



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete

Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

ENSI 33/070

Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete

Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1

Brugg, Januar 2010

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Gesetzliche Grundlagen	6
1.2	Sachplan geologische Tiefenlager	6
1.3	Unterlagen der Nagra zur Etappe 1	8
1.4	Behördliche Überprüfung	9
1.4.1	Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation	10
1.4.2	Prüfumfang	11
1.5	Gliederung des Gutachtens	11
2	Abfallzuteilung auf das SMA- und das HAA-Lager	13
2.1	Vorgehen und Grundlagen	13
2.2	Abfallinventar	15
2.3	Rechenfälle für die Zuteilung des Abfallinventars	17
2.4	Zuteilung der Abfälle auf das SMA- und das HAA-Lager	21
2.5	Zusammenfassende Beurteilung der Abfallzuteilung	24
3	Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben an die geologische Barriere	25
3.1	Barrieren-, Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen für SMA- und HAA-Lager	26
3.2	Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Langzeitsicherheit	27
3.2.1	Nahfeld des SMA-Lagers	28
3.2.2	Nahfeld des HAA-Lagers	32
3.2.3	Geochemische Bedingungen in den generischen Wirtgesteinen	35
3.2.4	Illustration der Beiträge der einzelnen Barrieren zur Langzeitsicherheit	38
3.3	Lagerbedingte Einflüsse	40
3.3.1	Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung	40
3.3.2	Hoch-pH-Fahne	42
3.3.3	Nahfeld-Kolloide	44
3.3.4	Gasbildung und -transport	45
3.3.5	Wärmeeintrag	50
3.4	Herleitung der Anforderungen an die Geologie	51
3.5	Zusammenfassende Beurteilung der Vorgaben an die geologische Barriere	71
4	Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume	73
4.1	Vorgehen und Grundlagen	73
4.2	Geologisch-tektonische Grossräume für das SMA-Lager	78
4.3	Geologisch-tektonische Grossräume für das HAA-Lager	82
4.4	Zusammenfassende Bewertung	84

5	Identifikation der Wirtgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche	85
5.1	Vorgehen und Grundlagen	85
5.2	Wirtgesteine für SMA-Lager	92
5.3	Wirtgesteine für HAA-Lager	106
5.4	Zusammenfassende Bewertung zur Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine	116
6	Identifikation geeigneter Konfigurationen und Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete	117
6.1	Vorgehen und Grundlagen	117
6.2	Standortgebiete für SMA-Lager	124
6.2.1	Identifikation und Auswahl bevorzugter Bereiche für das SMA-Lager	124
6.2.2	Vorgeschlagene Standortgebiete	126
6.2.3	Aufteilung eines SMA-Lager auf zwei Wirtgesteine	148
6.2.4	Vollständigkeit der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete	148
6.2.5	Vergleich der hydrogeologischen Situation der vorgeschlagenen SMA-Standortgebiete	149
6.3	Standortgebiete für HAA-Lager	152
6.3.1	Identifikation und Auswahl bevorzugter Bereiche für das HAA-Lager	152
6.3.2	Vorgeschlagene geologische Standortgebiete	153
6.3.3	Prüfung von SMA-Standortgebieten auf mögliche Eignung für das HAA-Lager	164
6.3.4	Vergleich der hydrogeologischen Situation in den HAA-Standortgebieten	165
6.4	Zusammenfassende Bewertung der Vorschläge geologischer Standortgebiete	167
7	Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen	171
7.1	Das Vorgehen gemäss Sachplan geologische Tiefenlager	171
7.2	Eingereichte Vorschläge der Nagra	172
7.3	Beurteilung der Abfallzuteilung (Schritt 1)	172
7.4	Beurteilung des Sicherheitskonzepts und der Anforderungen an die geologische Barriere (Schritt 2)	173
7.5	Beurteilung der Vorschläge für geologisch-tektonische Grossräume (Schritt 3)	175
7.6	Beurteilung der potenziell geeigneten Wirtgesteine (Schritt 4)	176
7.7	Beurteilung der Wirtgesteinskonfigurationen (Schritt 5)	176
7.8	Schlussfolgerungen	178
8	Referenzen	180
9	Glossar und Abkürzungsverzeichnis	189

Textboxen

Textboxen im Gutachten erläutern ausgewählte, in der Öffentlichkeit häufig diskutierte Begriffe und Themen in allgemein verständlicher Sprache. Die angesprochenen Themen werden in der Wissenschaft zum Teil kontrovers diskutiert und sind stark vereinfacht dargestellt, insbesondere wenn Zukunftsprognosen im Zentrum stehen. Die Textboxen spiegeln die derzeitige Meinung des ENSI auf der Basis des verfügbaren Wissens wider.



Wirtgestein und einchlusswirksamer Gebirgsbereich	Seite 21
Klimaprognosen und Landschaftsentwicklung	Seite 57
Glaziale Tiefenerosion	Seite 58
Neotektonik und Erosion in der Nordschweiz	Seite 66
Alpen- und Vorlandbildung	Seite 76
Metamorphose von Tongesteinen	Seite 90
Warum der Oberbauenstock kein geologisches Standortgebiet ist	Seite 146

Herausgeber

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Industriestrasse 19
CH-5200 Brugg
Telefon +41(0)56 460 84 00
Telefax +41(0)56 460 84 99

Zu beziehen bei

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Informationsdienst
Industriestrasse 19
CH-5200 Brugg
oder per Email
Info@ensi.ch

Abrufbar unter

www.ensi.ch

1 Einleitung

Am 17. Oktober 2008 hat die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) im Auftrag der Entsorgungspflichtigen bei den Bundesbehörden ihren Vorschlag für geologische Standortgebiete für die vorgesehenen Tiefenlager für radioaktive Abfälle eingereicht.

Gemäss aktuellem Entsorgungskonzept der Nagra sind zwei geologische Tiefenlager vorgesehen: Ein Lager für hochaktive Abfälle (HAA) und ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA). Erfüllt ein Standort sowohl die Anforderungen für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager, kann das Auswahlverfahren zu einem gemeinsamen Standort für alle radioaktiven Abfälle führen. Das von der Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen und gemäss «Sachplan geologische Tiefenlager» (SGT) durchgeführte Auswahlverfahren hat zu den folgenden Vorschlägen geführt:

Für das SMA-Lager:

- Südranden¹ (SH) mit dem Wirtgestein Opalinuston,
- Zürcher Weinland (ZH, TG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger',
- Nördlich Lägeren (ZH, AG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger',
- Bözberg (AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston,
- Jura-Südfuss (SO, AG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Effinger Schichten,
- Wellenberg (NW, OW) mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums.

