ 6 km ² bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km (Form der Bereiche wird so festgelegt, dass die Bedingung der nutzbaren Breite innerhalb des Bereichs überall erfüllt ist)
	Platzangebot untertags [inkl. Fremdgesteins-einschlüssen und Flexibilität / Reserven]		×		Anforderungen für SMA und HAA: Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar (Volumina der in Lagerbehälter verpackten Abfälle: SMA: 200'000 m ³ , BE/HAA: 20'000 m ³ , LMA: 7'500 m ³) unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten (maximale und minimale Tiefenlage; Lage der bereichsbegrenzenden geologischen Elemente; mögliche kleinräumige Elemente; Architekturelemente und Fremdgesteins-einschlüsse; Mächtigkeit, Schichtneigung und Welligkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) und bei günstiger Lageranordnung.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.1 Räumliche Ausdehnung	Platzangebot untertags [inkl. Fremdgesteins-einschlüssen und Flexibilität / Reserven]			×	Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 4 -faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für ≥ 2 -faches umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung <i>Günstig:</i> potenzielles Platzangebot ausreichend für ≥ 2 -faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –	
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
			×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
				×	<i>Sehr günstig:</i> Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich $\geq VA + 100$ m <i>Günstig:</i> VA bis VA + 100 m <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –	<i>Sehr günstig:</i> Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich $\geq VA + 200$ m <i>Günstig:</i> VA bis VA + 200 m <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –
	Hydraulische Durchlässigkeit [unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten; bestimmt vorherrschenden Transportprozess]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung.	
	Grundwasserstockwerke			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau; Aquifere ober- und unterhalb des WG / EG bilden voneinander unabhängige Fließsysteme; Grundwasserstockwerkbau im Bereich / Region nachgewiesen (<i>sehr günstig</i>), aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse erwartet (<i>günstig</i>) <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): es gibt Anzeichen (hydraulisch oder hydrochemisch), dass die Aquifere ober- und unterhalb des WG/EG hydraulisch miteinander verbunden sind	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager	
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)							
1.3 Geochemische Bedingungen	Mineralogie			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.		
	pH			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.		
	Redox-Bedingungen		×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine ungesättigten (oxidierenden) Bedingungen, basierend auf Wirtgesteinseigenschaften bzw. hydrogeologischer Situation.	
					×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.	
	Salinität			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.		
	Mikrobielle Prozesse			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.		
Kolloide			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.3.			
1.4 Freisetzungspfade	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.		

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.4 Freisetzungspfade	Länge der Freisetzungspfade			×	<p>Beurteilung primär des vertikalen Transportpfads durch das Wirtgestein (WG) und die Rahmengesteine (RG; zusammen einschlusswirksamer Gebirgsbereich, EG), unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der SMA-Lagerkammern (inkl. Auflockerungszone) von 20 m. Bei allenfalls existierenden, horizontalen Fließspfaden, welche die vertikale Transportdistanz reduzieren, wird deren Beitrag bewertet: Bei horizontalen Migrationsdistanzen im km-Bereich erfolgt kein Abzug, bei signifikant kleineren Migrationsdistanzen: Abzug.</p> <p><i>Sehr günstig:</i> Opalinuston: ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 75 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 100 m im nutzbaren WG</p> <p><i>Günstig:</i> Opalinuston: ≥ 40 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': ≥ 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: ≥ 75 m im nutzbaren WG</p> <p><i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> Opalinuston: < 40 m im nutzbaren EG (WG + RG) Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': < 50 m im nutzbaren EG (WG + RG) Effinger Schichten und Mergel: < 75 m im nutzbaren WG</p>	Wie bei Opalinuston für SMA, aber unter vereinfachter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung der HAA-Lagerstellen (inkl. Auflockerungszone) von 5 m.

BGR (2015) - 100-10-2015-0006/002

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
1.4 Freisetzungspfade	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
	Selbstabdichtungsvermögen [bzgl. Klüfte und Störungszone]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4 (unter Berücksichtigung der relevanten In-situ-Bedingungen).	
	Homogenität des Gesteinsaufbaus			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 1.4.	
2.2 Erosion	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	×		×	Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1. Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren für SMA: <i>Sehr günstig:</i> Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich noch nicht von Dekompaktion betroffen <i>Günstig:</i> Wirtgestein mehrheitlich noch nicht von Dekompaktion betroffen <i>Ungünstig bis bedingt günstig (graduelle Abstufung):</i> Lager knapp unter der Terrainoberfläche	Beurteilung der Überdeckung nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren für HAA: Bewertungsstufen wie bei SMA.
	Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	×	×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
	[übertiefte Felsrinnen, Topographie]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > VA + 100 m oder Lage des Bereichs ausserhalb der Haupttäler <i>Günstig:</i> Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich: VA bis VA + 100 m <i>Ungünstig bis bedingt günstig:</i> –	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum [Betrachtung der Hebrungsrate; in Bereichen mit starkem topographischen Relief, zusätzlich Berücksichtigung der lokalen Erosion]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 3 / Kriterium 2.2. Bei der Bewertung von Bereichen mit starkem topographischen Relief, zusätzlich Berücksichtigung der lokalen Erosion.	
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Chemische Wechselwirkungen			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.	
	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur			(×)	– (nicht relevant)	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.3.
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.4.	
	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte mit Potenzial zur Beeinträchtigung des Barriersystems durch Nutzung von Rohstoffen unterhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessensabwägung).	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.4 Nutzungskonflikte	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Gemäss Fig. 5.1-3: Kohlenwasserstoff-Ressourcen ⁹⁾ (KW-Ressourcen). <i>Sehr günstig:</i> Gebiete, in denen keine KW-Ressourcen erwartet werden, und ohne Steinsalzvorkommen oder Top des Salzvorkommens liegt tiefer als 600 m u.T. <i>Günstig:</i> Gebiete mit möglichen KW-Ressourcen (auch in Zukunft kaum wirtschaftliche Bedeutung) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 500 und 600 m u.T. liegt <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): Gebiete mit KW-Ressourcen (in Zukunft wirtschaftliche Bedeutung möglich, heute Explorationstätigkeit) und/oder Gebiete, in denen das Top des Salzvorkommens zwischen 400 und 500 m u.T. bzw. darüber liegt (graduelle Abstufung)	
	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins [wird in Zusammenhang mit dem Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins' beurteilt]			×	Identische Anforderungen für SMA und HAA: Modifikation der Bewertung des Indikators 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins': Bei bzgl. Rohstoffnutzung signifikanten Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins werden Bewertungen im Bereich <i>günstig bis sehr günstig</i> auf <i>günstig</i> reduziert; bei tieferen Bewertungen erfolgt kein zusätzlicher Abzug. Für Bereiche ohne Öl- oder Gasanzeichen in Gesteinen oberhalb des Wirtgesteins erfolgt ebenfalls kein Abzug.	
	Mineralquellen und Thermen	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Lagerzone: bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 5 km. Untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulisch wirksamer Verbindung zwischen Erschliessung (Zugangstunnel, Schacht) und Mineralquelle oder Therme: Entfernung ≥ 1 km.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.4 Nutzungskonflikte	Mineralquellen und Thermen			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> Lagerzone: keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme; untertägige Erschliessung: keine hydraulisch wirksame Verbindung zwischen Erschliessung und Mineralquelle oder Therme oder Entfernung ≥ 10 km <i>Günstig:</i> Lagerzone: keine Differenzierung bzgl. <i>sehr günstig</i> ; untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 5 km <i>Bedingt günstig:</i> Lagerzone: mögliche hydraulische Verbindung zwischen Tiefenlager und Mineralquelle oder Therme (aber MA erfüllt); untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung ≥ 2 km <i>Ungünstig:</i> Lagerzone: keine Differenzierung bzgl. <i>bedingt günstig</i> ; untertägige Erschliessung: bei möglicher hydraulischer Verbindung: Entfernung zwischen 1 und 2 km	
	Geothermie			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig:</i> nicht identifiziertes Ressourcenpotential (normierte geothermische Produktivität $P_n < 0.004$ MW/m) <i>Günstig:</i> mögliches Ressourcenpotential ($0.004 < P_n < 0.008$ MW/m) <i>Bedingt günstig:</i> erhöhtes Ressourcenpotential ($0.008 < P_n < 0.012$ MW/m) <i>Ungünstig:</i> hohes Ressourcenpotential ($P_n > 0.012$ MW/m)	
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	
			×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit [Verbreitung in geeigneter Tiefenlage im Hinblick auf die zu erwartenden Gebirgsspannungen]			×	<i>Sehr günstig:</i> Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) $< VA - 500$ m Efflinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) $< VA - 350$ m <i>Günstig:</i> Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen $VA - 500$ m und $VA - 200$ m Efflinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums: Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen $VA - 350$ m und VA <i>Bedingt günstig:</i> Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger': Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen $VA - 200$ m und VA <i>Ungünstig:</i> –	<i>Sehr günstig:</i> Lagerebene (Mitte Wirtgestein) $< VA - 600$ m <i>Günstig:</i> Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen $VA - 600$ m und $VA - 300$ m <i>Bedingt günstig:</i> Lagerebene (Mitte Wirtgestein) zwischen $VA - 300$ m und VA <i>Ungünstig:</i> –
	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Bewertungsskala wie in Schritt 4 / Kriterium 4.1 mit weiteren Abzügen unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung und des erwarteten Trennflächengefüges (Klüftung, Scherhorizonte); Schichtung und Schieferung in Bewertung aus Schritt 4 / Kriterium 4.1 bereits berücksichtigt: <i>Kein Abzug:</i> bei weitgehend fehlenden Trennflächen oder für weitständige Trennflächenabstände mit mittleren Festigkeiten in Trennflächen oder Trennflächen geringer linearer Erstreckung (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.") <i>Abzug um halben Skalenschritt:</i> für mittlere Trennflächenabstände mit mittleren oder kleinen Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "Vorfallenzone") <i>Abzug um ganzen Skalenschritt:</i> für engständige Trennflächenabstände und kleine Festigkeiten in Trennflächen (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone")	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen [inkl. Grundwasserleiter, Karst und natürliche Gasführung; im Hinblick auf Zugänglichkeit der Untertagebauten]			×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig</i> : nur lokale, wenig ausgedehnte grundwasserführende Quartärschichten, Festgesteine über dem Wirtgestein sind standfest und erfordern einen kleinen bautechnischen Aufwand (hohe Gesteinsfestigkeit, keine oder nur weitständiges Trennflächengefüge); keine Karstbildung, kein erhöhtes Wassereintrichrisiko erwartet, Erdgas Gefahrenstufe 0 oder 1 (nach SUVA 2002) <i>Günstig/bedingt günstig</i> : graduelle Abstufung <i>Ungünstig</i> : ausgedehnte, grundwasserführende Quartärschichten; grosse Abschnittslängen durch problematische Gesteinsformationen, welche einen grossen bautechnischen Aufwand erfordern (schwimmendes, quellendes und drückendes Gebirge); grosses Karst- und Wassereintrichrisiko, Erdgas Gefahrenstufe 4 (nach SUVA 2002)	
	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine nachgewiesenen Erdgaslagerstätten im Wirtgestein (entsprechend Gefahrenstufe 4 nach SUVA 2002: Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit).	
					×	Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: <i>Sehr günstig</i> : keine Erdgasanzeichen bekannt (Gefahrenstufe 0 nach SUVA 2002) <i>Günstig</i> : kleinere Erdgas-Indikationen (Gefahrenstufe 1 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit) <i>Bedingt günstig</i> : mässige Erdgasführung (Gefahrenstufe 2 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, ohne Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit) <i>Ungünstig</i> : signifikante Erdgasführung (Gefahrenstufe 3 nach SUVA 2002, Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während kurzer Zeit)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik [inkl. Hinweise auf differenzielle Bewegungen]			×	<i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden	<i>Günstig bis sehr günstig</i> : innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") <i>Günstig</i> : innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfallenzone") <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren kann eine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nicht ausgeschlossen werden (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)
	Seismizität			×	Beurteilung anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)): <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): keine erhöhte Seismizität <i>Bedingt günstig bis günstig</i> : leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens) <i>Ungünstig</i> : deutlich erhöhte Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel)	Beurteilung anhand der Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen (Herdregionen)): <i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): keine erhöhte Seismizität <i>Bedingt günstig</i> : leicht erhöhte Seismizität (Teile des Alpennordrands und Graubündens) <i>Ungünstig</i> : deutlich erhöhte Seismizität (Teile des Wallis, Region Basel)

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager	
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)							
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 3 / Kriterium 2.1.		
	Abstand zu regionalen Störungszonen [zur Vermeidung potenziell aktiver oder reaktivierbarer Störungen]	×			Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.		
	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)		×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.		
	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)		×		×	Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine Bereiche mit erheblichem Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten im WG/EG durch Verkarstung, unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie).	
						Identische Bewertungsskala für SMA und HAA: Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 2.1, zusätzlich unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topographie).	
Selbstabdichtungsvermögen			×	Bewertung erfolgt in Schritt 4 / Kriterium 1.4.			

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik [inkl. Hinweise auf differenzielle Bewegungen]			×	<i>Günstig bis sehr günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich	<i>Günstig bis sehr günstig</i> : innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (geringe Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Tafeljura s.str.") <i>Günstig</i> : innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich (mässige Beanspruchung durch Fernschub; entspricht geologischem Regime: "Vorfallenzone") <i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): innerhalb des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahren sind zuverlässige Aussagen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich nur bedingt möglich bzw. nicht möglich (erhebliche bis starke Beanspruchung durch Fernschub)
	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.3.	
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Diffus gestörte Zonen [geologisch-tektonische Situation, kleinräumige Störungen, Häufigkeit von Klüften und Störungen]		×		Einengung erfolgt in Schritt 5 / Kriterium 1.1.	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit [inkl. Architekturelemente]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.1.	
	Erfahrungen			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.1.	
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Kontinuität der interessierenden Schichten			×	<p>Beurteilt wird die Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können:</p> <p><i>Sehr günstig:</i> hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.")</p> <p><i>Günstig bis sehr günstig:</i> graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltzone")</p> <p><i>Günstig:</i> mittlerer Grad an Kontinuität, wird in Gebieten mit erheblicher Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "östliche Subjurassische Zone")</p> <p><i>Ungünstig bis bedingt günstig</i> (graduelle Abstufung): geringer Grad an Kontinuität</p> <p>Bewertung dieses Indikators entfällt für Bereiche ohne Schichtung (z.B. tektonische Akkumulationen).</p>	<p>Beurteilt wird die Kontinuität der Schichten innerhalb von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können:</p> <p><i>Sehr günstig:</i> hoher Grad an Kontinuität, wird in Gebieten ohne signifikante Deformation durch tektonische Überprägung erreicht (entspricht tektonischem Regime: "Tafeljura s.str.")</p> <p><i>Günstig bis sehr günstig:</i> graduelle Abstufung (entspricht tektonischem Regime: "Vorfaltzone")</p> <p><i>Ungünstig / bedingt günstig / günstig:</i> diese Bewertungsstufen kommen für HAA-Bereiche nicht zur Anwendung (kein entsprechendes tektonisches Regime)</p>

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund [inkl. geologisch-tektonische Situation und Komplexität]			×	Bewertungsstufen wie in Schritt 4 / Kriterium 3.2, zusätzlich unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung.	
	Explorationsbedingungen an Oberfläche [Möglichkeiten für 3D-Seismik und Bohrungen]	×			Identische Anforderungen für SMA und HAA: Keine Bereiche, in denen die Exploration unmöglich sein könnte.	
				×	<p>Identische Bewertungsskalen für SMA und HAA:</p> <p>Die Gesamtnote ergibt sich durch eine gewichtete Mittelung der Bewertung der Einsatzmöglichkeiten und Erfolgsaussichten für Seismik und Bohrungen, wobei die Seismik höher gewichtet wird. Die Seismikbewertung ergibt sich aus der Evaluation der Parameter Topographie, Tiefenlage, Oberflächennutzung und Ankoppelungsbedingungen.</p> <p><i>Sehr günstig:</i> Topographie: kein Teil des Bereichs weist Höhengradienten von > 20° auf Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: > 400 m (relativ grosser Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien möglich) Oberflächennutzung: Überwiegend Felder und Wiesen Ankoppelungsbedingungen: keine quartären Ablagerungen bzw. nur lokale (< 10 % der Fläche), geringmächtige quartäre Ablagerungen; bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe</p> <p><i>Günstig:</i> Topographie: kleine Teile des Bereichs mit Höhengradient > 20° bzw. nur an den Rändern des Bereichs Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 200 – 400 m (mittlerer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: Felder und Wiesen mit kleineren Ortschaften und vereinzelt Waldgebieten Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) in einem Teil des Bereichs (10 – 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe</p>	

SGT-Kriterium	Indikator	MA	VA	BS	Anforderungen für SMA-Lager	Anforderungen für HAA-Lager
Evaluation der Konfigurationen (SCHRITT 5)						
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	Explorationsbedingungen an Oberfläche [Möglichkeiten für 3D-Seismik und Bohrungen]				<i>Bedingt günstig:</i> Topographie: Teile des Bereichs (< 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage des verwendbaren seismischen Markerhorizonts: 100 – 200 m (geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien) Oberflächennutzung: überwiegend Waldgebiete und Gebiete mit grösseren Ortschaften (> 30 %) Ankoppelungsbedingungen: quartäre Ablagerungen (> 25 m) im Grossteil des Bereichs (> 30 %); bei Karstverdacht: Abzug einer Bewertungsstufe <i>Ungünstig:</i> Topographie: Grossteil des Bereichs (> 30 %) mit Höhengradient > 20° Tiefenlage: 0 – 100 m (sehr geringer Abstand zwischen Schuss- und Geophonlinien notwendig) Oberflächennutzung: Flüsse, Seen, Moorlandschaften, reine Industriegebiete bzw. mehr als 50 % Ortschaften Ankoppelungsbedingungen: mächtige (> 50 m) quartäre Ablagerungen im Grossteil des Bereichs (> 30 %)	

- ¹⁾ In Schritt 3 wird nur das Potenzial für eine geeignete räumliche Ausdehnung eruiert. Eine detaillierte Prüfung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' erfolgt in Schritt 5.
- ²⁾ In Schritt 4 wird nur das Potenzial für eine geeignete räumliche Ausdehnung eruiert. Eine detaillierte Prüfung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' erfolgt in Schritt 5.
- ³⁾ Unter Berücksichtigung der Mindestanforderungen an den Indikator 'Mächtigkeit'.
- ⁴⁾ Die VA für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' entfällt, weil diese in der östlichen Subjurassischen Zone nicht vorhanden ist.
- ⁵⁾ Unter Berücksichtigung der verschärften Anforderungen an den Indikator 'Mächtigkeit'.
- ⁶⁾ Als übertiefte Felsrinnen werden Rinnen mit einer Quartärmächtigkeit von mindestens 100 m definiert.
- ⁷⁾ Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle Mindestanforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.
- ⁸⁾ Der nutzbare Teil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hier alle verschärften Anforderungen bzgl. Tiefenlage erfüllen.
- ⁹⁾ Darin enthalten ist auch eine Bewertung der Kohlevorkommen.

Tab. 4: Detaillierte Liste der bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Indikatoren (Mastertabelle).

Legende:

K-Nr/I-Nr Kriteriennummer/Indikatornummer

MA/VA Mindestanforderungen/verschärfte Anforderungen gemäss Etappe 1

EI Entscheidrelevante Indikatoren

I Für Bewertung verwendete Indikatoren

(x) Bewertung nur für HAA

* Gegenüber der Wirtsgesteinsbewertung werden bei der Bewertung der Lagerperimeter auch konfigurationspezifische Aspekte mitberücksichtigt.

+ Hier werden auch die Resultate der Dosisberechnungen berücksichtigt.

o Hier werden auch die Resultate der bautechnischen Risikoanalyse berücksichtigt.

- ¹⁾ Vorgehen und Anforderungen (MA, VA) wie in SGT-E1, jedoch unter Verwendung neuer Daten und Erkenntnisse aus SGT-E2. Die Bewertungsskalen werden angepasst, falls eine Präzisierung aufgrund der in Etappe 1 erfolgten Festlegung der Wirtsgesteine und geologischen Standortgebiete notwendig ist.
- ²⁾ Entscheidrelevante Indikatoren zur Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtsgesteine bzw. Lagerperimeter.
- ³⁾ Verschiedene Varianten für untertägige Lagerperimeter, von denen einer als "massgebender Lagerperimeter für die Einengung" (kurz mLE) ausgewählt wird.
- ⁴⁾ Nutzbare Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine berücksichtigt über den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'.
- ⁵⁾ In SGT-E1 wurde diese Mindestanforderung auch über den Indikator 'Laterale Ausdehnung' erfasst (Nr. 7, nicht in Tabelle aufgeführt).
- ⁶⁾ Fliesst bei der Bewertung diverser Indikatoren ein, z.B. beim Indikator 'Selbstabdichtungsvermögen'.
- ⁷⁾ Wird in SGT-E2 nicht verwendet.
- ⁸⁾ Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (gemäss Hinweis in ENSI 2010b).
- ⁹⁾ Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet, da abgedeckt durch regionale geologische Elemente (verbesserter Kenntnisstand durch 2D-Seismik).
- ¹⁰⁾ Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (in SGT-E1 nur für geologisch-tektonische Grossräume verwendet).
- ¹¹⁾ Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (detailliertere Erfassung anhand Indikatoren Nr. 43 und 44).
- ¹²⁾ Wird in SGT-E2 nicht mehr verwendet (detailliertere Erfassung anhand Indikator 'Regionale tektonische Elemente: Zu meidende tektonische Zonen').

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'							
1.1	Kriterium 'Räumliche Ausdehnung'							
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)			x	x	x	x	x
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion			x	x	x	x	x
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen					x	x	x
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion			x	x	x	x	x
5	Mächtigkeit * ⁺	x	x	x	x	4)	x	x
6	Regionale tektonische Elemente a) Abstand zu regionalen Störungszonen b) Zu meidende tektonische Zonen			x		x		
8	Platzangebot untertags			5)	x	x	x	x
1.2	Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung'							
9	Hydraulische Durchlässigkeit * ⁺	x	x				x	x
10	Grundwasserstockwerke						x	
1.3	Kriterium 'Geochemische Bedingungen'							
11	Mineralogie	x					x	
12	pH	x					x	
13	Redox-Bedingungen	x		x			x	
14	Salinität	x					x	
15	Mikrobielle Prozesse	x					x	
16	Kolloide	x	x				x	x

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
1	Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs'							
1.4	Kriterium 'Freisetzungspfade'							
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums ⁺	x	x				x	x
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	x	x				x	x
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade ⁺	x	x				x	x
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade ⁺	x	x				x	x
21	Tonmineralgehalt ⁶⁾							
22	Selbstabdichtungsvermögen	x	x				x	x
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'							
2.1	Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften'							
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)						x	x
24	Seismizität						x	x
25	Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen ⁷⁾							
26	Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus) ⁸⁾							
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) [*]	x	x	x			x	x
2.2	Kriterium 'Erosion'							
28	Erosion im Betrachtungszeitraum						x	x
2.3	Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse'							
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	x					x	
30	Chemische Wechselwirkungen	x					x	
31	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas	x					x	
32	Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur	(x)					(x)	

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
2	Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'							
2.4	Kriterium 'Nutzungskonflikte'							
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	×					×	
34	Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins			×			×	
35	Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins						×	
36	Mineral- und Thermalwassernutzungen			×			×	
37	Geothermie und weitere energiebezogene Nutzungen des Untergrunds						×	
3	Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'							
3.1	Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine'							
38	Diffus gestörte Zonen ⁹⁾							
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	×	×				×	×
40	Erfahrungen	×					×	
3.2	Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse'							
41	Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse ¹⁰⁾							
42	Kontinuität der interessierenden Schichten ¹¹⁾							
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund *	×	×				×	×
44	Explorationsbedingungen an Oberfläche			×			×	
3.3	Kriterium 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen'							
45	Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen) ¹²⁾							
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	×					×	

K-Nr. I-Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertung Wirtgesteine		Abgrenzung Lagerperimeter			Bewertung Lagerperimeter / Standortgebiete	
		I ¹⁾	EI ²⁾	MA ¹⁾	VA ¹⁾	OA ³⁾	I ¹⁾	EI ²⁾
4	Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'							
4.1	Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen'							
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften *	×					×	
4.2	Kriterium 'Untertägige Erschließung und Wasserhaltung'							
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen ⁹⁾						×	×
49	Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)			×			×	

2 Frankreich

2.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl

In Frankreich ist die ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) für die Entsorgung und die Endlagerung der radioaktiven Abfälle zuständig. Von 1979 bis 1991 war sie ein Institut der CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Das Konzept der ANDRA sieht eine Endlagerung in Tonsteinen des Callovo-Oxfordium in ca. 500 m Tiefe vor. Die Region Meuse/Haute-Marne wurde nach einem Mediationsverfahren unter Beteiligung mehrerer Departements nach geowissenschaftlichen Untersuchungen als Standort für ein Untertagelabor ausgewählt. Nach umfangreichen Untersuchungen im Unterlagelabor Meuse/Haute-Marne und in der Region wurden von der ANDRA Standorte vorgeschlagen, in denen das Endlager "CIGEO" (Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne) errichtet werden soll (ANDRA 2013). Es ist geplant, bis 2017 ein Planfeststellungsverfahren einzuleiten. Die Planungen für das Endlager "CIGEO" sehen eine Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle vor.

2.2 Verlauf der Standortauswahl

2.2.1 Phase I (bis 1991)

In Frankreich erfolgten erste Studien zur Suche nach möglichen Standorten für ein geologisches Tiefenlager seit den 1960er Jahren (CNE 1995). Nach dem "Rapport Gruson" (1974) wurden erste Untersuchungen zu potenziellen Endlagerstandorten durchgeführt. Die "Commission Castaing" (1981-1982) fasste die Ergebnisse zusammen und erarbeitete erste Empfehlungen/Richtlinien zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen (CCSIN 1984). Daraufhin wurde in den 1980er Jahren im Auftrag der CEA und der ANDRA ein systematisches Untersuchungsprogramm durch BRGM (Bureau de recherche géologiques et minières, Service géologique national) durchgeführt (Programm CEA 1983). Nachdem zuerst zahlreiche verschiedene geologische Formationen hinsichtlich ihrer Permeabilität untersucht wurden, wurden in Anlehnung an die Erkenntnisse der EU die Untersuchungen auf die potenziellen Wirtsgesteine Granit, Salz und Tongesteine aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften begrenzt. Daraufhin wurden in mehreren Etappen Tonsteine, Tonschiefer, Granit und Salz als potenzielle Wirtsgesteine untersucht und mögliche Standortregionen ausgewiesen. Nach einer Vorauswahl auf der Grundlage von Kriterien und Empfehlungen der „Commission Castaing“ (s. Kap. 2.3) anhand vorhandener geowissenschaftlicher Daten (Daten der Erdölindustrie, geologische Karten, Seismik, Bohrungen, etc.) und einfachen In-situ-Untersuchungen,

erfolgten in der 2. Etappe Untersuchungen zum Eignungsnachweis (z. B. Bohrungen u. seismische Untersuchungen).

1985 wurde im Auftrag der französischen Regierung eine Expertengruppe unter Leitung von Professor Goguel eingesetzt, um die technischen Sicherheitskriterien für eine Standortauswahl zu präzisieren. In dem Bericht wurden u. a. Empfehlungen für das Vorgehen bei einer Standortsuche, Art und Umfang der notwendigen Untersuchungen, Standortauswahlkriterien und zu spezifischen Untersuchungen der verschiedenen Wirtsgesteine dargestellt. Die Ergebnisse wurden 1987 in einem Bericht zusammengefasst (GOGUEL 1987) und dienten als Basis für spätere Standortauswahlverfahren und Gesetzesentwürfe.

Nach Abschluss des Untersuchungsprogramms des BRGM wurden 1987 in einer Vorauswahl 4 Regionen mit unterschiedlichen Wirtsgesteinen als potenzielle Standorte ausgewählt:

- Tonsteinformation im Departement Aisne (Oberer Lias und Callovo-Oxfordium),
- flach lagernde Salzformation im Departement Ain (Tertiär), die evaporitischen Schichten besitzen eine Mächtigkeit > 1000 m, in der Schichtfolge kommen anhydritische, tonige und mergelige Lagen vor, z. T. liegt das Salz oberflächennah,
- Granitformation im Departement Deux-Sèvres (Karbon) sowie
- Tonschieferformation im Departement Maine-et-Loire (Oberes Präkambrium).

1987 wurde die ANDRA von der Regierung beauftragt, in diesen vier Regionen detaillierte Untersuchungen durchzuführen und die Errichtung eines Untertagelabors zu prüfen (CNE 1995). Diese Standortvorauswahl erfolgte ohne Konsultationen mit den betroffenen Regionen. Aufgrund von erheblichen Widerständen in der Bevölkerung wurden 1989 die geologischen Erkundungsarbeiten in allen genannten potenziellen Standortregionen abgebrochen und 1990 wurde ein Moratorium über die Fortsetzung dieses ersten landesweiten Standortauswahlprozesses verhängt.

2.2.2 Phase 2 (1991 bis heute)

1991 wurde unter neuer gesetzlicher Grundlage (ANDRA 1995) ein neues Auswahlverfahren mit einem Mediationsverfahren unter Leitung des Abgeordneten Cristian Bataille gestartet. Ziel war es, ein Untertagelabor in einem geeigneten Wirtsgestein zu errichten. Dabei wurden Gespräche mit zahlreichen Departements geführt, die potenziell geeignete Bereiche aufwiesen und ihre politische Bereitschaft signalisierten. Unter Zugrundelegung der im ersten Suchverfahren zusammengestellten Informationen und Daten, der

Kenntnisse über die Barriereigenschaften unterschiedlicher Gesteinstypen sowie den Standortanforderungen der RFS (ASN 1991, s. Kap. 2.3) wurden 1994 mit den bereits vorliegenden Daten aus Standortvoruntersuchungen (Seismik, Bohrungen) der ANDRA vier potenzielle Standortgebiete ausgewählt (BATAILLE 1996):

- Schluffstein-Mergel-Formation bei Marcoule im Departement Gard,
- Granitformation unter Sedimentbedeckung bei La Chappelle-Baton im Departement Vienne,
- Tonsteinformation bei Bure im Departement Meuse sowie
- Tonsteinformation im Departement Haute Marne.

Salzformationen wurden nicht mehr als potenzielles Wirtsgestein in Betracht gezogen, da sie in Frankreich einen förderbaren Rohstoff darstellen (Nutzungskonflikt).

Die Gebiete in den Departements Meuse und Haute-Marne wurden später zusammengefasst. Bei der Vorauswahl dieser möglichen Endlagerstandortregionen wurde darauf geachtet, dass die politische Akzeptanz für das Endlagerprojekt in den betroffenen Regionen vorhanden war. Im Anschluss an diese Vorauswahl wurde die ANDRA mit Untersuchungen hinsichtlich der Prüfung der geologischen Voraussetzungen für den Bau von Untertagelaboren (URL) in den ausgewählten Standortgebieten beauftragt (ANDRA 1997a, 1997b, 1997c). Parallel dazu erfolgten Studien zur Klärung der grundsätzlichen Eignung der genannten geologischen Formationen für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle.

Aufgrund des ungenügenden Kenntnisstandes zur Möglichkeit einer HAW-Endlagerung in den französischen Granitoiden wurden weitere diesbezügliche generische Untersuchungen initiiert und die Beteiligung Frankreichs an Forschungsprojekten in URL in kristallinen Gesteinen (z. B. ONKALO, Finnland; Äspö, Schweden; Grimsel, Schweiz und Lac du Bonnet, Canada) festgelegt. Im Ergebnis dieser Forschungsarbeiten wurde die prinzipielle Eignung granitoider Gesteine für die HAW-Endlagerung unterstrichen und für den Fall der Nutzung dieser Endlagerungsoption die Notwendigkeit weiterer standortbezogener Untersuchungen deutlich gemacht (ANDRA 2005a, 2005b).

Nach Auswertung der geowissenschaftlichen Untersuchungen, der vorläufigen Endlagerkonzepte und erster Sicherheitsanalysen fiel im Dezember 1998 die politische Entscheidung für den Standort Bure (Departement Meuse/Haute-Marne) zur Errichtung eines Untertagelabors (ANDRA 2001). Daraufhin wurde Ende 1998 die ANDRA ermächtigt, in der Nähe des Dorfes Bure, etwa 230 km E Paris, am östlichen Rand des Pariser Beckens, ein Untertagelabor für standortbezogene In-situ-Untersuchungen zu errichten.

In der Region Meuse/Haute Marne besteht die potenzielle Wirtsgesteinsformation aus Tonsteinen des Callovo-Oxfordium (mittlerer bis oberer Jura, ca. 155 Mio. Jahre alt) mit einer Mächtigkeit von max. 130 m. Die Gesteine des Callovo-Oxfordium fallen mit 1° bis 1,5° nach NW ein und lagern in dieser Region in einer durchschnittlichen Tiefenlage von ca. 500 m.

Ergänzend zur Errichtung des Untertagelabors erfolgten in einem ca. 200 km² großen Gebiet bei Bure seismische Untersuchungen und Tiefbohrungen zur Charakterisierung der geologischen Verhältnisse. Die Untersuchungsergebnisse der Forschungen im URL und in der Region von 1991 bis 2005 wurden in einem "Dossier 2005" zusammengefasst (u. a. ANDRA 2005a, 2005c), der französischen Regierung übergeben und veröffentlicht. Vor dem Hintergrund der bisherigen Untersuchungsergebnisse und auf Basis des Gesetzes zur Endlagerung von 1991 wurde 2006 ein ergänzendes Gesetz zur Endlagerung verabschiedet (ANDRA 2006), das das Vorgehen zur Errichtung eines Endlagers regelt. Ein Standort wurde dabei zwar noch nicht festgelegt, die ANDRA wurde aber ermächtigt, die Arbeiten im Untertagelabor bei Bure und die Untersuchungen in der Region fortzusetzen.

Nach ausführlichen Voruntersuchungen in der Region Meuse/Haute-Marne und im URL Meuse/Haute-Marne wurde eine ca. 30 km² große Standortregion "ZIRA" (Zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie) ausgewählt, in der mehrere Standortalternativen für das Endlager "CIGEO" (Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne) durch die ANDRA vorgeschlagen wurden (ANDRA 2010, 2013).

2013 fand ein Öffentlichkeitsverfahren (débat public) statt, in dem das Endlagerprojekt in mehreren Veranstaltungen diskutiert wurde. Die Ergebnisse dieses Verfahrens wurden als Empfehlungen der ANDRA übergeben und sollen in den weiteren Arbeiten berücksichtigt werden.

2015 sollen der französischen Regierung die notwendigen Unterlagen für das Planfeststellungsverfahren des Endlagerprojektes "CIGEO" übergeben werden. Nach Prüfung der Unterlagen (2016-2018) soll 2017 ein Genehmigungsantrag für ein Endlager gestellt werden ("Plan National de Gestion des Matières et des Déchêts Radioactifs"). Baubeginn soll 2019 sein. Die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle wurde bereits von der "Commission Castaing" empfohlen. Sie wurde anschließend in den französischen Gesetzen zur Endlagerung von 1991 und 2006 verankert und soll auch Bestandteil des geplanten Gesetzes zum Bau und Betrieb eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle sein (s. Kap. 2.3). Möglicherweise wird in Analogie zur Vorgehensweise in anderen Ländern am letztendlich ausgewählten Standort zunächst ein Untertagelabor errichtet. Bei entsprechender Eignung des Standortes soll voraussichtlich 2025 das Endlager in Betrieb gehen.

2.3 Standortauswahlkriterien aufgrund von Empfehlungen und gesetzlichen Vorgaben

In Frankreich wurden für die Standortsuche nach einem Endlager für radioaktive Abfälle gesetzliche Regelungen (Règles fondamentales de sûreté, RFS) durch die ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) und Gesetze erlassen, in denen Sicherheitsrichtlinien und Vorgaben für ein Endlager definiert wurden. Die Inhalte bauen zeitlich und inhaltlich aufeinander auf und wurden dem Fortschritt der Endlagerarbeiten angepasst. Die wichtigsten werden hier aufgeführt. In den RFS wurden die Empfehlungen der “Commission Castaing” und des “Rapport Goguel” berücksichtigt (s. u.).

1991 wurde für die Neuaufnahme der Standortsuche für ein Endlager für radioaktive Abfälle das „Gesetz über die Behandlung radioaktiver Abfälle“ verabschiedet (ANDRA 1991). Die Rahmenbedingungen und Auswahlkriterien für einen Endlagerstandort in tiefen geologischen Formationen wurden in den RFS N° III.2.f“ (ASN 1991), früher DSIN, 1991 definiert.

Aufgrund der im Dossier 2005 dargestellten Untersuchungsergebnisse und auf Basis des Gesetzes zur Endlagerung von 1991 wurde 2006 ein neues Gesetz zur Endlagerung verabschiedet (ANDRA 2006), in dem das Vorgehen zur Errichtung eines Endlagers geregelt wird. In den gesetzlichen Regelungen und Gesetzen wurde auch die Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle verankert. Damit verbunden waren Auswirkungen auf die Auslegung des Endlagerkonzeptes und entsprechende Forschungsarbeiten.

2009 wurde die RFS von 1991 überarbeitet (ASN 2009). Es wurden dabei die Sicherheitsanforderungen an ein Endlager weiter spezifiziert und die Empfehlungen der International Atomic Energy Agency (IAEA), der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), der Nuclear Energy Agency (NEA) und der International Commission on Radiological Protection (ICRP) berücksichtigt.

In Tabelle 5 sind die grundlegenden Kriterien aus den Berichten der “Commission Castaing” (CCSIN 1984) und GOGUEL (1987) sowie der Sicherheitskriterien von 2009 (ASN 2009) dargestellt.

Tab. 5: Zusammenfassung der geowissenschaftlichen Kriterien nach (CCSIN 1984),
 GOGUEL (1987) und ASN (2009)

Kriterien*	
Wesentliche Kriterien	
Hydrogeologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr geringe Permeabilität des Wirtsgesteins ▪ Kein Einfluss von Klüften u. Störungen ▪ Homogenität der hydraulischen Barriere-eigenschaften ▪ Geringer hydraulischer Gradient in den Aquiferen des Deckgebirges und des Nebengebirges ▪ Umfassende Kenntnis der großräumigen regionalen Hydrogeologie
Stabilität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sicherheit gegen eiszeitliche Einflüsse, tektonische Hebungen, aktive Störungen, Erdbeben
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neotektonik
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz/Abdichtung vor eindringenden Wässern
Wichtige Kriterien	
Geochemische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eigenschaften der Barrieren ▪ Verhinderung der Freisetzung von Radionukliden ▪ Nachweis der Diffusions- u. Retentionseigenschaften
Geomechanische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geotechnische Stabilität ▪ Geomechanische Eignung für Auffahrung und Errichtung von Strecken und Schächten
Thermische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigung thermischer Effekte auf das Endlager und das Wirtsgestein
Tiefe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiefe zwischen 150 u. 1000 m
Natürliche Ressourcen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausschluss bei Nutzungskonflikten
Empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evtl. Verdünnung durch Vorfluter ▪ Vorfluter möglichst weit entfernt ▪ Möglichkeit der Teufenauswahl

* Die Unterteilung GOGUELS nach wesentlichen, wichtigen Kriterien und empfohlenen Eigenschaften wurde in den jüngeren Sicherheitsrichtlinien der ASN nicht mehr getroffen. Da ihre Inhalte aber weiter gefordert werden, wurden sie in der Tabelle beibehalten.

Weitere Empfehlungen betreffen durchzuführende Erkundungsmaßnahmen, allgemeine Empfehlungen für die Auffahrung und den Betrieb sowie Empfehlungen zum Risiko durch den menschlichen Einfluss.

Obwohl die Planungen der ANDRA sich auf ein Endlager in Tonsteinen des Callovo-Oxfordium bei Bure festgelegt haben, wird in der Sicherheitsrichtlinie von 2009 ausdrücklich dargestellt, dass kein Wirtsgestein ausgeschlossen wird, wenn es die erforderlichen Sicherheitsrichtlinien erfüllt. Daher erstrecken sich die Kriterien auch auf die Untersuchung anderer Wirtsgesteine (s. Tabellen 6 bis 9). Es besteht somit in Frankreich weiterhin die Option auch andere Wirtsgesteine auf ihre Eignung zu untersuchen, unbeschadet der Arbeiten für ein Endlager am Standort Meuse/Haute-Marne. In den Tabellen 6 bis 9 werden die speziellen, auf verschiedene Wirtsgesteinstypen bezogenen Untersuchungsschwerpunkte zusammengefasst. Sie berücksichtigen die Berichte der „Comission Castaing“, des Rapport Goguel und der RFS. Aus den Untersuchungen können Abwägungskriterien für zukünftige Auswahlverfahren abgeleitet werden.