Für das HAA-Lager:

- Zürcher Weinland (ZH, TG) mit dem Wirtgestein Opalinuston,
- Nördlich Lägeren (ZH, AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston,
- Bözberg (AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston.

Im Rahmen des «Sachplans geologische Tiefenlager» trägt das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) als zuständige Aufsichtsbehörde des Bundes die Gesamtverantwortung für die sicherheitstechnische Beurteilung der geologischen Standortgebiete. Es beurteilt die von der Nagra eingereichten Vorschläge und erstellt ein sicherheitstechnisches Gutachten. Das ENSI prüft insbesondere die verwendeten geologischen Grundlagen, die Resultate der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Auswahlverfahrens. Das Ergebnis der Überprüfung ist im vorliegenden Gutachten dokumentiert.

Das einleitende Kapitel weist auf die gesetzlichen Grundlagen zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle hin (Kapitel 1.1), gibt einen Überblick über die Vorgaben des Sachplans geologische Tiefenlager (Kapitel 1.2), führt die von der Nagra eingereichten und vom ENSI überprüften und konsultierten Unterlagen auf (Kapitel 1.3), beschreibt die Kriterien und den Umfang der behörd-

¹ In NTB 08-03 wird dieses Standortgebiet noch als «Südliches Schaffhausen» bezeichnet.

lichen Überprüfung (Kapitel 1.4) und gibt einen kurzen Abriss der Gliederung des vorliegenden Gutachtens (Kapitel 1.5).

1.1 Gesetzliche Grundlagen

Die Entsorgung der in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle wird durch das Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 und die Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004 umfassend geregelt.

Wer eine Kernanlage betreibt oder stilllegt, ist auf eigene Kosten zur sicheren Entsorgung der aus der Anlage stammenden radioaktiven Abfälle verpflichtet (Art. 31 KEG). Zur Entsorgungspflicht gehören auch die notwendigen Vorbereitungsarbeiten wie Forschung und erdwissenschaftliche Untersuchungen sowie die rechtzeitige Bereitstellung eines geologischen Tiefenlagers.

Nach Art. 5 KEV legt der Bund die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern in einem Sachplan für die Behörden verbindlich fest. Dazu gehört insbesondere die Festlegung des Standortauswahlverfahrens.

1.2 Sachplan geologische Tiefenlager

Sachpläne sind die im Raumplanungsgesetz (Art. 13 RPG) vorgesehenen Planungsinstrumente des Bundes für Projekte von nationaler Bedeutung. Der Sachplan geologische Tiefenlager (SGT) legt im Konzeptteil die Sachziele des Bundes sowie Verfahren und Kriterien fest, nach denen das Auswahlverfahren für geologische Tiefenlager für alle Abfallkategorien in der Schweiz durchgeführt wird. Das Standortauswahlverfahren legt den Schwerpunkt auf Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit; Raumnutzung und sozioökonomische Aspekte spielen für die Standortwahl eine untergeordnete Rolle. Weiter legt der Konzeptteil die Verfahrensschritte fest, regelt die Zusammenarbeit des Bundes mit den Kantonen und Nachbarstaaten, der Bundesstellen untereinander sowie betroffener Organisationen und Personen des öffentlichen und privaten Rechts, soweit sie mit der Wahrnehmung öffentlicher Aufgaben betraut sind. Er zeigt auch, wie die raumwirksamen Tätigkeiten aufeinander abgestimmt werden und die Entwicklung der Standortregionen, soweit diese durch das geologische Tiefenlager beeinflusst wird, unterstützt werden kann.

Der Konzeptteil SGT (BFE 2008) wurde vom Bundesrat am 2. April 2008 im Anschluss an ein breit abgestütztes Anhörungsverfahren genehmigt. Er sieht ein Auswahlverfahren in drei Etappen vor. Die Resultate der einzelnen Etappen werden durch die verfahrenleitende Behörde, dem Bundesamt für Energie (BFE), in einem Bericht über die Ergebnisse von Etappe 1 und in Objektblättern dokumentiert. Nach jeder Etappe werden die Objektblätter und die Festlegungen im jeweiligen Bericht über die Ergebnisse durch den Bundesrat genehmigt und werden damit Bestandteil des Sachplans.

Der Schwerpunkt von Etappe 1 liegt auf der Identifizierung geeigneter geologischer Standortgebiete, die ausschliesslich auf Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit basiert. Die geologischen Standortgebiete werden von den Entsorgungspflichtigen auf der Grundlage des bestehenden erdwissenschaftlichen Kenntnisstandes vorgeschlagen.

Die Einengung der Standorte für die beiden Lagertypen bildet den Schwerpunkt von Etappe 2. Die Standortregionen haben dazu die Möglichkeit, bei der Konkretisierung der Lagerprojekte sowie bei den Untersuchungen der sozioökonomischen und raumplanerischen Auswirkungen mitzuarbeiten. Die Entsorgungspflichtigen erarbeiten unter Einbezug der Standortregionen Vorschläge zur Anordnung und Ausgestaltung der Oberflächeninfrastruktur, ordnen die untertägigen Teile des Lagers an und wählen pro geologischem Standortgebiet mindestens einen Standort. Für diese führen sie quantitative provisorische Sicherheitsanalysen und einen sicherheitstechnischen Vergleich durch, bevor sie für das HAA- und das SMA-Lager je mindestens zwei Standorte vorschlagen.

In Etappe 3 werden die verbleibenden Standorte in Hinblick auf die Standortwahl und die Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs vertieft untersucht und die erforderlichen standortspezifischen geologischen Kenntnisse falls nötig mittels erdwissenschaftlicher Untersuchungen vervollständigt. Gestützt auf die Ergebnisse des Auswahlverfahrens wird der Bundesrat schliesslich über die Erteilung der Rahmenbewilligungen für je einen Standort für schwach- und mittelaktive (SMA) und hochaktive Abfälle (HAA) oder einen gemeinsamen Standort für alle Abfallkategorien entscheiden.

Für die Auswahl der geologischen Standortgebiete als Resultat von Etappe 1 verlangt der Konzeptteil SGT das folgende schrittweise Vorgehen:

- Schritt 1** Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA,
- Schritt 2** Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben,
- Schritt 3** Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume,
- Schritt 4** Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche,
- Schritt 5** Identifikation geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche in geeigneter Konfiguration.

1.3 Unterlagen der Nagra zur Etappe 1

Der für Etappe 1 SGT von der Nagra am 17. Oktober 2008 eingereichte Vorschlag geeigneter geologischer Standortgebiete für geologische Tiefenlager ist in folgendem Bericht begründet und dokumentiert:

NTB 08-03	Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse.
-----------	--

Nach Angaben der Nagra wurden für die Evaluation und Beurteilung der Standortmöglichkeiten alle verfügbaren, für die geologische Tiefenlagerung relevanten geologischen Informationen verwendet. Der erarbeitete technisch-wissenschaftliche Kenntnisstand soll es erlauben, geologische Standortgebiete für die anschliessenden Etappen im Sachplanverfahren fundiert vorzuschlagen.

Drei weitere Berichte, die wichtige Grundlagen für das Einengungsverfahren enthalten, wurden von der Nagra später nachgereicht:

NTB 08-04	Geologische Grundlagen; Textband und Beilagenband.
NTB 08-05	Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit.
NTB 08-06	Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien (MIRAM 08).

Diese Berichte stützen sich bei Detailbetrachtungen auf zahlreiche Referenzberichte ab, die das ENSI bei seiner Überprüfung ebenfalls berücksichtigt hat.

Im Zusammenhang mit der Begutachtung der eingereichten Unterlagen wurde vom ENSI und seinen Experten eine Reihe von spezifischen Fragen formuliert, die von der Nagra anschliessend beantwortet wurden. Die entsprechenden Antworten bilden einen weiteren Bestandteil der Dokumentation zu den Standortgebietsvorschlägen (NAB 09-29).

Die von der Nagra ebenfalls am 17. Oktober 2008 eingereichten Berichte NTB 08-01 (Entsorgungsprogramm) und NTB 08-02 (Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis) werden in diesem Gutachten nicht beurteilt. Für diese Berichte sind separate Stellungnahmen geplant.

1.4 Behördliche Überprüfung

Der Auftrag zur behördlichen Überprüfung des Vorschlags der Nagra für geologische Standortegebiete für das SMA- und das HAA-Lager ist im Konzeptteil (BFE 2008, Anhang V) festgehalten. Das ENSI (ehemals HSK) prüft und beurteilt den Vorschlag der Nagra aus Sicht der Sicherheit und der technischen Machbarkeit. Die Kommission für nukleare Sicherheit (KNS) verfasst zum entsprechenden Gutachten des ENSI eine Stellungnahme.

In geologischen und erdwissenschaftlichen Fragen wird das ENSI durch die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), das Bundesamt für Landestopografie (swisstopo, Landesgeologie), die Ingenieurgeologie der Eidgenössischen Technische Hochschule Zürich sowie eine Reihe spezialisierter privater Ingenieur- und Geologiebüros unterstützt. Deren Arbeiten sind in das vorliegende Gutachten eingeflossen.

Bei der Prüfung und Beurteilung der eingereichten Unterlagen stützen sich das ENSI und seine Experten auf die im Konzeptteil SGT (BFE 2008) beschriebenen Schritte und Fragestellungen, die im Auswahlverfahren anzuwendenden sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, die Kernenergiegesetzgebung sowie die Richtlinie ENSI-G03. Diese Richtlinie hat im April 2009 die im Konzeptteil SGT erwähnte Richtlinie HSK R-21 ersetzt².

Die behördliche Überprüfung durch das ENSI und deren Ablauf umfassten

1. die Grobprüfung der eingereichten Unterlagen (November/Dezember 2008),
2. das Erstellen des Gutachtens (Januar bis November 2009) durch
 - a. die detaillierte Überprüfung der Dokumentation und der nachgereichten Referenzberichte,
 - b. eigene Berechnungen zur Abfallzuteilung und zu den sicherheitstechnischen Anforderungen,
 - c. öffentliche Seminare zu aktuellen wissenschaftlichen Fragen der Themengebiete *quartäre Tiefenerosion* und *Neotektonik/Seismizität/Erosion*, um die Meinung breiter Fachkreise einzuholen,
 - d. eigene Untersuchungen zu quartärer Tiefenerosion und langfristigem Klimawandel,
 - e. regelmässige Fachsitzungen mit den Experten (KNE, swisstopo/Landesgeologie, Ingenieurgeologie der ETH Zürich, Emch+Berger AG, Dr. von Moos AG),
 - f. Formulierung von spezifischen Fragen an die Nagra durch das ENSI und seine Experten,
 - g. regelmässige Fachsitzungen zwischen ENSI und Nagra zur Erörterung der Fragen und der entsprechenden Antworten der Nagra,
3. das Vorliegen eines Gutachten-Entwurfs (November 2009), der an die Kommission für nukleare Sicherheit KNS (für die Vorbereitung ihrer Stellungnahme), an das BFE (zur formalen Prüfung des sachplankonformen Vorgehens und der Verständlichkeit), an die Experten des ENSI (zur Prüfung der korrekten Integrierung ihrer Beiträge) und an die Nagra (zur Prüfung der korrekten Zitierung ihrer Aussagen) versandt wurde,
4. die Schlussredaktion und der Druck des ENSI-Gutachtens (Dezember 2009/Januar 2010).

² Vorentwürfe der Richtlinie ENSI-G03 waren bereits während der Erarbeitung der Unterlagen zum SGT Etappe 1 für die Nagra verfügbar und wurden berücksichtigt. Die Richtlinie ENSI-G03 stimmt bezüglich wichtiger Teile mit der Vorgänger-Richtlinie HSK R-21 überein.

1.4.1 Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit für die Standortevaluation

Die im Auswahlverfahren von der Nagra anzuwendenden Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit wurden vom ENSI und seinen Experten vorgängig entwickelt und dokumentiert (HSK 33/001) sowie in den Konzeptteil SGT (BFE 2008) integriert.

Die erste Gruppe von Kriterien bezieht sich auf die Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, die für den Beitrag der Geosphäre zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems massgebend sind. Dazu gehören die räumliche Ausdehnung, die hydraulische Barrierenwirkung und die geochemischen Bedingungen. Darüber hinaus spielt auch die Beschaffenheit der potenziellen Freisetzungspfade für die Radionuklide aus dem geologischen Tiefenlager eine wichtige Rolle.