Tab. 6: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in kristallinen Gesteinen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987)

Kristallin
Geodynamische Entwicklung vom Paläozoikum bis heute inkl. Analyse der wesentlichen Entwicklungsschritte zur Einschätzung der zukünftige Entwicklung
Geologischer und strukturgeologischer Zusammenhang der Untersuchungszone
Strukturgeologische und petrologische Analyse des Granits
Strukturanalyse und Beschreibung der Störungs- und Kluftsysteme in verschiedenen Maßstäben
Einfluss von Störungen und Bewegungen auf die Hydrogeologie und das Endlager
Entwicklung der radiometrischen Strahlenbelastung durch das Endlager hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Wirtsgestein
Charakterisierung der hydrogeologischen Verhältnisse in unterschiedlichen Maßstäben
Detaillierte geologische Kartierung des Granitmassivs, besonders der Klüfte
Zusammenhang zwischen Wirtsgestein und Nebengesteinen
Charakterisierung der hydrogeologischen Verhältnisse in Kluft- und Störungssystemen und den für Modellberechnungen notwendigen Parametern, um die hydrogeologische Verbindung zum Grundwasserleiter/Vorfluter untersuchen zu können

Tab. 7: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in Tonschiefern nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987)

Tonschiefer
Lithostratigraphie der Schieferformation
Kartierung speziell von Sandstein-/Quarzitbereichen
Kartierung der jüngeren Schichten, z. B. quartäre Überdeckung
Genese und Metamorphose der Tonschiefer
Charakterisierung der Kluft- und Störungssysteme
Geologischer und strukturgeologischer Zusammenhang
Hydrogeologische und hydraulische Charakterisierung der Kluft- und Störungssysteme

Tab. 8: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in salinaren Formationen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987)

Salinare Formationen
Lagerungsverhältnisse und Geometrie (Form, Internbau, Ausdehnung, Tiefe, Mächtigkeit, Kontakt zum Nebengestein)
Genese (Ablagerungsbedingungen, zeitliche Entwicklung, Aufstiegsmechanismen, Beckenentwicklung)
Stratigraphische Abfolge der evaporitischen Schichten
Lithologie u. Zusammensetzung der Evaporite (Haupt- und Nebenanteile, synsedimentäre u. diagenetische Umwandlung), Laugenvorkommen, Anteil von Karbonaten, Ton, Sulfaten u. detritischen Anteilen
Charakterisierung der spezifischen Eigenschaften
Strukturgeologische Entwicklung und Zusammenhang mit Sockelstörungen
Hydrogeologische Charakterisierung des Wirtsgestein und der Nebengesteine sowie von vorhandenen Störungssystemen, mögliche Ablaugung

Tab. 9: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in Tonstein-Formationen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987)

Tonstein-Formationen
Zusammensetzung und Homogenität/Heterogenität des Tonsteins (Speziell geotechnische und hydrogeologische Eigenschaften)
Vertikale (Störungen/Falten) und horizontale (Auskeilen, Fazieswechsel, Diskordanzen) Diskontinuitäten
Interpretation der Genese und Ablagerungsgeschichte
Hydrogeologische Charakterisierung
Geometrie der Aquifere und der Aquitarde
Hydrogeologische Parameter (Porosität, Permeabilität, Transmissivität) in vertikaler und horizontaler Erstreckung), ggf. Berücksichtigung lokaler Störungs- und Kluftsysteme
Geochemische Eigenschaften, insbesondere Salinität
Regionale geodynamische Entwicklung unter Berücksichtigung der Seismizität und der tektonischen Strukturen

Ergänzend zu den in Tabelle 5 dargestellten geowissenschaftlichen Kriterien wird in den Sicherheitsanforderungen von 2009 als radiologisches Schutzziel eine maximale Strahlenbelastung von 0,25 mSv/a festgelegt, das unter Berücksichtigung des Endlagerkonzeptes und möglicher natürlicher Ereignisse (z. B. Erdbeben und Eiszeiten) nicht überschritten werden soll. Der Nachweiszeitraum wird aufgrund der Aussagesicherheit auf 10000 Jahre angegeben. Für Zeiträume darüber hinaus sollen Modellberechnungen die maximale Strahlenbelastung belegen. Weitere Sicherheitsanforderungen betreffen die Erfassung von Parametern bzw. den Nachweis von Eigenschaften der jeweiligen Wirtsgesteine und die sich daraus ergebenden erforderlichen Untersuchungen. Diese Daten dienen der Charakterisierung des Wirtsgesteins und als Basis für Modellberechnungen. Insbesondere sollen sie für eine Abschätzung der Eignung bzw. der Barrierewirksamkeit und für die geforderte Langzeitsicherheitsanalyse herangezogen werden. Zudem sollen für die verschiedenen Wirtsgesteine die wichtigsten Daten zur Genese und zur strukturellen Entwicklung ermittelt werden (Tabellen 6 bis 9).

2.4 Zusammenfassung

Das Auswahlverfahren erfolgte in Frankreich in mehreren unterschiedlich ausgerichteten Phasen:

- Suche nach einem geeigneten Standort anhand geowissenschaftlicher Mindestanforderungen.
- Nachweis der geforderten Eigenschaften des Wirtsgesteins und Ermittlung der Erfordernisse für die Realisierung des Endlagerkonzeptes und den Langzeitsicherheitsnachweis.
- Festlegung des Vorgehens durch Gesetze und Verordnungen.
- Festlegung einer geeigneten Standortregion nach geowissenschaftlichen Untersuchungen anhand politischer Entscheidungen.
- Umfassende Untersuchungen zur Standortcharakterisierung und zur Ermittlung von Parametern für den Eignungsnachweis und den Langzeitsicherheitsnachweis.

Die Auswahl der Region Meuse/Haute-Marne als Standort für ein Untertagelabor im Rahmen des Standortsuchverfahrens von 1991 basierte auf den folgenden allgemeinen Anforderungen (ANDRA 2001):

- einfach gebautes geologisches Umfeld,

- Vorkommen von nur wenigen Störungszonen, die sich seismisch gut detektieren lassen,
- seismologische Stabilität der Region,
- große Mächtigkeit (ca. 130 m) und Homogenität der Tonschicht,
- sehr geringe Permeabilität,
- hohes Sorptionsvermögen sowie
- große Verbreitungsfläche des Endlagerwirtsgesteins, d. h. das Vorhandensein vieler Standortalternativen.

Nach der Festlegung der Standortregion erfolgten umfangreiche Untersuchungen der regionalen geologischen Verhältnisse durch Untersuchungen von Übertage und in einem Untertagelabor. Aufgrund der positiven Ergebnisse der Untersuchungen wurden von der ANDRA in der Region Meuse/Haute-Marne mehrere Standortalternativen für das Endlager "CIGEO" vorgeschlagen. Die endgültige Standortauswahl soll nach Prüfung der Unterlagen in einem Genehmigungsverfahren ab 2017 erfolgen. Eine Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle ist gesetzlich vorgesehen.

2.5 *Literaturverzeichnis*

ANDRA (1995): La recherche sur la gestion des déchets radioactifs - Loi du 30 Décembre 1991. – Collection Les Essentielles: 7 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (1997a): Underground Research Laboratory - East of France - State of knowledge and experimental program. – Informationsbroschüre: 34 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (1997b): Underground Research Laboratory - Gard - State of knowledge and experimental program. – Informationsbroschüre: 34 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.

ANDRA (1997c): Underground Research Laboratory - Vienne - State of knowledge and experimental program. – Informationsbroschüre: 33 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.

- ANDRA (2001): Dossier 2001 Argile. Sur l'avancement des études & recherches relatives a la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à la vie longue en formation profonde. – Rapport de synthèse - Partie B - Compléments scientifiques et techniques: 332 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005a): Dossier 2005 Argile. Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne. – Tome 1: Le site de Meuse/Haute: histoire géologique et état actuel: 713 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005b): Dossier 2005 Granite. Synthesis - Assets of granite formations for deep geological disposal: 159 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2005c): Dossier 2005 Argile. Synthèse - Evaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse: 239 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2006): Matières et Déchets Radioactifs - Loi de Programme du 28 Juin 2006. – Collection Les Références: 18 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2010): Stockage réversible profond - étape 2009 - Proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface: 145 S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ANDRA (2013): PROJET CIGÉO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne: 104 S. S.; Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Châtenay-Malabry, France.
- ASN (1991): Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que reacteurs - Règle No. RFS-III.2.f du 01/06/1991 - Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage (1er juin 1991); Autorité de Sûreté Nucléaire.

- ASN (2009): Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08 (Ersetzt RFS-III.2.f du 01/06/1991): 32 S.; Autorité de Sûreté Nucléaire.
- BATAILLE, C. (1996): Rapport sur l'évolution de la recherche sur la gestion des déchets nucléaires a haute activité. – ASSEMBLEE NATIONALE N° 2689, SENAT N°299.
- CCSIN (1984): RAPPORT CASTAING - Rapport du groupe de travail sur les recherches et developpements en matiere de gestion des dechets radioactifs. Conseil Superieur de la surete Nucleaire <oct. 83- oct. 84>: 140 S.; Ministere du redeploiement industriel et du commerce exterieur.
- CNE (1995): Commission Nationale D'Evaluation Relative Aux Recherches Sur La Gestion Des Dechets Radioactifs - Rapport d'évaluation N°1: 164 S.; Paris.
- GOGUEL, J. (1987): Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques: Critères techniques de choix de site, Ber. Minist. De L'Industrie des P. & T. et du Tourisme. Rapport du groupe de travail présidé par le professeur Goguel, juin 1985 - Mai 1987: 245 S.

3 Schweden

3.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl in Schweden

In Schweden ist das Entsorgungsunternehmen Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), ein Gemeinschaftsunternehmen der schwedischen Kernkraftwerksbetreiber, mit der Standortsuche sowie dem Bau und Betrieb eines Endlagers für radioaktiven Abfall beauftragt. Das von SKB verfolgte Endlagerkonzept sieht die Einlagerung im kristallinen Wirtsgestein in ca. 500 m Tiefe vor. Planungsgrundlage ist das Referenzdesign KBS-3, nach welchem die abgebrannten Brennelemente in Kupferkanistern eingeschlossen und umgeben von einer Bentonitbarriere in Bohrlöchern eingelagert werden. Die von SKB entwickelte Strategie zur Standortauswahl beruht auf zwei wesentlichen Bedingungen: zum einen geologische Verhältnisse, welche die langfristige Sicherheit der Einlagerung gewährleisten; zum anderen politische und gesellschaftliche Akzeptanz in den betroffenen Gemeinden (SKB 2011).

3.2 Verlauf der Standortauswahl

Die Suche nach einem geeigneten Standort begann in den 1990er Jahren mit landesweiten Übersichtsstudien, die regionale Datenzusammenstellungen und -analysen auf der Basis öffentlich zugänglicher Materialien beinhalteten. Eine grundlegende Schlussfolgerung der Übersichtsstudien war, dass sich potenziell geeignete Gebiete nicht einem bestimmten Teil des Landes oder gewissen geologischen Umgebungen zuordnen lassen, sondern von lokalen Bedingungen abhängig sind (SKB 2009).

Im nächsten Schritt wurden zwischen 1993 und 2000 in Machbarkeitsstudien detaillierte Datenzusammenstellungen und -analysen der Standortvoraussetzungen in acht Kommunen erstellt. Die schwedische Regierung hatte sich zuvor für die Vorlage von Machbarkeitsstudien für 5-10 Regionen ausgesprochen (SKB 2011). Die Teilnahme der Kommunen am Auswahlverfahren erfolgte auf freiwilliger Basis. In den Machbarkeitsstudien wurden sowohl geologische Voraussetzungen als auch Wirtschafts- und Umweltaspekte bewertet, um potenziell geeignete Standorte in den untersuchten Regionen zu lokalisieren. Basierend auf den Ergebnissen der Machbarkeitsstudien wurde lediglich eine der untersuchten Regionen aufgrund ungünstiger geologischer Verhältnisse vom weiteren Verfahren ausgeschlossen (SKB 2010). In den verbliebenen Regionen wurden acht potenziell geeignete Standorte identifiziert. Der Vergleich der Alternativen hinsichtlich geologischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Aspekte zeigte deutliche Vorteile der Standorte Forsmark und Simpevarp (SKB 2000). Da sich die dort zuständigen Gemeinden Oskarshamn und Östhamar zu einer freiwilligen Teilnahme am weiteren Auswahl-

verfahren bereit erklärten, führte SKB ab 2002 in Standortuntersuchungen umfassende Erkundungen der Geologie und der Biosphäre sowie standortspezifische Sicherheitsanalysen und Umweltverträglichkeitsuntersuchungen durch (SKB 2011). Systematische Auswertungen und Vergleiche der Standortalternativen Forsmark (Östhamar) und Simpevarp/Laxemar (Oskarshamn) führten im Jahr 2009 zur Entscheidung für den Standort Forsmark (SKB 2009, 2011). Als wesentlicher Vorteil des Standortes Forsmark werden von SKB die geringen Trennflächenvorkommen im Endlagerhorizont und die daraus folgenden geringen Grundwasserströmungen benannt (SKB 2009, 2011). Im März 2011 reichte SKB den Genehmigungsantrag für den Bau eines Endlagers für hoch radioaktiven Abfall am Standort Forsmark ein, der derzeit von der zuständigen Strahlenschutzbehörde (Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM)) geprüft wird (SKB 2011).

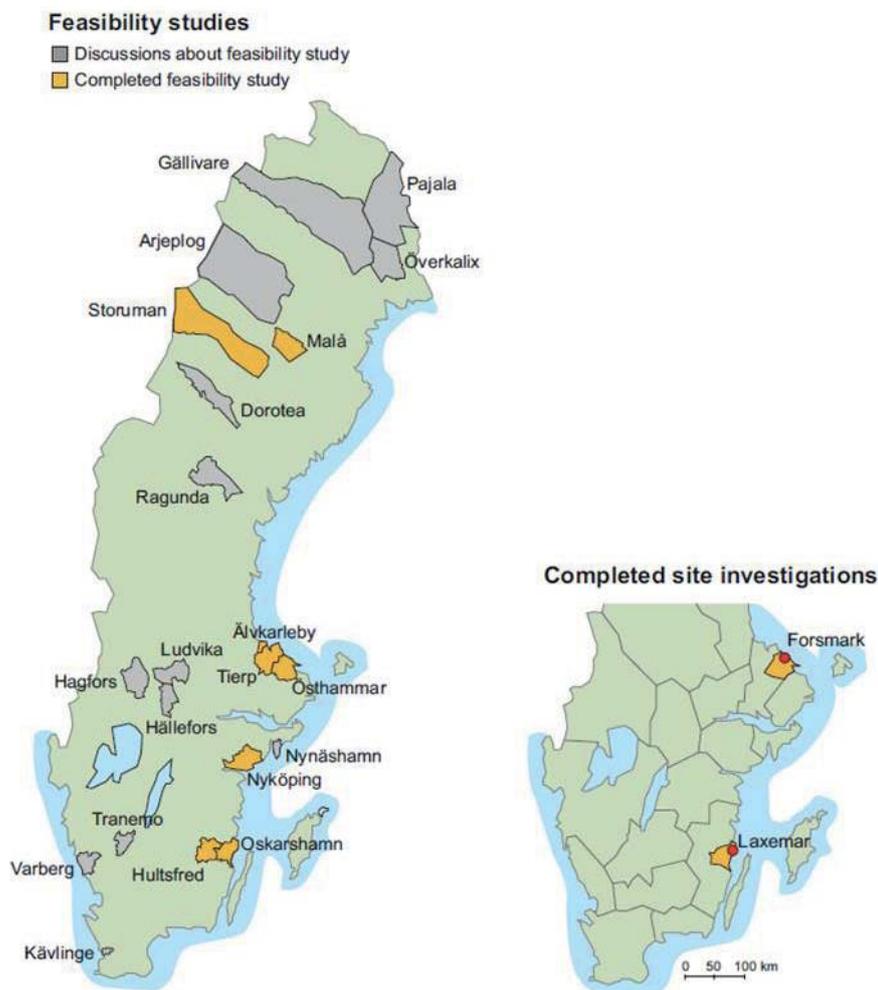


Abb. 13: Überblick über die in Schweden durchgeführten Machbarkeitsstudien und Standortuntersuchungen (SKB 2009)

3.3 Standortauswahlkriterien

Zu Beginn des Auswahlverfahrens in den frühen 1990er Jahren wurden von SKB Kriterien und Faktoren für die Standortauswahl entwickelt (SKB 1994), die schrittweise erweitert und konkretisiert wurden.

3.3.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen an die geologischen Standortverhältnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Aufrechterhaltung langfristig stabiler thermischer, hydrologischer, gebirgsmechanischer, seismischer und chemischer Bedingungen, um die Funktion der technischen Barrieren zum Einschluss des Abfalls zu gewährleisten (SSMFS 2008:21, SKB 1994),
- Gewährleistung eines hohen Rückhaltevermögens des Wirtsgesteins, um im Fall einer Beschädigung der technischen Barrieren den Radionuklidtransport zu verzögern (SKB 1994),
- Einhaltung eines ausreichenden Abstandes zu abbauwürdigen natürlichen Rohstoffvorkommen, um das Risiko unbeabsichtigten menschlichen Eindringens zu reduzieren (SSMFS 2008:21, SKB 1994).

Bezüglich der technischen Realisierbarkeit ergeben sich zudem die folgenden allgemeinen Standortanforderungen:

- Gebirgseigenschaften, die den Bau von Schächten, Tunneln und Felskavernen unter den gegebenen Sicherheitsanforderungen ermöglichen (SKB 1994),
- Gute Bedingungen für die Infrastruktur über- und untertage (SKB 1994).

Neben den sicherheitsrelevanten Anforderungen stellt die gesellschaftliche und politische Akzeptanz in den betreffenden Gemeinden das wichtigste Auswahlkriterium für den Standort dar (SKB 2011).

3.3.2 Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

Um während des Auswahlverfahrens Gebiete mit ungeeigneten geologischen Verhältnissen zu identifizieren und vom Verfahren auszuschließen, wurden die folgenden Ausschlusskriterien definiert (SKB 1994, SKB 2000):

- Für schwedische Verhältnisse abnorme Grundwasserchemie,
- stark heterogenes und schwer zu interpretierendes Gebirge,
- bekannte Deformationszonen und postglaziale Verwerfungen,
- ausgeprägte Austrittsbereiche des Grundwassers,
- potenziell explorationswürdige Gesteinsarten,
- mehrere engständige wasserführende Kluffzonen,
- hohes topographisches Gefälle (größer 1%),
- Vorkommen regionaler und lokaler plastischer Scherzonen, die eine sinnvolle Anordnung des Endlagers unter Berücksichtigung des erforderlichen Mindestabstandes zu diesen Scherzonen ausschließen,
- Ergebnisse gebirgsmechanischer Analysen, die darauf schließen lassen, dass es zu weitreichenden Stabilitätsproblemen kommen wird, die mit angemessener Anpassung des Endlagerdesigns nicht zu vermeiden sind.

Um Gebiete mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation zu identifizieren, wurden geowissenschaftliche Mindestanforderungen formuliert. Für die Eignung eines Standortes ist die Einhaltung sämtlicher Mindestanforderungen erforderlich (ANDERSSON et al. 2000, SKB 2000):

- Abstand zu regionalen plastischen Scherzonen, wenn deren Eigenschaften vom umgebenden Gestein abweichen. Als Ausnahmen werden tektonische Linsen genannt, die homogene und weitgehend unbeeinflusste Eigenschaften aufweisen (ANDERSSON et al. 2000).
- Es muss die Möglichkeit bestehen, Einlagerungsbereiche mit einem Mindestabstand zu regionalen und lokalen Großklüften zu positionieren. Die Einlagerungsnischen dürfen identifizierte kleinere Kluffzonen nicht durchqueren.
- Die Festigkeit und Primärspannungen des Gebirges sowie die Geometrie der Kluffsysteme müssen derart beschaffen sein, dass keine größeren Zonen der mechanischen Überbeanspruchungen im Einlagerungsbereich entstehen.
- Das im Endlagerhorizont anstehende unbeeinflusste Grundwasser darf keinen gelösten Sauerstoff enthalten, um die Korrosion der Kanister zu verhindern.
- Der Gesamtsalzgehalt (Total Dissolved Solids (TDS)) des Grundwassers im Endlagerhorizont muss einen Wert von 100 g/l unterschreiten, da ein erhöhter Salzgehalt die Langzeitintegrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen kann.