Die Barrierenwirkung der Geosphäre muss langfristig über die erforderlichen Zeiträume hinweg gewährleistet bleiben. Dafür sind die Kriterien der zweiten Kriteriengruppe anzuwenden, die sich auf die Langzeitstabilität des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beziehen. Dazu gehören die Beständigkeit der angesprochenen Eigenschaften und die Erosionsdynamik, die langfristig die Barrierenwirkung beeinträchtigen könnte. Das Verhalten des geologischen Umfelds gegenüber den lagerbedingten Einflüssen ist ebenfalls zu untersuchen. Um unbeabsichtigte menschliche Eingriffe möglichst zu verhindern, sollen schliesslich Gebiete mit aus heutiger Sicht nutzungswürdigen Rohstoffen gemieden werden, sofern deren Nutzung einen Konflikt mit dem geologischen Tiefenlager verursachen würde.

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

Die vierte Kriteriengruppe bezieht sich auf die Eignung des Gesteins im Hinblick auf Bau, Betrieb und Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Dabei werden die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen, sowie die Möglichkeiten zur untertägigen Erschliessung und zur Wasserhaltung angesprochen.

Die dreizehn Kriterien innerhalb der vier Kriteriengruppen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1.4-1: Kriterien zur Standortevaluation hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit (BFE 2008, HSK 33/001)

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

1.4.2 Prüfumfang

Die sicherheitstechnische Überprüfung und Beurteilung der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete und die Prüfung der bautechnischen Machbarkeit der geologischen Tiefenlager durch die Sicherheitsbehörde haben sich insbesondere auf die zentralen, im SGT für die Etappe 1 aufgeführten Fragen zu konzentrieren:

- Ist die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA nachvollziehbar?
- Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologisch-tektonische Situation, an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und an den Standort nachvollziehbar und genügend?
- Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke der Vororientierung?
- Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
- Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete transparent und nachvollziehbar?
- Können die Behörden den Vorschlägen aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

1.5 Gliederung des Gutachtens

Das vorliegende Gutachten enthält das Ergebnis der sicherheitstechnischen Überprüfung durch das ENSI. Eigene Berechnungen und weitere technische und wissenschaftliche Überlegungen, die zum Ergebnis der Überprüfung geführt haben, sind in separaten ENSI-Aktennotizen festgehalten, da sie den Rahmen des Gutachtens sprengen würden. Für die Beurteilung der von den Entsorgungspflichtigen in Etappe 1 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete folgt die Struktur

des Gutachtens direkt den fünf im Konzeptteil SGT vorgeschriebenen Schritten für Etappe 1 (siehe Kapitel 1.2):

Kapitel 2 ist der Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA (Schritt 1) gewidmet. Dabei ist zu überprüfen, ob die vorgeschlagene Zuteilung der Abfälle auf das HAA- und das SMA-Lager mit den Vorgaben des SGT übereinstimmt und nachvollziehbar ist.

In Kapitel 3 erfolgt die Prüfung und Beurteilung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologischen Standortgebiete (Schritt 2), die anhand der Abfallzuteilung auf die Lagertypen für SMA und HAA sowie auf der Grundlage von generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen abgeleitet wurden.

In Kapitel 4 wird überprüft, ob das Vorgehen zur Identifizierung der geologisch-tektonischen Grossräume (Schritt 3) sachplankonform, sicherheitsgerichtet und transparent ist.

In Kapitel 5 werden die Grundlagen und das Vorgehen beurteilt, die zur Auswahl der potenziell geeigneten Wirtgesteine (Schritt 4) verwendet wurden. Die von der Nagra für das SMA- und HAA-Lager vorgeschlagenen Wirtgesteine werden aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit begutachtet.

Kapitel 6 umfasst die Beurteilung der Grundlagen und des Vorgehens zur Identifikation geeigneter Konfigurationen und der von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete sowie deren Bewertung (Schritt 5).

Im abschliessenden Kapitel 7 werden die wesentlichen Feststellungen und Folgerungen aus der Überprüfung zusammengefasst. Dieses Kapitel enthält das Gesamturteil des ENSI zu den von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten in Etappe 1 des SGT.

2 Abfallzuteilung auf das SMA- und das HAA-Lager

Als ersten Schritt in Etappe 1 SGT müssen die Entsorgungspflichtigen die Zuteilung der Abfälle auf das Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA-Lager) und das Lager für hochaktive Abfälle (HAA-Lager) festlegen. Dabei sind grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten denkbar, die Abfälle der Abfallkategorien nach Art. 51 KEV (hochaktive Abfälle HAA, alphanukleare Abfälle ANA und schwach- und mittelaktive Abfälle SMA) auf die beiden Lagertypen aufzuteilen. Es ist Aufgabe der Entsorgungspflichtigen, geeignete Lösungen vorzuschlagen; diese werden durch die Behörden geprüft.

Im Folgenden werden das Vorgehen und die Grundlagen der Abfallzuteilung (Kapitel 2.1), die Angaben zum Abfallinventar (2.2), die Rechenfälle für die Zuteilung (2.3) und die resultierende Abfallzuteilung (2.4) beurteilt. Eine Zusammenfassung der Beurteilungsergebnisse befindet sich in Kapitel 2.5.

2.1 Vorgehen und Grundlagen

Angaben der Nagra

Die Abfallzuteilung hat zum Ziel, für die Ableitung der Anforderungen an das Barrierensystem (geologische Barriere, technische Barrieren) eine möglichst gute Ausgangslage zu schaffen. Dazu sollen einerseits Abfälle mit ähnlichen sicherheitsbezogenen Eigenschaften im gleichen Lager bzw. im gleichen Lagerkompartiment entsorgt werden. Andererseits sollen unter Berücksichtigung aller im Entsorgungskonzept vorgesehenen Lager (SMA, HAA) möglichst ausgewogene Anforderungen an das Barrierensystem und an das gesamte Lager (z. B. bezüglich des zuteilten Abfallvolumens) resultieren (NTB 08-05, S. 69).

Die Beschreibung der Abfalleigenschaften bildet den Ausgangspunkt für die Abfallzuteilung. Für diese Beschreibung werden die Abfälle in Übereinstimmung mit der KEV in die Kategorien HAA, ANA und SMA eingeteilt. Die Beschreibung zeigt, dass sich die Eigenschaften der HAA deutlich von denjenigen sowohl der ANA als auch der SMA unterscheiden. Deshalb werden die HAA in einem separaten Lager mit einem spezifisch auf die HAA abgestimmten Barrierensystem entsorgt (NTB 08-05, S. 80).

Grundsätzlich ist ein gemeinsames Lager für alle ANA und SMA denkbar. Die Erfahrung zeigt einerseits, dass ein solches Lager in einem günstigen Wirtsgestein in einer günstigen geologischen Situation das Potenzial hat, die behördlichen Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Andererseits dominieren erfahrungsgemäss einige wenige der ANA- und SMA-Sorten die berechneten Dosen. Falls also diese dosisdominierenden Abfallsorten anderweitig entsorgt werden könnten, würden sich deshalb bei gleich bleibender Sicherheit die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie entsprechend reduzieren, mit entsprechend erweiterten Möglichkeiten, geeignete geo-

logische Standortgebiete zu finden. Aus diesen Gründen wird am bisherigen Konzept mit einem HAA-Lager mit LMA-Teil (die LMA setzen sich aus SMA und ATA zusammen, die ins HAA-Lager eingebracht werden) und einem SMA-Lager festgehalten mit dem Ziel, die dosisdominierenden ATA- bzw. SMA-Sorten dem LMA-Teillager zuzuteilen, so dass die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie für das SMA-Lager entsprechend reduziert werden können.

Die ATA/SMA werden hauptsächlich aufgrund von generischen Dosisberechnungen auf die beiden Lager aufgeteilt, da sich die ATA und die SMA bezüglich Materialinventar und Gasbildungsrate nur geringfügig unterscheiden und da sowohl das HAA-Lager (inkl. LMA-Teil) wie auch das SMA-Lager so ausgelegt werden, dass von den Abfällen ausgehende lagerbedingte Einflüsse die Langzeitsicherheit nicht signifikant beeinträchtigen. Nach erfolgter Abfallzuteilung werden das Barrieren- und Sicherheitskonzept und die sicherheits- und bautechnischen Anforderungen an die Geologie für beide Lager festgelegt (NTB 08-05, S. 80).

Beurteilung des ENSI

Für die Zuteilung sind gemäss SGT in erster Linie folgende Abfalleigenschaften massgebend (BFE 2008, S. 57):

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

Die Nagra unterscheidet in ihren Berichten zwischen BE (abgebrannte Brennelemente), HAA (verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) und LMA (langlebige mittelaktive Abfälle). Im vorliegenden Gutachten versteht das ENSI unter HAA sowohl verglaste hochaktive Abfälle als auch abgebrannte Brennelemente, falls nicht anders vermerkt.

Die Beurteilung der ersten drei Abfalleigenschaften erfolgt in den Kapiteln 2.2 und 2.4. Die weiteren Eigenschaften werden hinsichtlich des Sicherheitskonzepts des Lagers und der lagerbedingten Einflüsse in Kapitel 3 diskutiert. Das Vorgehen und die Grundlagen für die Zuteilung der Abfälle auf die Lagertypen HAA und SMA wurden von der Nagra unter Berücksichtigung der Abfalleigenschaften in NTB 08-05 stufengerecht, transparent und nachvollziehbar dargelegt. Das Vorgehen der Nagra entspricht den Vorgaben des Sachplans.

2.2 Abfallinventar

Angaben der Nagra

In der Schweiz werden für die Erfassung der Abfalleigenschaften zwei verschiedene Wege verfolgt, die sich bezüglich Zielsetzung und Inhalt unterscheiden. Die vorhandenen bzw. jetzt anfallenden (realen) Abfälle werden in detaillierten Spezifikationen beschrieben und im «Informationssystem für Radioaktive Materialien» (ISRAM) erfasst und verwaltet. Dabei werden Einzelgebände mit vergleichbaren Eigenschaften zu Abfallgebändetypen zusammengefasst. Mit der Dokumentation der Abfallgebändetypen werden die heute anfallenden Gebände detailliert erfasst. Da jeweils kleine Modifikationen bei einem bestimmten Typ zu einem neuen Typ führen, ergibt sich eine grosse Zahl von Typen mit zum Teil sehr ähnlichen Eigenschaften. Dies hat zur Folge, dass eine umfangreiche Datenmenge entsteht mit einem Informationsumfang, der für viele Zwecke (z. B. für sicherheitstechnische Betrachtungen) zu detailliert ist. Parallel zu ISRAM wird daher ein «Modellhaftes Inventar Radioaktiver Materialien» (MIRAM) geführt (NTB 08-05, S. 36; NTB 08-06), in dem Abfallgebändetypen mit ähnlichen Eigenschaften zu Abfallsorten zusammengefasst werden.

Mit MIRAM werden für die Projektarbeiten Unterlagen zu den Abfällen in angemessenem Detaillierungsgrad zur Verfügung gestellt. Übergeordnetes Ziel von MIRAM ist die Vollständigkeit des beschriebenen Inventars für die ganze bei der Lagerplanung betrachtete Periode. Es umfasst deshalb im Gegensatz zu ISRAM auch Abfälle, welche zum heutigen Zeitpunkt noch nicht angefallen sind.

Um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, wird für die sicherheitstechnischen Betrachtungen ein klar definiertes und transparent abgeleitetes modellhaftes Nuklid- und Materialinventar benötigt. Dieses entspricht in NTB 08-05 grundsätzlich dem Referenzszenario «50 Jahre KKW-Betrieb» im MIRAM (NTB 08-06). Dieses Inventar ist genügend repräsentativ für zusätzliche KKW, welche – zusammen mit den bestehenden – durch ein umhüllendes Abfallinventar dargestellt werden.

Ausgangspunkt für die generischen Sicherheitsbetrachtungen ist das Szenario, welches die Abfälle aus den bestehenden KKW bei einer angenommenen Betriebsdauer von 50 Jahren und die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (MIF) umfasst, bei einer Sammelperiode bis Ende Einlagerung der Abfälle aus den bestehenden KKW in das SMA-Lager (bis 2050). Dies schliesst auch die Abfälle der Kleinproduzenten sowie Abfälle von grossen Forschungseinrichtungen (PSI, CERN) und Stilllegungsabfälle von Forschungsreaktoren und Einrichtungen verschiedener Hochschulen und Universitäten ein (NTB 08-05, S. 37).

Im Bereich Stilllegungsabfälle von Grossforschungsanlagen (PSI und CERN) macht die Nagra in NTB 08-03 (Tab. 2.2-1a) Angaben zu den erwarteten Volumen der PSI- und CERN-Abfälle. Auf Anfrage des ENSI erläuterte die Nagra, dass zu diesen Abfällen nur Angaben (Annahmen) zum Volumen gemacht werden (NAB 09-29), d.h. deren Radionuklide unberücksichtigt bleiben. Basierend auf ihren Erfahrungen beurteilt die Nagra diese Abfälle bezüglich ihres Nuklidinventars als unbedeutend.