3.3.3 Vergleichsfaktoren und Abwägungskriterien

Um sowohl in den Übersichtsstudien als auch in den Machbarkeitsstudien Gebiete mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen zu identifizieren, wurden Abwägungskriterien bzw. Präferenzen definiert, d.h. Bedingungen, deren Einhaltung zu höheren Sicherheitsreserven, erleichterten Untersuchungs- und Konstruktionsbedingungen und geringeren Kosten führen. Für die Eignung eines Standortes ist die Erfüllung sämtlicher Präferenzen allerdings nicht erforderlich (ANDERSSON et al. 2000, SKB 1994, SKB 2000):

- Formation mit großer geometrischer Ausdehnung und wenigen größeren Klüftzonen,
- häufig vorkommende Gesteinsarten, um zukünftige Nutzungskonflikte zu minimieren,
- primäre Gebirgstemperatur im Endlagerhorizont kleiner als 25 °C, um Nutzungskonflikte mit geothermaler Energiegewinnung zu vermeiden,
- geringe Häufigkeit lokaler, kleiner Klüftzonen,
- geomechanische Eigenschaften (Primärspannungen, Festigkeit und Deformationseigenschaften) die im schwedischen Kristallin als „normal“ angesehen werden können,
- Temperaturausdehnungskoeffizient in einem für schwedische Verhältnisse üblichen Bereich (d.h. zwischen 10^{-6} und 10^{-5} K⁻¹) und der im Einlagerungsbereich nicht markant variiert,
- Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins höher als 2.5 W/(m K),
- Hydraulische Konduktivität des Wirtsgesteins in großen Bereichen unter 10^{-8} m/s,
- geringe Wasserdurchlässigkeit von Klüftzonen, die während des Baus passiert werden müssen (Transmissivität < 10^{-5} m²/s),
- Hydraulischer Gradient unter 1% im Endlagerhorizont,
- Grundwasser im Endlagerhorizont sollte einen pH-Wert zwischen 6-10, eine geringe Konzentration organischer Bestandteile, geringe Kolloid- und Ammoniumkonzentration, sowie einen Mindestgehalt an Magnesium und Calcium aufweisen,
- geringer Radon- und Radiumgehalt im Grundwasser und geringer Anteil uranhaltiger Minerale im Wirtsgestein,
- in großen Bereichen des Einlagerungsbereiches sollten Bohrlöcher und Einlagerungsnischen mit einer Darcy-Fließrate unter 0.01 m/a lokalisierbar sein,

- Transportwiderstand möglicher Fließwege größer als 10^4 a/m,
- Matrixdiffusivität und -porosität des Wirtsgesteins, die nicht viel geringer sind als die in der Sicherheitsanalyse SR 97 betrachteten Werte (Porosität 0.5%, Diffusivität s. OHLSSON & NERETNIEKS (1997)). Zugängliche Diffusionstiefe min. 1 cm.

Für den systematischen Vergleich zwischen den Standortalternativen Forsmark und Laxemar wurden die folgenden sicherheitsrelevanten Vergleichsfaktoren berücksichtigt (SKB 2009):

- Zusammensetzung und Struktur des Wirtsgesteins
 - Abstand zu größeren Deformationszonen
- Zukünftige klimatische Verhältnisse
 - Auswirkungen zukünftiger Eiszeiten (Inlandeis, Permafrost)
- Gebirgsmechanische Verhältnisse
 - Gebirgsspannungen und geomechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins (Primärspannungen, Festigkeiten)
 - Risiko und Konsequenzen möglicher Erdbeben
- Grundwasserströmung
 - Verteilung und Permeabilität wasserführender Klüfte
- Grundwasserzusammensetzung
 - Derzeitige und zukünftiger Zusammensetzung (Salzgehalt, gelöster Sauerstoff)
- Rückhaltevermögen
 - Matrixdiffusion und Sorption von Radionukliden
- Biosphäre
- Allgemeiner Kenntnisstand bzgl. des Standortes
 - Menge der durchgeführten Untersuchungen und daraus gewonnener Daten
 - Eindeutigkeit der Interpretationen

Darüber hinaus wurden im Vergleich zwischen den Standortalternativen technische und gesellschaftliche Faktoren, sowie die zu erwartenden Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit berücksichtigt.

Die technischen Faktoren sind die Bedingungen, welche die praktische Umsetzung des Endlagers unter Einhaltung der vorgeschriebenen Langzeitsicherheit so robust, funktional und effizient wie möglich machen. Berücksichtigt wurden (SKB 2009): Flexibilität bezüglich Änderungen der Rahmenbedingungen (z.B. geänderte Mengen des einzulagernden Abfalls), Technische Risiken, Technischer Entwicklungsbedarf, Funktionalität, Synergien und Kosten.

Neben der gesellschaftlichen Akzeptanz wurde von SKB unter den gesellschaftlichen Faktoren die lokal verfügbaren Ressourcen berücksichtigt, die für die Realisierung des Endlagers von Bedeutung sind, darunter die Verfügbarkeit von Zulieferbetrieben, öffentlicher und privater Dienstleister und der personellen Rekrutierungsbasis (SKB 2009).

Die Standorte wurden außerdem hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit während der Bau- und Betriebsphase des Endlagers evaluiert und verglichen. Die zu berücksichtigten Faktoren ergeben sich aus dem Umweltgesetz (SFS 1998:808), dem Gesetz über kerntechnische Tätigkeiten (SFS 1984:3) und dem Strahlenschutzgesetz (SFS 1988:220).

3.4 Literaturverzeichnis

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.

OHLSSON, Y. & NERETNIEKS, I. (1997): Diffusion data in granite. Recommended values. SKB TR-97-20. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SFS 1988:220: Svensk författningssamling 1988:220 Strålskyddslag. http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Lagar/Svenskforfattningssamling/Stralskyddslag-1988220_sfs-1988-220/

SFS 1998:808: Svensk författningssamling 1998:808 Miljöbalk. http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Lagar/Svenskforfattningssamling/Miljobalk-1998808_sfs-1998-808/

SFS 1984:3: Svensk författningssamling 1984:3 Lag om kärnteknisk verksamhet. http://www.riksdagen.se/sv/Dokument-Lagar/Lagar/Svenskforfattningssamling/Lag-19843-om-karnteknisk-ve_sfs-1984-3/

- SKB (1994): Treatment and Final Disposal of Nuclear Waste. Supplement to the 1992 Programme in Response to the Government Decision of December 16, 1993. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2000): Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. SKB TR-01-03. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2009): Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection. SKBdoc 1221293. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2010): Platsval – lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle. SKB R-10-42. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2011): Ansökan om tillstånd enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet till uppförande, innehav och drift av en kärnteknisk anläggning för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SSMFS 2008:21: The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. ISSN 2000-0987. Swedish Radiation Safety Authority.

4 Belgien

4.1 Zusammenfassende Darstellung der Standortauswahl in Belgien

In Belgien wurde die SCK•CEN (Belgian nuclear research centre, Waste and Disposal Department) mit den Arbeiten im Bereich der Kerntechnik und dem Bau und Betrieb sowie der Standortsuche für ein Endlager für radioaktive Abfälle betraut. Ab 1980 wurde die Zuständigkeit für die Behandlung der radioaktiven Abfälle an die ONDRAF/NIRAS (National Agency for Radioactive Waste and enriched Fissile Material) übergeben. Die Arbeiten erfolgten in Anlehnung an die Standards und Empfehlungen der "International Atomic Energy Agency" (IAEA), der "International Commission on Radiological Protection" (ICRP), der "OECD/Nuclear Energy Agency" (NEA) und der "European Commission" (EC). Die Standortsuche sollte dabei auf einen "geeigneten Standort" im Gegensatz zur Suche eines "bestmöglichen" Standortes ausgerichtet sein.

Auf der Grundlage der geologischen Verhältnisse und der Befunde aus F&E-Programmen plant Belgien eine Endlagerung der hoch radioaktiven Abfälle in halb-verfestigten Tonsteinen des Boom Clay und des Ypresian Clay, von denen besonders der Boom Clay intensiver untersucht wurde. Die Standortsuche soll in einem mehrphasigen Verfahren erfolgen, das wissenschaftliche, technische, sicherheitstechnische, ökologische, sozialpolitische und ökonomische Aspekte berücksichtigt. Das belgische Konzept sieht eine Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle vor. Die Einzelheiten des Vorgehens wurden in einem Entsorgungsplan dargestellt (ONDRAF/NIRAS 2011).

4.2 Verlauf des belgischen Untersuchungsprogramms zur Standortauswahl

In Belgien begann 1974 die SCK•CEN zusammen mit dem Geologischen Dienst von Belgien in Zusammenarbeit mit der EC mit ersten Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Unter Berücksichtigung allgemeiner Kriterien der EC und vorhandener Daten wurden dazu zunächst Studien zur Vorauswahl potenzieller Wirtsgesteine erstellt (ONDRAF/NIRAS 2001a). Als Ergebnis ergaben sich für Belgien halb-verfestigte plastische Tone (Boom Clay und Ypresian Clay) und paläozoische Tonschiefer als mögliche Wirtsgesteine. Die Tonschiefer wurden in Belgien nach weiteren Untersuchungen aufgrund ungünstiger Eigenschaften z. B. wasserführende Klüfte, Heterogenität, etc.) als nicht geeignet bewertet (ONDRAF/NIRAS 2001a, 2010).

Salzformationen erfüllen in Belgien nicht die geforderten Mindestanforderungen (ausreichende Größe, Tiefenlage, Zusammensetzung und Homogenität), um als Wirtsgestein

in Frage zu kommen, da sie in einer Tiefe von 600 m bis 3000 m liegen, eine zu geringe Mächtigkeit der reinen Salzsichten aufweisen (< 30 m) und als Wechsellagerung mit anderen Formationen (tonige, tonig-sandige und kalkige Lagen) ausgebildet sind (ONDRAF/NIRAS 2007, 2011).

Als untersuchungswürdiges Wirtsgestein wurde 1976 auf Empfehlung der "Evaluation Commission for Nuclear Energy" der Boom Clay als "Referenz-Wirtsgesteins-Formation" ausgewählt (Die Festlegung auf den Boom Clay oder Ypresian Clay wurde offiziell von der Belgischen Regierung noch nicht getroffen). Die "Mol-Dessel Nuclear Zone" wurde daraufhin als "Referenz-Standort" für wissenschaftliche Untersuchungen, Konzeptentwicklung und Machbarkeitsstudien ausgewählt. Die vorhandene multi-disziplinäre wissenschaftliche Infrastruktur und der Sicherheits- und Zugangsstatus der ausgewiesenen "Nuclear Zone" begünstigten diese Auswahl. Diese Standortauswahl erfolgte ausschließlich für methodologische Studien, um die technische Machbarkeit und die Sicherheit eines Endlagers im Boom Clay nachzuweisen. Sie bedeutet keine Vorauswahl für ein zukünftiges Endlager (ONDRAF/NIRAS 2001a, 2011). Als alternatives Wirtsgestein und als alternative Standortregion wurden der Ypresian Clay und die "Doel Nuclear Zone" ausgewählt.

Ein wesentlicher Teil des belgischen Untersuchungsprogramms besteht aus wissenschaftlichen Versuchen und Machbarkeitsstudien, die seit 30 Jahren im Untertagelabor "HADES" bei Mol durchgeführt werden. Für das Untertagelabor (URL) wurden im Boom Clay in einer Tiefe von 225 m mehrere Strecken aufgefahren. Das URL wird von EIG EURIDICE (European Underground Research Infrastructure for Disposal of nuclear waste In Clay Environment) betrieben.

Zur Charakterisierung des Boom Clay und zur Erstellung eines Eignungsnachweises erfolgten 3 Untersuchungsphasen mit umfangreichen F&E-Programmen (1974 bis 1989, 1990 bis 2003 und 2003 bis heute). Nach der ersten Untersuchungsphase wurde 1989 von der ONDRAF/NIRAS ein erster Zwischenbericht (Safety assessment and feasibility interim report, Safir) zur Beurteilung der Boom Clay-Formation beim belgischen Energieministerium eingereicht.

Nach dem Review des Safir-Reports und der positiven Evaluierung des "Boom Clay" wurde 1990 auf Empfehlung der "Safir-Evaluierungskommission" das Untersuchungsgebiet des Boom Clay ausgedehnt. Die Untersuchungen hatten das Ziel, die regionalen Kenntnisse über den Boom Clay zu erweitern und ein Gebiet festzulegen, das ähnliche Eigenschaften wie der Boom Clay bei Mol-Dessel besitzt. Parallel dazu erfolgten Untersuchungen des Ypresian Clay als alternatives Wirtsgestein.

Weitere Untersuchungen in der Phase II und III betrafen die spezifischen Eigenschaften

des Boom Clay, die radioaktiven Abfälle und ihre Konditionierung, das Endlagerkonzept, die Wechselwirkung zwischen Endlager und Wirtsgestein sowie Langzeitsicherheitsuntersuchungen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in einem zukünftigen Auswahlverfahren und der Festlegung von Kriterien berücksichtigt. Grundlage für die Beurteilung des Boom Clay als Wirtsgestein bildete der Safir-2-Bericht (ONDRAF/NIRAS 2001a, 2001b), in dem die Untersuchungen zum belgischen Endlagerkonzept zusammengefasst wurden. Dabei wird die Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle vorgesehen.

Unter Berücksichtigung gesetzlicher Regelungen hat die ONDRAF 2011 ein Entsorgungskonzept ("Waste Plan") erstellt und der belgischen Regierung vorgelegt (ONDRAF/NIRAS 2011). Es beschreibt das belgische Programm zur Endlagerung radioaktiver Abfälle und die geplante Vorgehensweise. Das Entsorgungskonzept dient auch als Entscheidungsgrundlage für die belgische Regierung.

Die Entscheidung über das weitere Vorgehen steht noch aus. Aktuell werden die F&E-Aktivitäten vor allem im URL fortgesetzt (z. B. PRACLAY, large-scale in-situ heater test and horizontal high-level radioactive waste disposal gallery seal test), um die Informationsdichte zu vertiefen und weitere Informationen für einen Langzeitsicherheitsnachweis zu erhalten. Eine Auswahl des Endlagerstandortes hat noch nicht stattgefunden.

4.3 Auswahl der Kriterien

4.3.1 Kriterien zur Vorauswahl

Die Vorauswahl geeigneter Wirtsgesteine und Standortregionen erfolgte in Belgien auf der Basis von Standortkriterien, die von der IAEA (IAEA 1977, 1981, 1983, 1989, 1994, 2006) und von der EC (EC 1979, 1989, 1992) für die Endlagerung von Wärme entwickelnden hoch radioaktiven Abfälle entwickelt wurden. Die Vorauswahl wurde auf Tongesteine, Salz und Kristallin begrenzt, da sie nach den Empfehlungen der EC aufgrund ihrer Eigenschaften und Lithologie die bevorzugten Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle darstellen. In den Tabellen 10 und 11 sind die allgemeinen Kriterien der IAEA und der EC für ein Endlager für Wärme entwickelnde hoch radioaktive Abfälle zusammengestellt.

Tab. 10: Zusammenfassung der Richtlinien und geowissenschaftlicher Kriterien für Wirtsgesteinsformationen der IAEA und der EC (nach ONDRAF/NIRAS 2001a)

Kriterien	IAEA Richtlinien, 1994	EC Kriterien, 1992
Geologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einfache Charakterisierung ▪ Rückhalt von Radionukliden ▪ Wenig Strukturelemente und potenzielle Fließpfade 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hohe Homogenität ▪ Hohe Kontinuität ▪ Einfache Struktur
Geometrie (Ausdehnung, Tiefe, Mächtigkeit)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausreichend für das Endlager ▪ Ausreichende Entfernung zu Störungen ▪ Ausreichende Tiefe (Schutz vor Erosion und menschlichen Aktivitäten) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ ausreichend für Abfalltyp und -mengen ▪ effektive Isolierung ▪ ausreichende Schutztiefe (z. B. Erosion)
Stabilität	Geringe Wahrscheinlichkeit geodynamischer Prozesse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hoch ▪ Keine Tektonik < 10000 Jahre ▪ Seismische Aktivität < 7 (Richterskala) ▪ Keine geothermischen Anomalien oder vulkanische Ereignisse
Hydrogeologische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringe Durchlässigkeit ▪ Hohe Verdünnungskapazität im Umfeld des Wirtsgesteins 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringe Durchlässigkeit und/oder hohe Verdünnungskapazität ▪ Günstige Hydrogeochemie
Geochemische und hydrogeologische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verhinderung der Freisetzung von Radionukliden ▪ Rückhaltevermögen für langlebige Radionuklide 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Günstige Retention

Geomechanische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignet für Konstruktion, Betrieb und Verschluss eines Endlagers ▪ Langzeitstabilität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignet für den sicheren Betrieb ▪ Garantierter Schutz vor Wasserzutritt in den Schächten und im Endlager
Thermische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Günstige thermische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableitung von Wärme (Behälter) ohne Beeinflussung der Wirtsgesteinseigenschaften ▪ Keine übermäßige Erhitzung des Wirtsgesteins
Natürliche Ressourcen Menschliche Aktivität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor heutigen und zukünftigen menschlichen Aktivitäten, die das Endlagersystem negativ beeinflussen ▪ Effektive Verfüllung von Bohrungen und Schächten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausreichender Abstand zu Rohstoffen
Konstruktion/ Auffahrung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Günstige Eigenschaften zum Endlagerbetrieb unter Tage ▪ Geringe Beeinflussung durch die Auffahrung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Die Auffahrung des Endlagers darf seine Funktion nicht beeinträchtigen

Tab. 11: Überblick von Auswahlkriterien für Tongesteine für den Europäischen Katalog (EC 1979, 1989)

Element	Kriterium	Abgrenzung
Gestein	Ionenadsorptionskapazität	Hoch
	Thermische Konduktivität	Hoch
	Hydraulische Konduktivität	Sehr gering
	Geomechanische Eigenschaften	Gut Hohlraumstabilität Hohe Plastizität
	Löslichkeit	Abschätzbar (Gesteinstyp)
Formation	Mächtigkeit	≥ 100 m, ausreichend für ein Endlager
	Ausdehnung	Anpassung an das Gestein
	Homogenität und Kontinuität	So groß wie möglich ▪ Geringe/keine Störungen ▪ Geringe/keine Fazieswechsel
	Tiefe	200 bis 300 m, abhängig von Erosion u. Eiszeiten
Umwelt	Grundwasserbewegung	Sehr gering, ausreichende Distanz zum Aquifer
	Absorptionskapazität des überlagernden Gesteins	Hoch
	Geothermie	Keine starken Anomalien
	Seismische Aktivität	≤ IX MSK *
	Tektonik	▪ Einfach, berechenbare Strukturen ▪ Geringe tektonische Aktivität

* MSK = Medvedev-Sponheuer-Karnik-Skala

Als Ausschlusskriterien galten dabei ungünstige hydrogeologische Eigenschaften, instabile geologische und strukturgeologische Verhältnisse und das Vorhandensein natürlicher Ressourcen.

Als Ergebnis der Voruntersuchen wurden die Tonschiefer und Salzformationen ausgeschlossen bzw. für Belgien als nicht geeignet angesehen (s. Kap. 4.2). Der Boom Clay erfüllte die EC-Kriterien. Nach (ONDRAF/NIRAS 2011) weist er folgende Eigenschaften auf, die auch als Mindestanforderungen gelten können:

- Geotektonische Stabilität.
- Ausreichende Tiefenlage als Schutz vor Erosion oder Hebung (Teufe > 200 m).

- Ausreichende Mächtigkeit des Wirtsgesteins (> 60 m) und Distanz zu über- und unterlagernden Schichten, Störungszonen etc.
- Ausreichende Volumen im Wirtsgestein für ein Endlager.
- Geeignete Lithologie und Tiefe des Wirtsgesteins.
- Homogenität der Tonschicht.
- Geeignete hydrogeologische Randbedingungen (kein Kontakt mit Grundwasser im Bereich des Endlagers).

Das Wirtsgestein und der Standort müssen zudem Eigenschaften aufweisen, die neben den o. a. geologischen Mindestanforderungen die radiologischen Schutzziele der IAEA und der ICRP erfüllen.

Beim Untersuchungsprogramm zur regionalen Charakterisierung des Boom Clay (1990-2003) wurden zusätzlich zu den o. a. Mindestanforderungen folgenden Kriterien gefordert:

- Ausreichend Raum für ein Endlager zwischen 200 m und 300 m Tiefe (Mitte Tonformation).
- Mindestens 60 m Mächtigkeit des Tonsteins.
- Hohe Homogenität des Tonsteins innerhalb dieser 60 m.