Das im Konzeptteil des SGT festgelegte Auswahlverfahren soll zu geologischen Tiefenlagern führen, welche die Abfälle aus den bestehenden und allfälligen neuen KKW, aus deren Stilllegung und Abbruch sowie die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung (inkl. Stilllegung und Abbruch von Forschungsanlagen) aufnehmen können. Die Nagra verwendet deshalb das umhüllende Abfallinventar für die Festlegung der erforderlichen Lagerkapazität. Für dieses Inventar werden zusätzlich zu den Abfallmengen des Referenzszenarios diejenigen einer Verlängerung der Betriebsdauer der KKW um 10 Jahre und diejenigen aus einer zusätzlichen Elektrizitätsproduktion von 5 GWe während 60 Jahren durch neue KKW berücksichtigt werden (NTB 08-05, S. 105). Für die Abfallzuteilung beim umhüllenden Abfallinventar werden die Abfallmengen skaliert, unter Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls der Abfälle aus der Verpackungsanlage für Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle. Dies ergibt für das SMA-Lager einen Platzbedarf von 200'000 m³ für in Endlagerbehälter verpackte Abfälle, für das HAA-Lager einen solchen von 20'000 m³ für die hochaktiven Abfälle und 7'500 m³ für LMA (gerundete Zahlen). Unter Berücksichtigung der Ungewissheiten können die Schlussfolgerungen bezüglich Abfallzuteilung, Barrierenkonzept und sicherheitstechnischer Anforderungen grundsätzlich auch für das umhüllende Abfallinventar verwendet werden (NTB 08-05, S. 37).

Beurteilung des ENSI

Die Angaben der Nagra zum Abfallinventar wurden vom ENSI geprüft und in einer Aktennotiz (ENSI 33/54) dokumentiert. Nach Ansicht des ENSI ist das Vorgehen der Nagra für die Herleitung der MIRAM-Daten auf der Basis der Datenbank ISRAM zweckmässig. Die Erfassung der Abfälle mit Hilfe von Abfallgebindetypen im ISRAM sowie die Zuordnung der Abfallgebindetypen zu den MIRAM-Abfallsorten sind nachvollziehbar und vollständig.

Die Methoden der Charakterisierung und Inventarisierung der verschiedenen Abfallkategorien werden als angemessen beurteilt. Die Abfalldokumentationen in MIRAM enthalten die erforderlichen Informationen für die Sicherheitsbetrachtungen. Die Angaben zu den Abfallvolumina und die angegebenen abdeckenden Aktivitätsinventare für das Referenzszenario sowie das Szenario mit 60 Jahre Betrieb der bestehenden Werke und das Szenario mit einer zusätzlichen Elektrizitätsproduktion von 5 GWe durch neue KKW entsprechen den Vorgaben im Konzeptteil SGT (BFE 2008, Kap. 2.5) und werden als stufengerecht beurteilt.

Im Bereich der Stilllegungsabfälle von Grossforschungsanlagen (PSI und CERN) ist aus Sicht des ENSI festzuhalten, dass im Rahmen der Etappe 1 primär eine Abschätzung des Platzbedarfs für diese Abfälle im Lager notwendig ist. Da das zu erwartende Nuklidinventar dieser Abfälle nur in geringem Masse zur Gesamtdosis beiträgt, ist es für Etappe 1 SGT zulässig, auf eine Quantifizierung des Nuklidinventars zu verzichten. Die Bemühungen zur Charakterisierung des Nuklidinventars und Materialstroms dieser Abfälle sind weiterzuführen; die aktualisierten Daten sind für die weiteren Schritte im Sachplanverfahren zu dokumentieren.

2.3 Rechenfälle für die Zuteilung des Abfallinventars

Angaben der Nagra

Die Auswahl der den sicherheitstechnischen Betrachtungen zugrunde liegenden sicherheitsrelevanten Radionuklide (NTB 08-05, Tab. A3.1-2) leitet die Nagra für Brennelemente und verglaste hochaktive Abfälle und LMA in Anlehnung an das Projekt Entsorgungsnachweis ab (NTB 02-06, Tab. A5-1). Zusätzlich gilt neu ein Nuklid für die LMA als sicherheitsrelevant, falls es für die SMA als sicherheitsrelevant gilt. So wird sichergestellt, dass bei Abfallzuteilungen, bei denen ein Teil der SMA dem LMA-Teillager zugeteilt wird, die entsprechenden Nuklide ebenfalls berücksichtigt werden. Die Auswahl von sicherheitsrelevanten Radionukliden für ein SMA-Lager wird in Anlehnung an das Projekt Wellenberg (NTB 94-06) vorgenommen.

Die dosisdominierenden Abfallsorten aus den Abfallkategorien ATA und SMA werden nach folgendem Schema identifiziert: Ausgehend vom Inventar, bestehend aus allen Abfallsorten der Kategorien ATA und SMA, werden sicherheitstechnische Berechnungen für ein generisches SMA-Lager und für ein breites Spektrum von generischen Wirtgesteinstypen und -situationen durchgeführt. Diese Berechnungen betreffen die Zeitperiode, während der die Abfälle ein im Vergleich zu natürlichen radiologischen Umweltrisiken erhöhtes radiologisches Gefährdungspotenzial darstellen und während der das Barrierensystem seine Sicherheitsfunktionen erfüllen muss.

Für noch grössere Zeiträume kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Bereich mit den Lagerkammern³ aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt wird. Für diese Zeiträume und für dieses Szenario werden vereinfachte Berechnungen durchgeführt. Sämtliche Berechnungen werden so strukturiert, dass der Einfluss der einzelnen Abfallsorten auf die berechnete Dosis sehr einfach analysiert werden kann (NTB 08-05, S. 81).

Nahfeld SMA-Lager

Im Falle des SMA-Lagers wird für den Beginn der Freisetzung der Radionuklide konservativ angenommen, dass sie sich bereits unmittelbar nach Lagerverschluss homogen über das Zementporenwasser und die Festphasen des gesamten Kaverneninneren verteilt haben und sich die wässrige Phase mit den sorbierten Anteilen im geochemischen Gleichgewicht befindet. Das ¹⁴C-Inventar in den Abfällen wird abfallspezifisch in die drei Fraktionen «anorganisch», «organisch mit instantaner Freisetzung» und «organisch mit kongruenter Freisetzung» eingeteilt. Für die kongruente Freisetzung wird angenommen, dass sie im Gleichschritt mit der Korrosion der Abfallmatrix (z. B. aktivierter Stahl) erfolgt. Basierend auf pessimistischen Annahmen bezüglich Korrosionsrate und Geometrie der korrodierenden Stahlteile wird vereinfachend eine konstante fraktionale Freisetzungsrates von 10^{-4} pro Jahr angenommen (NTB 08-05, S. A4-5). Die Radionuklidsorption in den Komponenten des zementierten Nahfelds wird durch elementspezifische Sorptionskoeffizienten beschrieben, welche die organischen Materialanteile im Rohabfall sowie die kontinuierliche Degradation (Auslaugung) des Zements berücksichtigen (NTB 08-05, S. 45).

³ Die Lagerkammern enthalten die eingelagerten Abfälle. Dabei wird seitens der Nagra begrifflich unterschieden zwischen Lagerkavernen (SMA-Lager), Lagertunneln (LMA-Teil des HAA-Lagers) und Lagerstollen (für die Lagerbehälter mit hochaktiven Abfällen im HAA-Lager).

Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv/dispersiv bzw. diffusiv aus dem (modellhaft) als homogen angenommenen Kaverneninneren (Abfallmatrix, Endlagerbehälter inklusive Verfüllung, Kavernenverfüllung) unter Berücksichtigung der Sorption und des radioaktiven Zerfalls durch die Kavernenverkleidung und die Auflockerungszone ins umgebende Wirtgestein.

Nahfeld HAA-Lager

Die Radionuklid-Freisetzung aus dem Nahfeld des HAA-Lagers mit abgebrannten Brennelementen, verglasten hochaktiven Abfällen bzw. langlebigen mittelaktiven Abfällen wurde mit dem Rechenprogramm STMAN modelliert (NTB 02-06, S. A-2; NTB 08-05, S.50). Das Programm berechnet

a) im Fall der HAA:

- die Freisetzung der Radionuklide aus der Abfallmatrix ins Bentonit-Porenwasser unter Berücksichtigung der beschränkten (elementspezifischen) Löslichkeiten (ab dem Zeitpunkt des Behälterversagens),
- die Diffusion der Radionuklide durch die Bentonitverfüllung und deren Sorption auf Bentonit,
- die Freisetzung der Radionuklide ins Porenwasser an der Schnittstelle Bentonit-Wirtgestein.

b) im Fall der LMA:

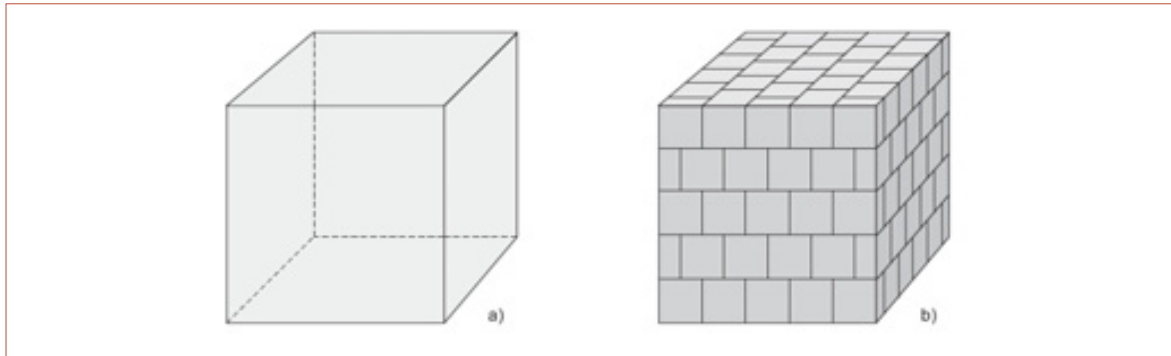
- die Mobilisierung der Radionuklide im Zement-Porenwasser unter Berücksichtigung der Löslichkeit und der Sorption im Zementnahfeld,
- die diffusive Freisetzung der Radionuklide ins Grundwasser an der Schnittstelle Tunnelverkleidung-Wirtgestein.

Eine Beschreibung der STMAN-Modellparameter für die Berechnung der (diffusiven) Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld des LMA-Teillagers ist in NTB 08-05, S. A3-17, dokumentiert. Zusätzlich wurden für LMA auch Berechnungen mit advektiver Freisetzung mit dem Rechenprogramm VPAC durchgeführt (siehe z. B. NTB 08-05, Fig. A5.2-6).

Konzeptualisierung des Wirtgesteins und der geologischen Situation

Der Zielsetzung des SGT entsprechend werden die sicherheitstechnischen Untersuchungen für ein breites Spektrum verschiedener generischer geologischer Situationen durchgeführt. In diesem Sinne werden die folgenden Möglichkeiten zur Konzeptualisierung des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) betrachtet (Figur 2.3-1):

- homogen-poröses WG (EG) mit isotroper oder anisotroper grossräumiger hydraulischer Durchlässigkeit,
- engständig geklüftetes WG (EG),
- WG (EG) mit Störungszonen,
- WG (EG) mit schichtförmig horizontalen Architekturelementen mit oder ohne Klüftung,
- WG/EG mit unregelmässig angeordneten horizontalen Architekturelementen mit oder ohne Klüftung.



Figur 2.3-1: Beispiele für die Konzeptualisierung des Wirtgesteins (WG) bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (EG) als a) homogen-poröses WG/EG und b) geklüftetes WG/EG (NTB 08-05, S. 52).

Erfolgt der Wasserfluss bzw. der Radionuklidtransport entlang diskreter wasserführender Strukturen (engständige Klüfte, grossräumige Störungszonen), können die gelösten Stoffe ins stagnierende Porenwasser der angrenzenden Gesteinsmatrix diffundieren (Matrixdiffusion).