4.3.2 Ableitung möglicher Kriterien für ein zukünftiges Auswahlverfahren

Aus den bisher in Belgien durchgeführten Untersuchungsprogrammen lassen sich aus den wissenschaftlichen Untersuchungen und aus den Eigenschaften des Boom Clay weitere Anforderungen ableiten aus denen Vergleichsfaktoren und Abwägungskriterien entwickelt werden können. Das betrifft insbesondere Parameter, die für einen Langzeitsicherheitsnachweis relevant sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in einem zukünftigen Auswahlverfahren und der Festlegung von Kriterien berücksichtigt.

In der zweiten Untersuchungsphase wurden im Rahmen von F&E Projekten in Belgien folgende Fragestellungen untersucht, aus denen Abwägungskriterien für das zukünftige Verfahren abgeleitet werden können:

- Identifizierung und Charakterisierung von Störungszonen und der lithologischen Heterogenität des Boom Clay und die Untersuchung ihres Einflusses auf die Migration von Radionukliden.

- Thermo-hydraulisch-mechanisches Verhalten des Boom Clay.
- Hydrogeologische Untersuchungen der regionalen und lokalen Hydrogeologie im Boom Clay und Modellberechnungen.
- Seismische Aktivität.
- Radiochemische Charakterisierung des Wirtsgesteins.
- In-situ-Tests im HADES URL (z. B. "PRACLAY").
- Erste Charakterisierung des Ypresian Clay nahe der Doel Nuklear Zone als Wirtsgesteinsalternative.

Im Safir-2-Bericht (ONDRAF/NIRAS 2001a, 2001b) wurden die Untersuchungsergebnisse bis 2000 zusammengefasst.

Weitere Untersuchungen, insbesondere in der aktuellen 3. Phase (ab 2003), betreffen die spezifischen Eigenschaften des Boom Clay, die radioaktiven Abfälle und ihre Konditionierung, das Endlagerkonzept, die Wechselwirkung zwischen Endlager und Wirtsgestein sowie Langzeitsicherheitsuntersuchungen.

Im "Waste Plan" (ONDRAF/NIRAS 2011) werden die wesentlichen geologischen Barriereigenschaften des Boom Clay zusammengefasst, die auch als allgemeine Anforderungen gelten können:

- Sehr gute natürliche Barriere für die Migration der Radionuklide und chemischer Substanzen.
- Sehr geringe Permeabilität. Keine Wasserbewegung in diesem Ton, dadurch kein Transport von Radionukliden und chemischen Substanzen durch dieses Medium. Nur diffusiver Transport.
- Hohe Retentionskapazität für Radionuklide und chemische Komponenten (Sorptionskapazität und günstige geochemische Eigenschaften).
- Plastizität, dadurch hohe Selbstheilungskapazität.
- Hohe Homogenität.
- Einfache geologische Strukturen.
- Hydrogeologisch, geochemisch und mechanisch langfristig stabil.
- Kein Einfluss durch natürliche Ereignisse (Erdbeben, Meeresspiegelschwankungen, Eiszeiten etc.) auf die Eigenschaften.

4.4 Zusammenfassung

Die halb-verfestigten Tonsteine des Boom Clay und des Ypresian Clay sind die geologischen Formationen in Belgien, die die wesentlichen Eigenschaften für eine natürliche geologische Barriere aufweisen, um die Langzeitsicherheit in einem Endlagersystem (Wirtsgestein-Endlager-Abfall) zu gewährleisten. Die festgestellten Eigenschaften des Boom Clay gelten als Anforderungen für eine zukünftige Standortwahl.

Eine weitere Eingrenzung oder Ergänzung der Anforderungen oder Kriterien erfolgte in Belgien bisher nicht, da der Fokus der F&E-Untersuchungen zunächst auf dem Nachweis der Machbarkeit eines Endlagers im Boom Clay lag. Aus dem vorgelegten Entsorgungskonzept geht hervor, dass in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren eine schrittweise Vorgehensweise geplant ist. Die Rückholbarkeit der hoch radioaktiven Abfälle ist dabei vorgesehen. Die Adaption der Vorgehensweise an EU-Vorgaben oder an das Verfahren in anderen Ländern (z. B. Schweiz) deutet darauf hin, dass in Belgien ein daran angelehntes Verfahren angewandt werden wird.

4.5 Literaturverzeichnis

- EC (1979): European catalogue of geological formations having favourable characteristics for the disposal of solidified high-level and/or long-lived radioactive wastes. 2 – Belgium, Date of compilation 01.01.1978.
- EC (1989): Objectives, standards and criteria for radioactive waste disposal in the European Community. – Euradwaste series No. 1, EUR 12570 EN.
- EC (1992): EC. Radioactive waste disposal: recommended criteria for siting a repository. Euradwaste series No 6, EUR 14598 EN, 1992, Paris : EU (Commission of the European Communities).
- EU (2011): Richtlinie 2011/70/EURATOM des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle; Amtsblatt der Europäischen Union.
- IAEA (1977): Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations. – Technical Report Series: 64 S.; Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1981): Underground Disposal of Radioactive Wastes. – Safety Series No. 54; Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1983): Criteria for underground disposal of solid radioactive wastes. – Safety Series No. 60: 60 S.; Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1989): Safety Principles and Technical Criteria for the Underground Disposal of High Level Radioactive Wastes. –: 28 S.; Internat. Atomic Energy Agency, Wien.
- IAEA (1994): Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide. – IAEA Safety Series No. 111-G-4.1: 48 S.; International Atomic Energy Agency Wien.
- IAEA (2006): Geological Disposal of Radioactive Waste. – Safety Requirements WS-R-4: 49 S.; International Atomic Energy Agency (IAEA), OECD-Nuclear Energy Agency, Wien.
- ONDRAF/NIRAS (2001a): SAFIR 2 - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. – NIROND, 2001/06 E: 570 S.; Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, Belgium.

ONDRAF/NIRAS (2001b): Technical overview of the SAFIR 2 report - Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2. – NIROND: 269 S.; Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, Belgium.

ONDRAF/NIRAS (2007): Description of the evaporitic rocks of Belgium. – NIROND, 2007-1403: 10 S.; Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, Belgium.

ONDRAF/NIRAS (2010): Assessment of the schistes as potential host formations for high-level and/or long-lived radioactive waste disposal in Belgium. – NIROND, 2010-0898: 90 S.; Belgian agency for radioactive waste and enriched fissile materials, Belgium.

ONDRAF/NIRAS (2011): Waste Plan for the long-term management of conditioned high-level and/or long-lived radioactive waste and overview of related issues. – NIROND 2011-02 E: 224 S.; Belgium.

5 USA

5.1 *Historie der Standortauswahl der WIPP-Site*

Ende der 1940er Jahre übernahm das U. S. Federal Gouvernement die Verantwortung für die Überwachung und Entsorgung von hoch radioaktiven Abfällen aus der militärischen und zivilen Nutzung der Kernenergie. Die U.S. Atomic Energy Commission (AEC), Vorgänger des U. S. Department of Energy (DOE), initiierte daraufhin entsprechende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten. 1955 wurde auf Antrag der AEC die National Academy of Sciences – National Research Council (NAS-NRC) gegründet - mit der Aufgabe, Möglichkeiten und Eignung von geologischen Formationen für die Endlagerung von radioaktiven Stoffen aus der militärischen und zivilen Nutzung der Kernenergie in den USA zu untersuchen (EPA 1996a). In dem vorgelegten Bericht (NAS 1957), der auf verschiedenen Vorstudien basiert, wurde dokumentiert, dass verschiedene Möglichkeiten und Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht wurden. Die NAS empfahl in ihrem Bericht, die Endlagerung in Salzformationen weiter zu untersuchen, da dies als die erfolgversprechendste Option erachtet wurde. Als Begründung dafür wurden die vorteilhaften Eigenschaften von Steinsalz genannt, detaillierte Angaben dazu sind NAS (1957) zu entnehmen. Von 1957 bis 1961 wurde daher in den USA ein landesweites Screening zur Ausweisung von potenziell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeigneten Steinsalzlagerstätten durchgeführt (PIERCE & RICH 1962, GERVERS 1993). Im Ergebnis dieser Studien wurden vier Regionen für eine detaillierte Analyse ihrer Eignung als Endlagerstandort benannt (KEHNEMUYI & MATTHEWS 1980):

- Salzstöcke aus mittel-jurassischen Salzformationen (Alter: ca. 170 Mio. Jahre) am Golf von Mexico in Texas, Louisiana und Mississippi,
- flach lagernde karbonische Salze (Alter: ca. 320 Mio. Jahre) im Paradox-Becken in Utah,
- flach lagernde permische Salze (Alter: ca. 250 Mio. Jahre) im Permian-Salt-Basin in Kansas, Oklahoma, Texas, Colorado, Arizona und New Mexico,
- flach lagernde silurische Salze (Alter: ca. 430 Mio. Jahre) im Salina-Becken in Michigan, Ohio, Pennsylvania und New York.

Dabei wurden die permischen, etwa 250 Mio. Jahre alten Salzlagerstätten als besonders geeignet bewertet. Gemäß KEHNEMUYI & MATTHEWS (1980) lagen zur Auswahl konkreter potenziell geeigneter Standorte in den o. g. Regionen geologische, hydrologische, ökologische und sozioökonomische Kriterien vor. Übergeordnetes Ziel bei Anwendung dieser Kriterien war: bei der Auswahl eines Standortes für ein Endlager ist zu gewähr-

leisten, dass alle Aspekte zum Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Bevölkerung und zukünftiger Generationen beachtet werden und dass es keine Beeinträchtigungen der Umwelt gibt.

Für den ersten Screening-Prozess waren demnach folgende geologische Kriterien zur Standortauswahl zu betrachten:

- Der Salzspiegel soll in einer Teufe liegen, die nicht von übertägigen Prozessen oder Ereignissen erreicht werden. Gletscheraktivitäten und Meteoriteneinschläge werden als mögliche Ursachen für eine potenzielle Freilegung der Salzformation genannt.
- Die Salzformation soll Abmessungen aufweisen, die für das Endlager und eine angemessene Schutzzone ausreichen.
- Die Salzformation soll eine ausreichende Mächtigkeit aufweisen, damit ober- und unterhalb des Endlagers eine angemessene Schutzzone aus Steinsalz gewährleistet ist.

Als weitere Faktoren waren die tektonische Stabilität, die regionale seismische Aktivität, die regionale Hydrologie sowie der strukturelle Aufbau der Salzformation und der umgebenden Gebirgsschichten zu berücksichtigen. Die nichtgeologischen Standortauswahlkriterien sind in KEHNEMUYI & MATTHEWS (1980) dokumentiert. So werden z. B. rechtliche Einschränkungen benannt, die keine andere Nutzung des Landes erlauben und Ausschlusskriterien darstellen. Dies sind z. B. das Wilderness Act von 1964 oder das Wild and Scenic River Act von 1968. Zudem sind in KEHNEMUYI & MATTHEWS (1980) Landbereiche benannt, die als Ausschlusskriterien betrachtet werden sollten, z. B. Stadtgebiete, Indianerreservate, Überschwemmungsgebiete, Gebiete mit Rohstoffvorkommen, schwer zugängliche Gebiete, zerklüftete Topographien mit großen Höhenunterschieden.

Von 1957 bis in die frühen 1970er Jahre wurden vom Oak Ridge National Laboratory (ORNL) Forschungsarbeiten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Steinsalzformationen durchgeführt. Die Untersuchungen umfassten auch In-situ-Untersuchungen (Project Salt Vault) zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem außer Betrieb gegangenen Salzbergwerk, das in einer permischen, etwa 250 Mio. Jahre alten Salzlagerstätte in Lyons, Kansas, liegt (HOWARD et al. 2000, EPA 1996a). 1970 gab die AEC Lyons als potenziellen Standort für den Bau des geplanten Endlagers bekannt (EPA 1996a). Erkenntnisse aus vertieften Standortuntersuchungen und politischer Widerstand führten aber 1972 zur Aufgabe des Standortes (LYNCH et al. 1991, EPA 1996a).

ORNL und der U. S. Geological Survey (USGS) führten daraufhin eine landesweite Suche nach einem geeigneten Standort in permischen Salzlagerstätten durch. 1973 wurden vier potenziell geeignete Salzformationen (im Perm) in New Mexico benannt, die als

eignungshöflich bewertet wurden (LYNCH et al. 1991, MORA 1999). Aus diesen vier Salzformationen wurde letztlich die in der Chihuahua-Wüste gelegene Salzformation in New Mexico, ca. 50 km östlich von Carlsbad als potenziell geeigneter Standort für die WIPP (Waste Isolation Pilot Plant) ausgewählt. Der Standort befindet sich am nördlichen Rand des Delaware-Beckens.

Über den Entscheidungsprozess für die genannte Salzformation gibt es in der Literatur folgende Darstellungen:

- Gemäß MORA (1999) hatte die genannte Salzformation noch vor einer Bewertung hinsichtlich der geologischen Eignung größere Aufmerksamkeit erfahren, die auf staatliche und lokale Interessensbekundungen zurückzuführen war. Als bei den Verantwortlichen der Stadt Carlsbad bekannt wurde, dass Lyons, Kansas, als möglicher Standort für ein Endlager verworfen wurde, schlugen sie dem AEC vor, ein stillgelegtes Kalibergwerk östlich der Stadt Carlsbad als Endlagerstandort zu betrachten. Dieser Vorschlag ist in DOE (2000) näher erläutert: die damalige Konjunkturschwäche, die durch den Rückgang des Kaliabbaus verursacht wurde, hatte der Stadt Carlsbad wirtschaftliche Probleme bereitet. Als sich die Möglichkeit für ein großes, neues staatliches Projekt abzeichnete, engagierte sich Carlsbad intensiv für die WIPP-Site. Grundsätzlich hatte die AEC nur staatliche Flächen in Betracht gezogen, um ein Endlager in tiefen Salzformationen zu erstellen. Ein altes Salzgewinnungsbergwerk sollte nicht als Endlagerstandort ausgewählt werden. Nach detaillierten Untersuchungen von vier Standorten in New Mexiko beauftragte die AEC 1973 das U. S. Army Corps of Engineers, eine Studie über das Gebiet „Los Medanos“ östlich von Carlsbad zu erstellen. Auf Grundlage des Berichts des U. S. Army Corps of Engineers entschied die AEC 1974, in „Los Medanos“ Erkundungsarbeiten durchzuführen (LYNCH et al. 1991, MORA 1999). 1975 wurde Sandia National Laboratories (SNL) von der Energy Research and Development Agency (ERDA), die seit 1975 Nachfolger der AEC war und 1977 durch die DOE abgelöst wurde, beauftragt, die wissenschaftlichen Untersuchungen zur Charakterisierung der permischen Salado-Formation „Los Medanos“ für das geplante Endlager durchzuführen (MORA 1999). Im gleichen Jahr stellte SNL anhand der Erkundungsbohrung ERDA-6 jedoch fest, dass nicht wie erwartet leicht geneigte Salzsichten, sondern steiler einfallende Salzsichten anstehen. Zu diesem Zeitpunkt wurde zudem in Betracht gezogen, ein Endlager mit zwei Sohlen, die ca. 150 m vertikalen Abstand aufweisen sollten, zu errichten. Nach Vorgabe der ERDA sollten auf der oberen Sohle transuranische Abfälle eingelagert werden, die untere Sohle sollte für die Einlagerung von Brennelementen und hoch radioaktiven Abfällen vorgesehen werden. Die steil einfallenden, nahezu vertikal angeordneten Salzsichten standen nach MORA (1999) gerade in der

Teufe der vorgesehenen unteren Sohle an. Zudem wurde neben den unerwarteten geologischen Eigenschaften beim Bohren der ERDA-6 in ca. 825 m Teufe ein Gasvorkommen aus Schwefelwasserstoff angetroffen. Aufgrund dieser Befunde wurde der Standort verworfen. Gemäß MORA (1999) wurde entschieden, dass SNL und USGS unabhängig voneinander Standortbewertungen für sieben weitere Regionen durchführen sollten, für die in Screening-Studien günstige Eigenschaften festgestellt wurden.

In GRISWOLD (1977) ist beschrieben, dass USGS 1975 weitere potenzielle Standorte empfohlen hat. Nachdem die Standortauswahlkriterien präzisiert wurden, wurde „Los Medanos“ als der am besten geeignete Standort ausgewählt, um dort weitere Erkundungsarbeiten durchzuführen. Folgende Kriterien wurden gemäß GRISWOLD (1977) angewendet:

- Ein Abstand von mindestens 3,2 km von Gas- und Ölbohrungen. Diese 3,2 km wurden später auf Grundlage von Untersuchungen zum Lösungsverhalten, die für ORNL durchgeführt wurden, auf 1,6 km reduziert.
- Eine Salzformation von hoher Reinheit in einer Teufe von mindestens 300 m und höchstens ca. 1000 m.
- Keine erkennbaren mineralischen Rohstoffvorkommen.
- Vermeidung von bekannten Gas- und Ölvorkommen.
- Vermeidung von bekannten Kalieinschlüssen.
- Eine ausreichend große Region für mögliche Deformationen des Salinars und ausreichende Entfernung zum „Capitan Reef“.
- Einhaltung eines Mindestabstandes von 1,6 km zu Erosionsbereichen der Salado-Formation.
- Geringe Gebiete, die sich in Privatbesitz befinden.
- Vermeidung von Gebieten mit vorhandenen Abbaugenehmigungen für Kalisalze.
- Vermeidung von Antiklinalstrukturen.

Nach Anwendung dieser Kriterien verblieben zwei mögliche Standorte in New Mexico. Davon war die eine Variante der bereits genannte neue Standort. Die Gründe für die Entscheidung für „Los Medanos“ sind in GRISWOLD (1977) dargestellt: Seismische Untersuchungen hatten ergeben, dass „Los Medanos“ in einer Synklinalstruktur liegt, das für Gas- und Ölgewinnung ungünstig ist. In Synklinalen ist zudem die

Wahrscheinlichkeit, dass es unter Druck stehende Lösungsvorkommen gibt, geringer. Die zweite Variante liegt in der Nähe größerer Ölfelder.

1976 wurde die Erkundungsbohrung ERDA-9 gebohrt, die ca. 11 km süd/südwestlich der Bohrung ERDA-6 liegt und das Kriterium erfüllte, mindestens 3,2 km von Gas- und Ölbohrungen entfernt zu sein. Die Ergebnisse der Erkundungsbohrung waren positiv, so dass dieses Gebiet, das weiter im Inneren des Delaware-Beckens liegt, als möglicher Standort für die WIPP-Site ausgewählt wurde. Daraufhin erfolgten weitere Erkundungsarbeiten zur Charakterisierung der permischen Salado-Formation „Los Medanos“ (MORA 1999).

- In der Beschreibung von HILL (1980) gab es zunächst vorläufige, allgemeine Kriterien zur Standortauswahl, da die meisten Regionen für die Anwendung präziser Kriterien nicht ausreichend erkundet waren. Nachdem durch die Erkundungsarbeiten von Sandia (Bohrung ERDA-6) der zunächst geplante Standort für WIPP in New Mexico verworfen wurde, wurden Auswahlkriterien und Faktoren mit Blick und Anwendung für das Delaware-Becken weiterentwickelt. HILL (1980) beschreibt, dass die Erfüllung dieser Faktoren zwar wünschenswert war, jedoch keine Voraussetzung für die Sicherheit eines Endlagers an diesem Standort darstellte. Dazu wurden weitergehende, detaillierte Standortuntersuchungen durchgeführt. Die nachfolgenden geowissenschaftlichen Kriterien und Faktoren wurden für die WIPP-Standortauswahl berücksichtigt:
 - Geologisches Kriterium: Die Geologie des Standortes sollte derart sein, dass die Sicherheit des Endlagers nicht durch natürliche Phänomene beeinträchtigt wird, solange die radioaktiven Abfälle eine Gefahr für die Bevölkerung sein könnten. Zudem muss die Geologie den sicheren Betrieb der WIPP ermöglichen.
In dem Zusammenhang werden folgende geologische Faktoren genannt (detaillierte Beschreibungen der Faktoren sind HILL (1980) zu entnehmen):
 - Topologie
 - Teufe
 - Mächtigkeit
 - Laterale Ausdehnung
 - Lithologie
 - Stratigraphie
 - Geologischer Aufbau

- Erosion
- Lösungsverhalten
- Senkungen

- Hydrologisches Kriterium: Die Hydrologie des Standortes muss eine hohe Wahrscheinlichkeit bieten, dass natürliche Lösungsvorgänge die Sicherheit des Endlagers nicht beeinträchtigen, solange die radioaktiven Abfälle eine Gefahr für die Bevölkerung sein könnten. Zufälliges menschliches Eindringen darf nach HILL (1980) nicht zu „übermäßigen“ Gefahren für die Bevölkerung führen.
In dem Zusammenhang werden folgende hydrologische Faktoren genannt (detaillierte Beschreibungen der Faktoren sind HILL (1980) zu entnehmen):
 - Oberflächenwasser
 - Grundwasserleiter
 - Hydrologische Wegsamkeiten
 - Klimaschwankungen
 - Menschliche Einwirkungen

- Kriterium der tektonischen Stabilität: Natürliche tektonische Prozesse dürfen nicht zu einer Beeinträchtigung des Standortes führen, solange die radioaktiven Abfälle eine Gefahr für die Bevölkerung sein könnten. Zudem dürfen die natürlichen tektonischen Prozesse keine besonderen Vorsorgemaßnahmen während des Betriebs des Endlagers erfordern.
In dem Zusammenhang werden folgende Faktoren genannt (detaillierte Beschreibungen der Faktoren sind HILL (1980) zu entnehmen):
 - Seismische Aktivität
 - Verwerfungen / Rissbildungen
 - Fließverhalten des Salzes / Antiklinalen
 - Diapirismus
 - Stabilität der Region
 - Vulkanismus
 - Geothermischer Gradient

- Kriterium der physikalisch-chemischen Verträglichkeit: Das Wirtsgestein, in dem das Endlager errichtet wird, und die radioaktiven Abfälle dürfen sich nicht in einer Art und Weise gegenseitig beeinflussen, die nicht akzeptable Risiken für den Betrieb oder die Langzeitsicherheit darstellen.
In diesem Zusammenhang werden folgende Faktoren genannt (detaillierte Beschreibungen der Faktoren sind HILL (1980) zu entnehmen):
 - Wassergehalt
 - Thermische Eigenschaften
 - Mechanische Eigenschaften
 - Chemische Eigenschaften / Mineralogie
 - Strahlungseinflüsse
 - Permeabilität
 - Nuklidmobilität

Neben den geowissenschaftlichen Kriterien und Faktoren ist in HILL (1980) auch ein Kriterium der ökonomischen und sozialen Verträglichkeit mit entsprechenden Faktoren beschrieben.

HILL (1980) schreibt weiterhin, dass nach Anwendung der genannten Kriterien und Faktoren zwei potenziell geeignete Standorte in New Mexico verblieben. Davon war die eine Variante der in MORA (1999) dokumentierte neue Standort in der permischen Salado-Formation „Los Medanos“. Dieser Standort wurde als am besten geeigneter Standort bewertet. Als Nachteile der zweiten Variante wurden genannt, dass die Ausmaße der Salzformation geringer sind, die geologischen Gegebenheiten schlechter sind und sich in der Nähe größere Ölfelder befinden. SNL wählte schließlich 1975 „Los Medanos“ als potenziellen Standort für die WIPP-Site aus und führte weitergehende Erkundungsarbeiten zur Charakterisierung der permischen Salado-Formation „Los Medanos“ durch.

1977 hatte SNL einen Konzeptentwurf für die WIPP-Site mit zwei Sohlen erstellt (RECHARD 1998). Die Überlegung, die WIPP-Site auch für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen zu nutzen, führte zu Kritik und Widerstand in der Öffentlichkeit und z.T. auch bei den offiziellen Vertretern des Staates New Mexico. Daraufhin gründete der Staat New Mexico 1978 die Environmental Evaluation Group (EEG), die als unabhängige Institution prüfen sollte, ob die öffentlichen Interessen in Bezug auf die Gesundheit und die Umwelt eingehalten werden (MORA 1999, DOE 2000). Des Weiteren wurde New Mexico ein Vetorecht über die WIPP-Site versprochen. Ende 1979 genehmigte der U. S. Kongress die WIPP-Site an dem Standort „Los Medanos“ per Gesetz als Forschungs-

und Entwicklungseinrichtung (Public Law 96-164), mit dem Ziel die sichere Einlagerung radioaktiver Abfälle, die aus der militärischen Nutzung der Kernenergie stammen, nachzuweisen (RECHARD 1998, MORA 1999, HOWARD 2000). Daher wurden für die WIPP-Site per Gesetz jegliche Genehmigungen durch die U.S. Nuclear Regulatory Commission, die für Genehmigungsprozesse mit radioaktiven Abfällen aus der zivilen Nutzung zuständig ist, ausgeschlossen. Durch das Gesetz wurde die Grundlage für die Zusammenarbeits- und Kooperationsvereinbarung zwischen der DOE und dem Staat New Mexico geschaffen, die 1981 abgeschlossen wurde (HOWARD 2000). 1985 erließ die U. S. Environmental Protection Agency (EPA) Vorschriften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mit ausdrücklicher Geltung nur für transuranische Abfälle und die WIPP. DOE und der Staat New Mexiko stimmten zu, dass die WIPP diesen Regularien genügen muss (DOE 2007). 1992 verabschiedete der Kongress den WIPP Land Withdrawal Act, mit dem DOE ein ca. 41 km² großes Gelände für die Errichtung des Endlagers zugeteilt wurde. Mit dem Gesetz wurde die EPA als Genehmigungsbehörde für die WIPP-Site benannt und die Einlagerung von hoch radioaktiven Abfällen und Brennelementen verboten (DOE 2000). 1993 wurden die neuen Regelungen der EPA fertig gestellt und traten 1996 in Kraft (WIPP Compliance Criteria, 40 CFR Part 191 and 194). Im gleichen Jahr stellte das DOE bei der EPA den Antrag auf Zertifizierung. 1998 wurde die WIPP nach Prüfung der Unterlagen erstmals zertifiziert (DOE 2000).

5.2 Bewertung von Salzformationen in den USA

1978 wurde eine Studie für das DOE erstellt (JOHNSON & GONZALES 1978), in der das umfangreiche Wissen über die Verteilung und die Geologie der Salzformationen in den USA zusammengestellt wurde. Zudem wurden für jede Salzlagerstätte die regionalen geologischen Eigenschaften im Hinblick auf eine mögliche Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle erörtert. Es wurden acht Eigenschaften von Salzlagerstätten benannt, aufgrund derer Salzformationen als besonders geeignet für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle bewertet wurden:

- Viele Salzformationen sind über viele Millionen Jahre ungestört und ohne Lösungsvorgänge, was die langfristige Integrität und den Widerstand gegen hydrologische Prozesse belegt.
- Salz weist eine hohe thermische Wärmeleitfähigkeit auf und kann damit große Wärmemengen abführen.
- Aufgrund des natürlichen viskosen Materialverhaltens von Steinsalz ist Verheilung von Rissen im Salz gegeben. Dadurch werden auch Wegsamkeiten für Lösungen entlang von Schwächezonen verhindert.

- Geringe radiolytische Veränderungen im Steinsalz durch radioaktive Belastung.
- Steinsalz ist hinsichtlich seiner Festigkeit und dem Verhalten zur Abschirmung von Gammastrahlen vergleichbar zu Beton.
- Salzformationen sind in den USA mit ausreichender Mächtigkeit und in ausreichender Teufe weit verbreitet. Die Vorkommen liegen in Gebieten mit geringen seismischen und tektonischen Aktivitäten.
- Salzformationen liegen in den USA in ausreichendem Umfang vor, so dass keine Einschränkungen für die Salzgewinnung zu erwarten sind. Zudem kann ein Endlagerstandort in ausreichender Entfernung zu existierenden Bergwerken gewählt werden.
- Die Auffahrungsarbeiten im Steinsalz sind einfach zu tätigen, die Technik ist gut entwickelt und die entstehenden Kosten sind vergleichsweise günstig. Untertägige Hohlräume im Steinsalz sind über lange Zeit standsicher.

Es wird darauf hingewiesen, dass aufgrund der Komplexität geologischer Formationen jeder potenzielle Standort einzeln betrachtet und bewertet werden muss. In der Studie wird die Bedeutung der einzelnen geologischen Eigenschaften, die in einem Bericht der International Atomic Energy Agency (IAEA 1977) über geologische Kriterien zur Standortauswahl für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geologischen Formationen dargestellt sind, diskutiert. Die wesentlichen geologischen Eigenschaften, die zur Bewertung einer Salzlagerstätte betrachtet wurden, sind: Mächtigkeit, Teufe, laterale Kontinuität, Homogenität, Ablaugung des Flözes, geologische Struktur, Hydrologie, seismische Aktivität der Region. Als weitere Aspekte werden u. a. die angrenzenden geologischen Formationen, potenzielles gegenwärtiges oder zukünftiges Interesse an anstehenden Mineralrohstoffen und die Lokationen von Bohrungen genannt. Detaillierte und vollständige Darstellungen sind JOHNSON & GONZALES (1978) zu entnehmen.

Im März 1978 forderte das DOE das National Research Council (NRC) auf, ein Review über die wissenschaftlichen und technischen Kriterien und Richtlinien, die für die Planung, den Bau und den Betrieb der WIPP aufgestellt wurden, zu erstellen (NRC 1984). NRC übertrug dieses Review dem „Committee on Radioactive Waste Management“. Der Reviewbericht wurde zudem von unabhängigen Experten geprüft. Zu dem Zeitpunkt, als das Reviewverfahren begonnen wurde, war die WIPP als Endlager für transurani-sche Abfälle in der permischen Salado-Formation „Los Medanos“ vorgesehen. Auch die Möglichkeit, die Wechselwirkung von hoch radioaktiven Abfällen mit dem Wirtsgestein zu untersuchen, war zu dem Zeitpunkt eine Option für die WIPP. Gemäß dem Reviewbericht (NRC 1984) sind die Kriterien, die zur Standortauswahl für die WIPP angewendet wurden, sowohl mit den Kriterien vergleichbar, die häufig in Unterlagen für die Abfall-

entsorgung in flach lagernden Salzformationen genannt werden (NRC 1970), als auch mit den geologischen Kriterien, die für Endlager in geologischen Formationen definiert wurden (NRC 1978). Sie umfassen im Wesentlichen folgende Aspekte:

- eine Salzformation (Halite) mit mindestens 60 m Mächtigkeit und von ausreichender Reinheit,
- eine Teufe von mehr als 300 m, aber weniger als 1000 m,
- nahezu horizontal verlaufende Salzsichten,
- geringe Anzeichen vergangener tektonischer oder vulkanischer Aktivitäten,
- ausreichender Abstand von wasserführenden Schichten,
- ein Gebiet, in dem keine Rohstoffförderung stattgefunden hat und das nur geringe wirtschaftliche Ressourcen aufweist.

Zudem wurden für die Region bei Carlsbad zwei zusätzliche Kriterien benannt: das Endlager sollte mindestens 1,6 km von der nächsten Bohrung in die Salzformation und mindestens 8 km von dem „Capitan Reef“ entfernt sein. Gemäß dem Reviewbericht wurden die geologischen Kriterien für die Standortauswahl erfüllt und dargelegt, dass zudem ausreichend viele Untersuchungsdaten vorlagen, die belegen, dass kaum nennenswerte Risiken für die Errichtung der WIPP an dem vorgeschlagenen Standort bestünden. In dem Reviewbericht wurde zudem empfohlen, einige Fragestellungen noch weiterführend zu untersuchen, bevor mit der Einlagerung transuranischer Abfälle begonnen wird. Dazu gehörten hydrologische Fragestellungen und Aspekte, die die Planung des Endlagers betreffen. Des Weiteren wurde empfohlen, dass dem DOE das Recht übertragen werden sollte, die Rohstoffförderung in der Salzformation und die Kohlenwasserstoffgewinnung unterhalb der Salzformation zu untersagen, falls nicht belegt werden kann, dass keine Gefährdung für das Endlager daraus resultiert. Weitere detailliertere Angaben sind NRC (1978) zu entnehmen.

5.3 Regelungen für eine Rückholung der Abfälle aus der WIPP-Site

In der Richtlinie 40 CFR Part 194 (EPA 1996a) sind die Kriterien festgelegt, die EPA speziell für die Überprüfung der Einhaltung der Richtlinie 40 CFR Part 191 anwendet. Für den Fall, dass die Zertifizierung, die von EPA alle 5 Jahre bis zum Verschluss des Endlagers zu begutachten ist und bei positivem Ergebnis erneuert wird, entzogen wird, sind die zu diesem Zeitpunkt eingelagerten Abfälle so schnell und weitgehend wie möglich zurückzuholen. Die Richtlinie 40 CFR Part 194 legt zudem fest, dass die Rückholung von radioaktiven Abfällen über einen angemessenen Zeitraum nach der Einlagerung

möglich sein muss. Die DOE hat die Machbarkeit einer Rückholung für einen angemessenen Zeitraum nach Einlagerung zu beurteilen.

5.4 Studie über geologische Kriterien zur Standortauswahl

1978 wurde eine Studie erstellt, die sich mit der Entwicklung von geologischen Kriterien für die Standortsuche für HAW-Endlager befasst. Diese Studie wurde von unabhängigen Experten geprüft und vom NAS-NRC genehmigt (NAS 1978). Neben den geologischen Kriterien sind auch geoökologische Kriterien Bestandteil dieser Studie. Folgende geologischen Kriterien sind in NAS (1978) aufgeführt:

- Kriterien zur Geometrie, Dimension und Eigenschaften der Salzformation
- Kriterien der Langzeitstabilität
- Hydrologische Kriterien
- Geochemische Kriterien

Detaillierte Beschreibungen der Kriterien sind NAS (1978) zu entnehmen.

5.5 Untersuchung alternativer Entsorgungsoptionen

Von 1973 bis 1987 wurde als alternative Entsorgungsoption auch die Endlagerung im Meeresboden untersucht. Gemäß LYNCH et al. (1991) entschied DOE, die Untersuchung dieser Entsorgungsoption nicht fortzuführen. In JOHNSON & GONZALES (1978) wird erwähnt, dass zudem weitere alternative Entsorgungsoptionen, z. B. Endlagerung in Tiefseeebenen oder unter dem Eisschild der Antarktis, untersucht wurden.

5.6 Nuclear Waste Policy Act der USA von 1982

1982 wurde das Nuclear Waste Policy Act (NWPA) in den USA verabschiedet. In dem Gesetz sind Maßnahmen und ein Zeitplan vorgeschrieben, um ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle und Brennelemente in geologischen Formationen zu errichten (STEIN 1986). Das Programm für ein geologisches Endlager sah fünf Phasen vor, um bis zum Jahr 1998 die Genehmigung zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in einer geologischen Formation erteilt zu bekommen, Details sind STEIN (1986) zu entnehmen:

- Empfehlung von Standorten für die Erkundung
- Erkundung von Standorten

- Auswahl und Bewilligung eines Standortes für die Einrichtung eines Endlagers
- Genehmigungsverfahren für den ausgewählten Standort
- Bau des Endlagers und fortlaufende Prüfung des Betriebs

Das NWPA (DOE 2004a) sah vor, dass als einer der ersten Schritte, Richtlinien für die Standortauswahl zu erstellen waren. Dazu wurden folgende Vorgaben gemacht:

- Angabe von detaillierten geologischen Anforderungen, um erste Kriterien für die Auswahl von potenziellen Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zu definieren.
- Diese Kriterien sollen Faktoren definieren, die einen Standort entweder für die weitere Standortauswahl als ein Endlager qualifizieren oder zum Ausschluss eines Standortes führen. Dabei sollten u. a. auch standortabhängige Aspekte möglicher Rohstoffvorkommen, der Hydrologie, Geophysik, seismischer Aktivitäten, Abstand zu Wasservorkommen, Abstand zur Bevölkerung, Auswirkungen auf andere nationale Schutzgebiete (z. B. National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) berücksichtigt werden.
- Berücksichtigung der Entfernung zu Kernkraftwerken und Zwischenlagern im Hinblick auf die Sicherheitsaspekte für den Transport der Abfälle.
- Folgende Kriterien gelten als Ausschlusskriterium für einen Standort, wenn für übertägige Anlagen folgende Randbedingungen vorliegen:
 - Standort in Ballungsräumen
 - In einem Radius von 1,6 km liegt eine Region mit mindestens 1.000 Einwohnern.

Des Weiteren sind die Kosten und mögliche Gefährdungen von Transportwegen zu dem Endlager zu berücksichtigen. Es sind nach DOE (2004a) unterschiedliche Wirtsgesteine zu betrachten. Detailliertere Angaben sind DOE (2004a) zu entnehmen.

Zudem sind in DOE (2004a) folgende ergänzenden Kriterien festgelegt: Bei der Erkundung oder Auswahl eines potenziellen Endlagerstandortes im Kristallin sind folgende Ausschlusskriterien zu beachten:

- Saisonbedingter Anstieg der Bevölkerung
- Abstand zur öffentlichen Wasserversorgung, auch mit Hinblick auf die Versorgung für Ballungsräume

- Auswirkungen, den eine Standorterkundung oder –auswahl auf die Landbesitze von Indianerstämmen haben würde.

5.7 Standortkriterien der NRC-Richtlinie 10 CFR 60

Die Standortkriterien in § 60.122 der NRC-Richtlinien (NRC 2014), die 1983 veröffentlicht wurden und 1996 in einer überarbeiteten Fassung erschienen, sind im Wesentlichen geologischer und hydrogeologischer Art. Sie unterscheiden zwischen günstigen Bedingungen, die im geologischen Gesamtsystem möglichst gegeben sein sollten, sowie potenziell nachteiligen Bedingungen, die möglichst nicht vorhanden sein sollten (BORK et al. 2001). Im Zusammenhang mit den technischen Barrieren kann im geologischen Gesamtsystem aber auch eine potenziell nachteilige Bedingung zulässig sein, wenn in Untersuchungen nachgewiesen wird, dass sie keinen signifikanten Einfluss auf die Sicherheit des Gesamtendlagersystems hat.

5.7.1 Günstige Bedingungen

Als günstige Bedingungen, die im geologischen Gesamtsystem möglichst gegeben sein sollten, werden genannt:

- Art, Dauer und Intensität der quartären tektonischen, hydrogeologischen, geochemischen und geomorphologischen Prozesse (oder einer dieser Prozesse), die am Standort wirksam waren, sollten derart gewesen sein, dass - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall zu isolieren, nicht beeinträchtigt oder durch o.g. Prozesse sogar verbessert wird.
- Bei Lagerung in der gesättigten Zone sollten als hydrogeologische Bedingungen vorliegen:
 - Geringe horizontale und vertikale Permeabilität des Wirtsgesteins.
 - Abwärts gerichteter oder überwiegend horizontaler hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und in den unmittelbar benachbarten hydrogeologischen Einheiten.
 - Geringe vertikale Permeabilität und niedriger hydraulischer Gradient zwischen Wirtsgestein und den benachbarten hydrogeologischen Einheiten.
- Geochemische Bedingungen, welche
 - die Fällung oder Sorption der Radionuklide fördern,

- die Bildung von Partikeln, Kolloiden, anorganischen oder organischen Komplexen verhindern, welche die Mobilität der Radionuklide erhöhen oder
- den Transport von Radionukliden durch diese Partikel, Kolloide und Komplexe verhindern.
- Mineralparagenesen, die unter den thermischen Bedingungen der Einlagerung unverändert bleiben oder sich so ändern, dass sie die gleiche oder eine erhöhte Fähigkeit haben, die Ausbreitung der Radionuklide zu verhindern.
- Standortbedingungen, die Einlagerungstiefen von mindestens 300 m zulassen.
- Eine geringe Bevölkerungsdichte in der Umgebung und ein nach Verschluss kontrolliertes Gebiet, das fernab von Bevölkerungszentren liegt.
- Transportzeiten für das Grundwasser entlang des schnellsten Transportweges für Radionuklide von der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung, die von der Einbringung der Abfälle deutlich 1000 Jahre übersteigen.

5.7.2 Möglicherweise ungünstige Bedingungen

Es werden möglicherweise ungünstige Bedingungen angenommen, falls nachfolgende Gegebenheiten für das Kontrollgebiet nach Verschluss (bei Lagerung in gesättigter Zone) charakteristisch sind oder die Isolierung innerhalb des kontrollierten Gebietes beeinträchtigt wird:

- Ein Potenzial für ein Überfluten unterirdischer Anlagen, entweder als Ergebnis einer Veränderung des Wasserzuflusses im Bereich von Niederungen bzw. Gelände-Depressionen oder infolge des Versagens von bestehenden oder geplanten künstlichen Wasserrückhaltungen an der Oberfläche.
- Ein Potenzial für vorhersehbare menschliche Aktivität mit ungünstigen Auswirkungen auf den Grundwasserfluss, wie z. B. Grundwasserentnahme, extrem hohe Bewässerung, Einbringung von Flüssigkeiten unter die Erdoberfläche, Wasserspeicherung durch unterirdisches Einpumpen, militärische Aktivität oder Bau von großen oberirdischen Wasserrückhaltungen.
- Ein Potenzial für natürliche Ereignisse wie Erdbeben, Absenkungen oder vulkanische Aktivität in solchem Ausmaß, dass große Wasserzuströme entstehen könnten, die das regionale Grundwassersystem verändern und sich dadurch ungünstig auf die Funktion des geologischen Lagers auswirken.

- Strukturveränderungen, wie z. B. Hebungen, Senkungen, Faltungen oder Verwerfungen, die sich ungünstig auf das regionale Grundwassersystem auswirken könnten.
- Ein Potenzial für Veränderungen der hydrologischen Bedingungen, die den Radionuklidtransport in die erreichbare Umgebung beeinflussen würden, wie z. B. Änderungen im hydraulischen Gradienten, in der durchschnittlichen Fließgeschwindigkeit von Wässern im geklüfteten Gebirgskörper, der Speicherkoeffizient, der hydraulischen Leitfähigkeit, Änderungen im natürlichen Nachfließen, dem potenziometrischen Niveau und Änderungen der Abflussstellen.
- Ein Potenzial für Veränderungen der hydrologischen Bedingungen aufgrund vorhersehbarer klimatischer Veränderungen.
- Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein, einschließlich chemischer Zusammensetzung, hoher Ionenstärke oder Eh-pH-Bereiche, welche die Löslichkeit oder chemische Reaktionsfähigkeit des technischen Barrierensystems erhöhen können.
- Geochemische Prozesse, die die Sorption der Radionuklide verringern, zu einer Verminderung der Gesteinsstabilität führen oder sich ungünstig auf das technische Barrierensystem auswirken.
- Nicht reduzierende Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein.
- Augenscheinliche Lösungsprozesse, z. B. infolge erhöhter Wasserzutritte im Bereich von Trümmergesteinen (Brekziengänge; „breccia pipes“), das Vorhandensein von Lösungshohlräumen oder Laugennestern.
- Strukturveränderungen wie z. B. Hebungen, Senkungen und Faltungen im Quartär.
- Erdbeben, die in der Vergangenheit stattgefunden haben und die, wenn sie sich wiederholen, erhebliche Auswirkungen auf den Standort haben könnten.
- Auf Korrelationen zwischen Erdbeben und tektonischen Prozessen und Eigenschaften basierende Anzeichen, dass sich entweder die Häufigkeit oder die Stärke von Erdbeben erhöhen könnten.
- Häufigere Erdbeben oder Erdbeben größerer Stärke als es für die Region, in der sich die geologische Struktur befindet, typisch ist.
- Nachweis von vulkanischer Aktivität seit Beginn des Quartärs.
- Nachweis extrem starker Erosion während des Quartärs.

- Auftreten von natürlichen Rohstoffen am Standort, bereits identifiziert oder als Vorkommen zu vermuten, derart, dass
 - die wirtschaftliche Nutzung gegenwärtig oder in absehbarer Zukunft möglich ist, oder
 - solche Materialien einen größeren Brutto- oder Nettowert haben als im Durchschnitt in anderen Regionen ähnlicher Größe, die repräsentativ für die geologische Struktur sind.
- Untertage-Bergbau für Bodenschätze am Standort.
- Bohrungen zu anderen Zwecken am Standort.
- Gesteins- oder Grundwasserbedingungen, die aufwendige technische Maßnahmen bei der Auslegung oder Konstruktion der unterirdischen Anlage oder beim Verschluss von Bohrlöchern oder Schächten erfordern würden.
- Geomechanische Eigenschaften, die keine Konstruktion von unterirdischen Hohlräumen zulassen, die nach dem endgültigen Verschluss stabil bleiben würden.

5.8 Standortkriterien der DOE-Richtlinien 10 CFR 960

Als einer der ersten Schritte nach Verabschiedung des NWPA wurden von dem DOE Standortkriterien entwickelt (DOE-Richtlinien 10 CFR 960; DOE 2001) und diese der NRC zur Zustimmung vorgelegt (G_{NIRK} 1991). Neben Eignungsvoraussetzungen werden dabei günstige und möglicherweise ungünstige Bedingungen, die z. T. über die Anforderungen von EPA und NRC hinausgehen, sowie Ausschlusskriterien formuliert.

5.8.1 Eignungsvoraussetzungen

Unter Bezugnahme auf die Anforderungen der EPA in 40 CFR 191 und die Bedingungen des CFR 10 Part 60 der NRC müssen folgende grundsätzliche Eignungsvoraussetzungen in der Nachbetriebsphase vorliegen:

- Geohydrologie: Die gegenwärtige und zu erwartende geohydrologische Situation eines Standortes soll mit dem sicheren Einschluss und der Isolierung des Abfalls kompatibel sein.
- Geochemie: Die gegenwärtigen und zu erwartenden geochemischen Eigenschaften eines Standortes sollen mit dem sicheren Einschluss und der Isolierung des Abfalls unter Berücksichtigung möglicher chemischer Wechselwirkungen zwischen den

Radionukliden, dem Wirtsgestein und den Grundwasserverhältnissen kompatibel sein.

- Gesteinseigenschaften: Die gegenwärtigen und zu erwartenden Eigenschaften des Einlagerungsbereichs und seiner erreichbaren Umgebung sollen geeignet sein, sich an die thermischen, mechanischen und durch Strahlung hervorgerufenen Beanspruchungen anzupassen, die bei Errichtung, Betrieb und Verschluss sowie den vorhersehbaren Wechselwirkungen zwischen den Abfällen, dem Wirtsgestein, dem Grundwasser und den technischen Barrieren erwartet werden.
- Klimaveränderungen: Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der die zukünftigen klimatischen Bedingungen und die Erosionsprozesse voraussichtlich zu keiner unzulässigen Radionuklidfreisetzung führen.
- Zur Voraussage der wahrscheinlichen klimatischen Bedingungen in der Zukunft wird das DOE die globalen, regionalen und standortspezifischen klimatischen bzw. die tektonischen und geomorphologischen Bedingungen während des Quartärs betrachten.
- Erosion: Der Standort soll erlauben, die Untertage-Einrichtungen in einer solchen Tiefe zu platzieren, dass Erosionsprozesse, die sich auf der Oberfläche auswirken, voraussichtlich zu keiner unerlaubten Radionuklidfreisetzung führen. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit möglicherweise zerstörerischer Erosionsprozesse wird das DOE klimatische, tektonische, und geomorphologische Anzeichen von Erosionsraten und -abläufen der geologischen Struktur während des Quartärs betrachten.
- Lösungsprozesse: Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der subterrane Lösungsprozesse keine unerlaubte Radionuklidfreisetzung bewirken. Zur Ermittlung wahrscheinlicher Lösungsprozesse innerhalb der geologischen Struktur am Standort wird das DOE die bestehenden Lösungsprozesse innerhalb der Struktur, die während des Quartärs entstanden sind, betrachten und auch charakteristische Lösungserscheinungen oder Lösungsmerkmale anderenorts, sofern als in Frage kommend, identifizieren.
- Tektonik: Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der zukünftige tektonische Prozesse oder Ereignisse zu keinen unerlaubten Radionuklidfreisetzungen führen können. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von möglicherweise zerstörerischen tektonischen Prozessen oder Ereignissen wird das DOE die strukturellen, stratigraphischen, geophysikalischen und seismischen Anzeichen für Art, Umfang und Intensität tektonischer Prozesse und Ereignisse in der geologischen Struktur während des Quartärs betrachten.

- **Menschliche Eingriffe:** Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der Aktivitäten am Standort oder in seiner Umgebung durch zukünftige Generationen den Einschluss und die Isolierung des Abfalls wahrscheinlich nicht beeinträchtigen.
- **Ressourcen:** Der Standort soll in einer Gegend liegen, in der nach aller Wahrscheinlichkeit keine Bodenschätze (einschließlich Grundwasser für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung) genutzt werden, so dass eine unzulässige Freisetzung von Radionukliden nicht zu erwarten ist.
- **Besitz und Kontrolle:** Der Standort soll in einer Gegend liegen, für das DOE Besitz, Rechte und Zugangskontrolle erhalten kann, die für potenzielle oberirdische und unterirdische Aktivitäten erforderlich sind.

5.8.2 Günstige Bedingungen

- **Geohydrologie**
 - Transportzeiten für das Grundwasser entlang aller Transportwege für Radionuklide aus der gestörten Zone in die erreichbare Umgebung, die vor der Einbringung der Abfälle mehr als 10.000 Jahre betragen.
 - Art, Dauer und Intensität der quartären hydrologischen Prozesse innerhalb der geologischen Struktur haben - bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft - auf die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall in den nächsten 100.000 Jahren zu isolieren, keinen Einfluss oder wenn, dann nur einen günstigen.
 - Der Standort hat stratigraphische, strukturelle und hydrologische Eigenschaften derart, dass das hydrogeologische System leicht beschrieben und mit ausreichender Sicherheit modelliert werden kann.
 - Bei der Endlagerung in der gesättigten Zone sollte mindestens eine der folgenden Bedingungen vor der Einbringung der Abfälle vorliegen:
 - Niedrige hydraulische Leitfähigkeit des Wirtsgestein und der unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.
 - Abwärtsgerichteter oder überwiegend horizontaler hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und den unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.
 - Niedriger hydraulischer Gradient im Wirtsgestein und zwischen Wirtsgestein und den unmittelbar daran anschließenden hydrogeologischen Einheiten.

- Hoch wirksame Porosität zusammen mit niedriger hydraulischer Leitfähigkeit im Gestein entlang der Wege, auf denen Radionuklide in die erreichbare Umgebung transportiert werden können.
- Geochemie
 - Art, Dauer und Intensität der quartären geochemischen Prozesse innerhalb der geologischen Struktur haben – bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft – auf die Fähigkeit des geologischen Lagers, den Abfall in den nächsten 100.000 Jahren zu isolieren, keinen Einfluss oder wenn, dann nur einen günstigen.
 - Geochemische Bedingungen, welche
 - die Fällung oder Diffusion in die Gesteinsmatrix und die Sorption von Radionukliden fördern,
 - die Bildung und den Transport von Partikeln, Kolloiden, anorganischen oder organischen Komplexen verhindern oder
 - die Mobilität der Radionuklide hemmen.
 - Mineralparagenesen, die, wenn sie den erwarteten Endlagerbedingungen unterworfen sind, unverändert bleiben oder die Mineralparagenesen so verändern, dass sie die gleiche oder erhöhte Fähigkeit besitzen, den Radionuklidtransport zu verlangsamen.
 - Eine Kombination der erwarteten geochemischen Bedingungen und der Fließgeschwindigkeit des Wassers im Wirtsgestein derart, dass innerhalb von 1.000 Jahren weniger als 0,001 Prozent des gesamten Aktivitätsinventars pro Jahr im Endlager gelöst wird.
 - Jede Kombination von geochemischen und physikalischen Verzögerungsprozessen, welche die vorausgesagte maximale gesamte Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung um einen Faktor 10 vermindert, im Vergleich mit der vorausgesagten Grundwasserlaufzeit ohne eine solche Verzögerung.
- Gesteinseigenschaften
 - Ein Wirtsgestein von ausreichender Mächtigkeit und seitlicher Ausdehnung, das genügend Flexibilität in der Wahl der Tiefe, der Konfiguration und der Lage des Endlagers zulässt, um die Isolierung des Abfalls sicherzustellen.

- Ein Wirtsgestein mit hoher thermischer Leitfähigkeit, niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder geeignetem Formänderungsvermögen, um Brüche, induziert durch Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers oder durch Wechselwirkungen zwischen Abfall, Wirtsgestein, Grundwasser und technischen Barrieren, zu verschließen.
- Klimaveränderungen
 - Ein Oberflächenwassersystem mit erwarteten klimatischen Veränderungen in den nächsten 100.000 Jahren derart, dass die Isolierung des Abfalls nicht nachteilig beeinflusst wird.
 - Eine geologische Situation, in der klimatische Veränderungen während des Quartärs wenig Wirkung auf das hydrologische System gehabt haben.
- Erosion
 - Standortbedingungen, die es erlauben, den Abfall in einer Tiefe von mindestens 300 Metern einzulagern.
 - Eine geologische Situation, in der vergangene quartäre Erosionsprozesse mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-4} voraussichtlich in den nächsten 10 000 Jahren zu keiner Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung führen.
 - Standortbedingungen, die ein Zutagetreten des Abfalls in den ersten eine Million Jahren nach Verschluss des Endlagers nicht erwarten lassen.
- Lösungsprozesse: Keine Anzeichen von Lösungsprozessen im Wirtsgestein während des Quartärs.
- Tektonik: Art, Dauer und Intensität von eruptiven Aktivitäten und tektonischen Prozessen (z. B. Hebungen, Senkungen, Faltungen oder Verwerfungen), die im Gesteinskörper während des Quartärs stattfanden, haben bei Übertragung der Prozesse in die Zukunft eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-4} in den ersten 10.000 Jahren nach Verschluss, eine Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung zu bewirken.
- Ressourcen
 - Keine bekannten Bodenschätze, die derzeit oder in absehbarer Zukunft von großer wirtschaftlicher Bedeutung sind.

- Grundwasser, befrachtet mit 10.000 ppm oder mehr an gelösten Feststoffen, entlang aller möglichen Wege, auf denen Radionuklide aus dem Wirtsgestein in die erreichbare Umgebung gelangen können.
- Besitz und Kontrolle: Alle Nutzungsrechte an gegenwärtigem Eigentum und Verwaltung von Land sowie alle Rechte betreffs der Erdoberfläche und des Untergrundes liegen beim DOE.

5.8.3 Möglicherweise ungünstige Bedingungen

- Geohydrologie
 - Erwartete Änderungen der hydrogeologischen Bedingungen, z. B. Änderungen im hydraulischen Gradienten, in der hydraulischen Leitfähigkeit, in der effektiven Porosität sowie im Grundwasserfluss durch das Wirtsgestein und seine es umgebende hydrogeologische Einheit, bewirken - im Vergleich zur ungestörten Standortsituation - einen signifikanten Anstieg in der Freisetzung der Radionuklide in die erreichbare Umgebung.
 - Das Vorhandensein von Grundwasserentnahmestellen entlang der Grundwasserpfade im Wirtsgestein und seiner erreichbaren Umgebung, die unmittelbar zur landwirtschaftlichen Bewässerung oder zum menschlichen Verzehr geeignet sind.
 - Das Vorhandensein von stratigraphischen oder strukturellen Merkmalen im geologischen System, wie z. B. Horste, Schwellen, Verwerfungen, Scherungszonen, Faltungen, Lösungserscheinungen oder Laugennester, die zu Schwierigkeiten bei der Charakterisierung oder Modellierung der geologischen Gesamtsituation führen.
- Geochemie
 - Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein, welche die Widerstandsfähigkeit des technischen Barrierensystems gegenüber Lösungsprozessen oder chemischer Reaktivität in einem solchen Ausmaß beeinflussen könnten, dass die erwartete Leistungsfähigkeit des Endlagers beeinträchtigt wird.
 - Geochemische Prozesse oder Bedingungen, die die Sorption der Radionuklide vermindern oder die Festigkeit des Gesteins herabsetzen könnten.
 - Oxidierende Grundwasserbedingungen im Wirtsgestein vor der Einbringung der Abfälle.

- Gesteinseigenschaften
 - Gesteinsbedingungen, die technische Maßnahmen erfordern könnten, die über die nach Stand der Technik verfügbare Technologie für Bau, Betrieb und Verschluss des Endlagers hinausgehen, um den Einschluss und die Isolierung des Abfalls zu gewährleisten.
 - Ein Potenzial für Phänomene wie thermisch induzierte Brüche, Hydratation oder Dehydratation von Mineralbestandteilen, Laugenbewegung oder andere physikalische, chemische oder strahleninduzierte Effekte, die den Einschluss und die Isolierung des Abfalls beeinflussen könnten.
 - Eine Kombination von geologischer Struktur und geochemischen sowie thermischen Eigenschaften und hydrologischen Bedingungen im Wirtsgestein und seiner erreichbaren Umgebung derart, dass die vom Abfall produzierte Wärme die Isolationsfähigkeit des Wirtsgesteins, verglichen mit der Standortsituation vor Einbringung der Abfälle, erheblich herabsetzen kann.
- Klimaveränderungen
 - Anhaltspunkte dafür, dass der Grundwasserspiegel in den nächsten 10.000 Jahren weit genug ansteigen könnte, um ein zuvor ungesättigtes Wirtsgestein mit unterirdischen Einrichtungen in einen wassergesättigten Zustand zu versetzen.
 - Anhaltspunkte dafür, dass klimatische Veränderungen in den nächsten 10.000 Jahren Störungen im hydraulischen Gradienten, in der hydraulischen Leitfähigkeit, in der effektiven Porosität oder im Grundwasserfluss durch das Wirtsgestein und seine erreichbare Umgebung verursachen könnten, so dass diese Veränderungen zu einem wesentlichen Anstieg der Radionuklidfreisetzung in die erreichbare Umgebung führen.
- Erosion
 - Eine geologische Situation mit extrem hoher Erosion im Quartär.
 - Eine geologische Situation, in der Art, Dauer und Intensität der geomorphologischen Prozesse im Quartär die Fähigkeit des Lagers, den Abfall in den ersten 10.000 Jahren nach Verschluss zu isolieren, ungünstig beeinflussen könnten.

- **Lösungsprozesse**
Anzeichen von Lösungsprozessen im geologischen Gesamtsystem z. B. infolge erhöhter Wasserzutritte im Bereich von Trümmergesteinen (Brekziengänge; „breccia pipes“), das Vorhandensein von Lösungshohlräumen, signifikante Volumenverminderung des Wirtsgesteins oder der umgebenden Gesteinsfolgen oder struktureller Zusammenbruch, so dass eine hydraulische Verbindung entstehen könnte, die zu einem Verlust der Abfallisolierung führt.
- **Tektonik**
 - Anzeichen für aktive Faltungsvorgänge, für Verwerfungsprozesse, für Diapirismus, für Hebungen, Senkungen oder für andere tektonische Prozesse sowie für eine eruptive Aktivität im geologischen Gesamtsystem während des Quartärs.
 - Historische Erdbeben im geologischen Gesamtsystem von solcher Magnitude und Intensität, dass sie, sollten sie erneut auftreten, den Einschluss und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigen könnten.
 - Anzeichen, basierend auf Korrelationen zwischen Erdbeben und tektonischen Prozessen bzw. Bewegungen, dass entweder die Häufigkeit oder die Stärke der Erdbeben im geologischen Gesamtsystem zunehmen könnte.
 - Häufigeres Auftreten von Erdbeben oder Erdbeben größerer Stärke als sie repräsentativ sind für die Region, in der sich das geologische Gesamtsystem befindet.
 - Ein Potenzial für natürliche Phänomene wie z. B. Erdrutsche, Senkungen oder vulkanische Aktivität von solchem Ausmaß, dass große oberflächliche Wasserrückhaltungen entstehen könnten, die eine Änderung des regionalen Grundwassersystems bewirken.
 - Ein Potenzial für tektonische Deformationen, wie z. B. Hebungen, Senkungen, Verwerfungen oder Faltungen derart, dass das regionale Grundwassersystem ungünstig beeinflusst werden könnte.
- **Ressourcen**
 - Hinweise auf das Vorkommen natürlicher Rohstoffe am Standort, ob bereits identifiziert oder möglicherweise zu erwarten, derart, dass
 - ein wirtschaftlicher Abbau in absehbarer Zukunft möglich ist, oder dass

- solche Materialien einen größeren Brutto-/Nettowert bzw. ein höheres wirtschaftliches Potenzial besitzen als im Durchschnitt in anderen Regionen ähnlicher Größe, die repräsentativ für die geologische Struktur sind.
- Anzeichen von Untertage-Bergbau oder Ressourcenabbau am Standort, wenn dadurch der Einschluss und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigt werden könnte.
- Anzeichen von Bohrungen am Standort zu anderen Zwecken als zur Bewertung des Endlagerstandorts bis zu Tiefen, die den Einschluss und die Isolierung des Abfalls beeinträchtigen könnten.
- Anzeichen für ein ausgedehntes Vorkommen an natürlichen Materialien, die aus anderen Quellen nicht in dem Ausmaß zur Verfügung stehen.
- Ein Potenzial für vorhersehbare menschlichen Aktivitäten, wie z. B. Grundwasserentnahme, extensive Bewässerung, Einbringung von Flüssigkeiten unter die Erdoberfläche, militärische Aktivitäten oder Bau von großen oberirdischen Wasserrückhaltungen, die Teile des Grundwassersystems ungünstig verändern könnten, welche wichtig für die Isolierung des Abfalls sind.
- Besitz und Kontrolle: Zu erwartende Landbesitz-Konflikte, die nicht durch freiwillige Verkaufsverhandlungen, einvernehmliche Übertragung des Besitzrechtes von Behörde zu Behörde oder durch staatliche Enteignungsprozesse gelöst werden können.

5.8.4 Ausschlusskriterien bezüglich der Vorverschlussphase

Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn

- Im Hinblick auf die Bevölkerungsdichte sollte ein Standort ausgeschlossen werden, wenn
 - irgendeine oberirdische Anlage eines Endlagers in einer stark besiedelten Region liegen würde, oder
 - irgendeine oberirdische Anlage eines Endlagers an eine Region mit einer Bevölkerung von nicht weniger als 1.000 Personen pro Quadratmeile gemäß der jüngsten US.-Volkzählung angrenzen würde, oder
 - DOE kein Notfallschutzprogramm entwickeln könnte, das den Anforderungen der DOE Order 5500.3 (betreffe Notfallplanung für Kernkraftwerke und andere

Anlagen) und verwandten Richtlinien oder den Kriterien für die Notfallplanung der NRC (10 CFR 60, Subpart I) entspricht.

- Installationen und Operation außerhalb des Standorts: Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn nukleartechnische Anlagen oder Aktivitäten militärischer Art in seiner unmittelbaren Nachbarschaft zu erwarten sind, die unverträglich sind mit Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschluss oder Stilllegung eines Endlagers.
- Umweltqualität: Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn
 - während Standortauswahl, Errichtung, Betrieb, Verschluss oder Stilllegung eines Endlagers kein angemessener Schutz der Umwelt in der betroffenen Region besteht oder keine Milderung von absehbaren Umweltschäden auf ein akzeptables Maß erreicht werden könnte, unter Berücksichtigung planmäßiger, technischer, sozialer, wirtschaftlicher Faktoren und Umwelteinflüsse.
 - irgendein Teil des Überwachungsbereiches oder von Versorgungsanlagen des Endlagers innerhalb der Grenzen eines Teiles des Nationalparksystems oder anderer nationaler Schutzgebiete (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) liegen würden.
 - unvereinbare Konflikte zwischen der Existenz des Überwachungsbereiches oder von Versorgungsanlagen des Endlagers mit der zuvor bestimmten Nutzung zur Erhaltung von Ressourcen eines Teiles des Nationalparksystems oder anderer nationaler Schutzgebiete (National Wildlife Refuge System, National Wilderness Preservation System, National Wild and Scenic Rivers System) und den National Forest Lands sowie anderer ähnlich wichtiger staatlicher Schutzgebiete, die zur Zeit der Verordnung des Gesetzes zur Erhaltung von Ressourcen erklärt wurden, bestehen würden.
- Sozioökonomische Auswirkungen: Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn Errichtung, Betrieb oder Verschluss eines Endlagers die Qualität oder die Quantität von Wasser aus bedeutenden Hauptquellen oder Rückhaltungen außerhalb des Standortes, die gegenwärtig für den menschlichen Verzehr oder zur landwirtschaftlichen Bewässerung geeignet sind, erheblich beeinträchtigen würden, und solche Eingriffe nicht durch angemessene Maßnahmen kompensiert oder gemildert werden können.

- **Gesteinseigenschaften:** Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn die Gesteinseigenschaften derart sind, dass die Aktivitäten, die mit Errichtung, Betrieb oder Verschluss eines Endlagers einhergehen, voraussichtlich ein erhebliches Risiko für die Gesundheit und Sicherheit des Personals darstellen, unter Berücksichtigung von Maßnahmen zur Abmilderung durch Einsatz von herkömmlich verfügbarer Technologie.
- **Hydrologie:** Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn es, basierend auf erwarteten Grundwasserbedingungen, wahrscheinlich ist, dass technische Maßnahmen, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen, die zum Bau von Erkundungsschächten oder zur Errichtung, Betrieb oder Verschluss eines Endlagers benötigt werden.
- **Tektonik:** Ein Standort sollte ausgeschlossen werden, wenn es, basierend auf erwarteter Art, Dauer und Intensität von Faltungsvorgängen oder anderen Bewegungen der Erdkruste, wahrscheinlich ist, dass technische Maßnahmen, die über die herkömmliche Technologie hinausgehen, zur Erkundung benötigt werden.

5.8.5 Ausschlusskriterien bezüglich der Nachverschlussphase

Nach den DOE-Richtlinien 10 CFR 960 sollte ein Standort ausgeschlossen werden, wenn

- **Geohydrologie:** vor Einbringung der Abfälle eine Grundwasserlaufzeit aus der Einlagerungszone bis in die erreichbare Umgebung von weniger als 1.000 Jahren zu erwarten ist, entlang aller Wege für möglichen und signifikanten Radionuklidtransport.
- **Erosion:** die Standortbedingungen es nicht erlauben, alle unterirdischen Teile des Endlagers in mindestens 200 m Tiefe unterhalb der direkt darüber liegenden Erdoberfläche zu platzieren.
- **Lösungsprozesse:** es wahrscheinlich ist, dass während der ersten 10.000 Jahre nach Verschluss aktive Lösungsprozesse, abgeleitet aus der geologischen Vorgeschichte, zu einem Verlust der Abfallisolierung führen würden.
- **Tektonik:** basierend auf der geologischen Vorgeschichte während des Quartärs zu erwarten ist, dass Art, Dauer und Intensität von Faltungsvorgängen oder anderen Erdbewegungen im Untergrund so sind, dass wahrscheinlich ein Verlust der Abfallisolierung eintritt.
- **Ressourcen:**
 - signifikante Wege zwischen der projektierten unterirdischen Anlage und der erreichbaren Umgebung durch frühere Erkundung, Bergbautätigkeit oder

Abbau zum Zwecke der kommerziellen Nutzung am Standort geschaffen wurden, oder

- durch derzeitige oder in der Zukunft wahrscheinliche Aktivitäten ein unbeabsichtigter Verlust der Abfallisolierung erwartet werden könnte, und zwar infolge eines Abbaus von heutzutage als wertvoll geltenden natürlichen Mineralrohstoffen, die gegenwärtig außerhalb des Überwachungsbereiches gewonnen werden.

In den DOE-Richtlinien 10 CFR 960 DOE-Richtlinien (DOE 2001) ist zudem festgelegt (§960.3-1-5(d)1), dass ein potenzieller Standort zu jedem Zeitpunkt des Standortauswahlprozesses ausgeschlossen werden soll, wenn es Befunde gibt, dass Bedingungen vorliegen, die zum Ausschluss führen oder die Voraussetzungen einer Richtlinie nicht erfüllen.

5.9 Abänderungsgesetz von 1987 - Rückholbarkeitsoption

Im Abänderungsgesetz zum NWPA von 1987 (DOE 2004a), das die Standortuntersuchungen auf den Standort Yucca Mountain einschränkt, sind die gesetzlichen Anforderungen für die Rückholbarkeit von hoch radioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen mit möglichen Gründen für eine Rückholung festgelegt. Es heißt, dass jedes Endlager so geplant und errichtet werden muss, dass die Rückholbarkeit sämtlicher eingelagerter Abfälle gewährleistet ist. Die Rückholbarkeit muss zu einem angemessenen Zeitpunkt in der Betriebsphase gewährleistet sein. Gesetzliche Gründe für die Rückholung umfassen u. a. die Gesundheit und Sicherheit der Öffentlichkeit, Umweltbelastungen und der Gewinn wertvoller Inhaltsstoffe aus der Aufbereitung abgebrannter Brennelemente. Die Anforderungen für die Rückholbarkeit von abgebrannten Brennelementen und hoch radioaktiven Abfällen sind in den Richtlinien 10 CFR Part 60 (DOE 1981) und Part 63 (DOE 2004b) geregelt.

5.10 Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future

Im Januar 2010 beauftragte Präsident Obama eine aus Politikern und Fachleuten besetzte Kommission „Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future“, Vorschläge für eine neue Entsorgungsstrategie zu entwickeln. Im Abschlussbericht der Kommission, der im Januar 2012 erschien, wurden u. a. folgende Empfehlungen ausgesprochen: die Errichtung eines zentralen Zwischenlagers für abgebrannte Brennelemente, die Schaffung einer selbstständigen Behörde für die Endlagerung gebrauchter Brennelemente und sonstiger hoch radioaktiver Abfälle, die Beibehaltung der Zielsetzung der Endlage-

rung in tiefen geologischen Formationen und eine Weiterführung der Debatte über eine Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente (BRC 2012). Das DOE legte 2013 seine darauf basierende Entsorgungsstrategie vor, die bis 2021 den Bau einer Pilotanlage für ein Zwischenlager, bis 2025 die Fertigstellung des großtechnischen Zwischenlagers und bis 2048 die Fertigstellung des Endlagers vorsieht. Alle Ziele sollen konsens-basiert erreicht werden (BRC 2013).

5.11 Literaturverzeichnis

BORK, M., KINDT, A., NIERSTE, G., WALTERSCHEIDT, K.-H. (2001): Zusammenstellung nationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. GRS. Auftrags-Nr. 551180. Januar 2001.

BRC (2012): Report to the Secretary of Energy. - Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2012.

BRC (2013): Strategy For the management And disposal Of used nuclear fuel and high-level radioactive waste. - Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future, January 2013, http://energy.gov/sites/prod/files/2013%201-15%20Nuclear_Waste_Report.pdf.

DOE (1981): 10 CFR Part 60 Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repositories. – February 1981, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

DOE (1985): 40 CFR Part 191 Environmental Radiation Protection Standards for Management And Disposal of Spent Nuclear Fuel, High-Level And Transuranic Radioactive Wastes, <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=91f1ecfccdade8de20bfcf65140fc909&mc=true&node=pt40.25.191&rgn=div5> (01.04.2015)

DOE (2000): The Waste Isolation Pilot plant. Pioneering Nuclear Waste Disposal. – U.S. Department of Energy, Carlsbad.

DOE (2004a): Nuclear Waste Policy Act as amended with Appropriations Acts appended. - U.S. Department of Energy, March 2004, Washington, D.C.

DOE (2004b): 10 CFR Part 63 Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada. – January 2004, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.

- DOE (2007): WIPP Chronology. - WIPP Information Center, <http://www.wipp.energy.gov/fctshts/Chronology.pdf> (05.02.2007)
- DOE (2011): 10 CFR 960 General Guidelines for the Preliminary Screening of Potential Sites for a nuclear Waste Repository. - January 2011, U.S. Department of Energy, Washington, D.C.
- EPA (1996a): Criteria for the certification and recertification of the waste isolation pilot plant's compliance with the 40 CFR Part 191 disposal regulations. Background information document for 40 CFR part 194. - U.S. Environmental Protection Agency, January 1996.
- EPA (1996b): Compliance Application Guidance for 40 CFR Part 194. EPA 402-R-95-014. - U.S. Environmental Protection Agency, March 1996, Washington, D.C.
- GERVERS, J. H. (1993): Bericht der Arbeitsgruppe Standortvorauswahl. Appendix A. Experience of Different Countries in Site Selection. Case Studies. A3 U.S.A..- In: Niedersächsisches Umweltministerium (Hrsg.): Endlager-Hearing Braunschweig. Tagungsband II, S. 312-322.- Hannover (Internationales Endlager-Hearing 21.-23. September 1993 in Braunschweig).
- GNIRK, P. (1991): Historical Overview of DOE Site-Selection Criteria 10 CFR 960. Presentation to the Nuclear Waste Technical Review Board. July, 15 – 17, 1991.
- GRISWOLD, G.B. (1977): Site Selection and Evaluation Studies of the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Los Medanos, Eddy County, NM. Underground Process Control Division 5732, Sandia Laboratories, 1977, Albuquerque.
- HILL (1980): Characterization of a site in bedded salt for isolations of radioactive wastes. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Nuclear Energy Agency, 75 - Paris (France); Proceedings series; v. 1 p. 269-286; ISBN 92-0-020180-2; 1980; v. 1 p. 289-295; IAEA; Vienna; Symposium on the underground disposal of radioactive wastes; Otaniemi, Finland; 2 - 6 Jul 1979; IAEA-SM--243/38.
- HOWARD, B.A., Crawford, M.B., Galson, D.A., Marietta, M.G. (2000): Regulatory Basis for the Waste Isolation Pilot Plant Performance Assessment. Sandia National Laboratories, Carlsbad.
- IAEA (1977): Site Selection Factors for repositories of Solid high-Level and Alpha-Bearing Wastes in Geological Formations. - International Atomic Energy Agency, Vienna.

- JOHNSON, K.S. & GONZALES, S. (1978): Salt Deposits in the United States and Regional Geologic Characteristics Important for Storage of Radioactive Waste. – The Office of Waste Isolation Union Carbide Corporation, Nuclear Division. U.S. Department of Energy, March 1978.
- KEHNEMUYI, M.; MATTHEWS, S.C. (1980): Site selection, site investigations and design activities in the USA for nuclear waste repositories in bedded and dome salt formations. International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Nuclear Energy Agency, 75 - Paris (France); Proceedings series; v. 1 p. 289-295; ISBN 92-0-020180-2; 1980; v. 1 p. 289-295; IAEA; Vienna; Symposium on the underground disposal of radioactive wastes; Otaniemi, Finland; 2 - 6 Jul 1979; IAEA-SM--243/151.
- LYNCH, R.W., HUNTER, R.L., ANDERSON, D.R., BINGHAM F.W. et al. (1991): Deep Geologic Disposal in the United States: The Waste Isolation Pilot Plant and Yucca Mountain Projects. Sandia National Laboratories. – 2000, Albuquerque, New Mexico.
- MYERS, C. W. (1986): History, Structure and Institutional Overview of the Nuclear Waste Policy Act of 1982, - Rand Corporation, August 1986, Santa Monica.
- MORA, C.J. (1999): Sandia and the Waste Isolation Pilot Plan 1974 – 1999 : Being an Accurate and Truthful Historical Account of Sandia National Laboratories' Contribution in Resolving the Technical Issues in a Dynamic Political and Societal Framework . – Sandia National Laboratories.
- NAS (1957): The Disposal of Radioactive Waste on Land: Report of the Committee of Waste Disposal of the Division of Earth Sciences. National Academy of Sciences – National Research Council, April 1957, Washington, D.C.
- NAS (1978): Geological Criteria for Repositories for High-Level Radioactive Wastes. – National Academy of Sciences, Washington, D.C., August 1978.
- NRC (1970): Disposal of Solid Radioactive Wastes in Bedded Salt Deposits. – Report by the Committee on Radioactive Waste Management. National Academy of Sciences – National Research Council. Washington, D.C., November 1970.
- NRC (1984): Review of the Scientific and Technical Criteria for the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). National Research Council, 1984, Washington D.C.
- NRC (2014): Siting Criteria, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part060/part060-0122.html> (13.05.2015).

PIERCE, W.G. & RICH, E.I. (1962): Summary of Rock Salt Deposits in the United States as Possible Storage Sites for Radioactive Waste Materials. Geological Survey Bulletin 1148. 1962, Washington, D.C.

RECHARD, R.P. (1998): Milestones for Disposal of Radioactive Wastes at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) in the United States. – Performance Assessment Department (6849), Sandia National Laboratories, April 1998.

SRIC (2015): Nuclear Waste Program: Chronology of WIPP events from 1972 to 2000, <http://www.sric.org/nuclear/docs/WIPPCHRON.php> (16.01.2015).

STEIN, R. (1986): The United States Geologic Repositories Program: An Overview. Office of Civilian Radioactive Waste Management, Department of Energy. Washington, D.C.

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Beschreibung und Anwendung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (aus BFE 2008, Tabellen A1-1 bis A1-13, Seite 52-56).....	33
Tab. 2: 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) (aus BFE 2008, Tabelle A1-14, Seite 59-62).....	38
Tab. 3: Vorgaben zur Anwendung der Indikatoren für die Einengungsprozedur der Schritte 3 bis 5 in Etappe 1 (Legende: MA – Mindestanforderung, VA – verschärfte Anforderung (wird teilweise auch in der Definition der Bewertungsskalen verwendet), BS – Bewertungsskala, (x) – Anwendung nur für HAA-Lager. Die Reihenfolge der Indikatoren folgt der Tabelle A1-14 im SGT (BFE 2008). In den verschiedenen Schritten werden z. T. zusätzliche Kriterien und Indikatoren berücksichtigt. Präzisierungen zu den Indikatoren stehen in eckigen Klammern).....	42
Tab. 4: Detaillierte Liste der bei der Bewertung, Optimierung und Einengung in Etappe 2 verwendeten Indikatoren (Mastertabelle).....	58
Tab. 5: Zusammenfassung der geowissenschaftlichen Kriterien nach (CCSIN 1984), GOGUEL (1987) und ASN (2009).....	66
Tab. 6: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in kristallinen Gesteinen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987).....	67
Tab. 7: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in Tonschiefern nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987).....	68
Tab. 8: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in salinaren Formationen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987).....	68
Tab. 9: Zusammenfassung der Untersuchungsschwerpunkte in Tonstein-Formationen nach ASN (2009), CCSIN (1984) u. GOGUEL (1987).....	68
Tab. 10: Zusammenfassung der Richtlinien und geowissenschaftlicher Kriterien für Wirtsgesteinsformationen der IAEA und der EC (nach ONDRAF/NIRAS 2001a).....	84
Tab. 11: Überblick von Auswahlkriterien für Tongesteine für den Europäischen Katalog (EC 1979, 1989).....	86

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Kategorisierung und Charakterisierung der radioaktiven Abfälle im Hinblick auf die Endlagerung (Quelle: VSE et al. 1978).....	6
Abb. 2: Allgemeine Anforderungen an die Endlagertypen (Quelle: VSE et al. 1978). Abfallkategorien siehe Abbildung 1.....	7
Abb. 3: Lagermöglichkeiten unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen von Abb. 2 (Quelle: VSE et al. 1978). Definitionen siehe Abb. 2.....	8
Abb. 4: Systematische Auswahl durch die NAGRA des Sedimentgesteins und der Untersuchungsregion (Quelle: HSK 2005).....	14
Abb. 5: Auswahl von geologischen Standortgebieten (Schritte gemäß SGT, Etappe 1) (Quelle: NAGRA 2008).....	16
Abb. 6: Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (Quelle: NAGRA 2008).....	17
Abb. 7: Prüfung von Wirtsgesteinen in Schritt 4 aufgrund von Mindest- und verschärften Anforderungen: Zusammenfassung der Evaluation für das Tiefenlager HAA (NAGRA 2008a).....	19
Abb. 8: Vergleichende Bewertung der bevorzugten Bereiche in Schritt 5 für ein Tiefenlager HAA auf Stufe Kriterien und Kriteriengruppe gemäß SGT (NAGRA 2008a)	21
Abb. 9: In einer Zusammenstellung der Dosisintervalle (Säulen in Grafik) lassen sich Standorte (hier schematisch) sicherheitstechnisch vergleichen. Als Bewertungsmaßstab für die Sicherheit respektive für die Wirksamkeit der geologischen Barriere gilt das vom ENSI festgelegte Dosis-Schutzkriterium von 0,1 mSv/Jahr für eine Person. In der Abbildung mit hypothetischen Beispielen bedeutet dies: Standort 5 scheidet aus. Aus der Strahlenschutzverordnung abgeleitet, gilt das Optimierungsziel von 0,01 mSv/Jahr. Die Dosisintervalle der geologischen Standortgebiete müssen unterhalb dieses Optimierungsziels liegen oder – falls dies nicht der Fall ist – mit dem Dosisintervall des besten Standorts (Standort 1) überlappen. Standort 4 erfüllt dies nicht und scheidet deshalb aus (NAGRA 2015b).....	23
Abb. 10: Kriteriengruppen, Kriterien, Indikatoren und ihre Anwendung. Ein «x» oder («x») bedeutet, dass dieser Indikator berücksichtigt wird; «e» steht für entscheidungsrelevanter Indikator (NAGRA 2015b).....	25
Abb. 11: Qualitative Bewertung der Lagerperimeter in den geologischen Standortgebieten für das HAA-Lager beziehungsweise das SMA-Lager (gemäß NTB 14-01).....	26
Abb. 12: Ergebnis des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete für ein HAA-Lager (NAGRA 2015b).....	27
Abb. 13: Überblick über die in Schweden durchgeführten Machbarkeitsstudien und Standortuntersuchungen (SKB 2009).....	74