Rechenfallfamilien

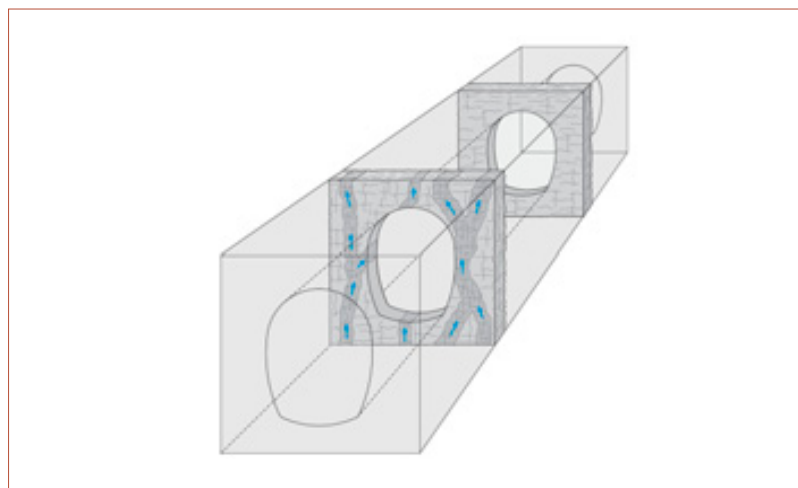
Ausgehend von der Beschreibung von möglichen generischen Wirtgesteinstypen bzw. geologischen Situationen und deren Modellierung und unter Berücksichtigung des Lagerkonzepts und der technischen Barrieren für ein generisches SMA-Lager werden die folgenden Rechenfallfamilien R1 bis R5 bzw. Parametervariationen definiert (NTB 08-05, S. 88 – 92):

- R1 Homogen-poröses Wirtgestein ohne Störungszonen
- R2 Geklüftetes Wirtgestein ohne Störungszonen
- R3 Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen (ohne Channeling)
- R4 Homogen-poröses Wirtgestein mit zwei vertikalen Störungszonen (mit Channeling, Figur 2.3-2)
- R5 Erosive Freilegung des Lagers nach langen Zeiten

Für die Rechenfallfamilien R1 – R4 gilt:

- Verwendete Rechenprogramme: VPAC (NAB 08-05, Nahfeld); PICNIC (NTB 01-03, Geosphäre) und TAME (NTB 02-06, Biosphäre)

Figur 2.3-2: Konzeptualisierung von Störungszonen, die eine SMA-Kaverne schneiden. Allenfalls vorhandene präferenzielle Fliesspfade («Channels») mit erhöhter Transmissivität sind in dunkelgrauer Farbe und mit blauen Pfeilen versehen eingezeichnet (NTB 08-05, S. 54).



- Konzeptualisierung der Nahfeld-Freisetzung: Radionuklid-Freisetzung aus einer Fläche im Abstand von 1 m von den Kavernenwänden (VPAC) bildet Quellterm für PICNIC
- Ausgangsinventar: Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW)
- Hydraulischer Gradient i : 0.1 m/m (vertikal)
- Hydraulische Durchlässigkeit K : 10^{-13} bis 10^{-7} m/s
- Geosphären-Transportpfadlänge L : 50 m
- Geosphären-Sorptionsdatensätze: Tonstein-Datensatz (eher günstig) und Calcit-Datensatz (pessimistisch)
- Biosphäre: Verwendung von mit TAME berechneten Referenzfall-Biosphärentransferkoeffizienten (NTB 08-05, Tab. A3.4-1)

Zusätzlich wird für die Rechenfallfamilie R2 die folgende Annahme getroffen:

- Transmissivität der Klüfte $T_{K.}$: 10^{-9} und 10^{-8} m²/s (für $K = 10^{-10}$ m/s) resp. 10^{-8} und 10^{-7} m²/s (für $K = 10^{-9}$ m/s)

Zusätzlich werden für die Rechenfallfamilien R3 bzw. R4 folgende Annahmen getroffen:

- Transmissivität der Störungszonen $T_{St.Z.}$: 10^{-8} und 10^{-7} m²/s
- Transmissivität der Fliesspfade innerhalb der Störungszonen (Channeling, nur R4)
 $T_{Ch.} = 10 \times T_{St.Z.}$

Erosive Freilegung eines Tiefenlagers (R5)

Die radiologischen Konsequenzen der erosiven Freilegung eines Tiefenlagers werden mit der Freisetzung von im Grundwasser gelösten Radionukliden aus den nahe an der Erdoberfläche liegenden Lagerkammern in einen Grundwasserträger (Modell 1, NTB 08-05, S.61) betrachtet. Dabei wird von einer Dauer von 100'000 Jahren ausgegangen, bis das Lager in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt. Ab diesem Zeitpunkt wird das gesamte Inventar über einen Zeitraum von 1'000 Jahren gleichmässig in einen Aquifer mit einem Wasserfluss von 10^6 m³/a freigesetzt. Die Bewohner der Region decken ihren gesamten Trinkwasserbedarf (2 Liter/Tag und Person) aus diesem Aquifer. Das betrachtete Ausgangsinventar entspricht der Summe aller ATA und SMA (50 Jahre Betrieb der bestehenden KKW).

Die Nagra hat in NTB 08-05, S. A5-4, dargelegt, für welchen Zeitraum die Geosphäre Schutz vor einer erosiven Beeinträchtigung des Barrierensystems bieten muss. Diese Analysen zeigen, dass auch für vereinfachte, z. T. konservative Annahmen dieser Zeitraum für SMA-Lager im Bereich von 100'000 Jahren und für HAA-Lager im Bereich von 1 Million Jahren liegt.

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Überprüfung der Rechenfälle für die generischen Sicherheitsbetrachtungen in einer Aktenotiz (ENSI 33/55) ausführlich beschrieben. Die relevanten Punkte sind im Folgenden zusammengefasst:

Das in NTB 02-06 (Appendix 5) aufgeführte Kriterium zur Bestimmung der sicherheitsrelevanten Nuklide erachtet das ENSI als zweckmässig. Die von der Nagra als Limite vorgesehene Trinkwasserdosis von 10^{-5} mSv/Jahr entspricht einem Zehntausendstel des in Schutzkriterium 1

Wirtgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Das Wirtgestein nimmt die Lagerkammern des geologischen Tiefenlagers auf und verhindert oder verzögert die Ausbreitung radioaktiver Stoffe (Barrierenwirkung). Kristalline Gesteine werden insbesondere in den skandinavischen Ländern als Wirtgesteine verwendet (Tiefenlager im Bau und im Betrieb). Salz als Wirtgestein ist eine in Deutschland verfolgte und in den USA bereits umgesetzte Option. Tongesteine werden in Europa insbesondere von den Ländern Frankreich, Belgien und der

Schweiz als Option verfolgt. Entsprechend international ist jeweils auch die Forschung zu diesen Wirtgesteinen, so auch in den in der Schweiz betriebenen Felslabors am Grimsel (Kristallgestein) und Mont Terri (Tongestein). Ober- und unterhalb des Wirtgesteins liegende Gesteine, so genannte Rahmengesteine, können ebenfalls zum Einschluss der radioaktiven Abfälle beitragen. Wirt- und Rahmengesteine werden als einschlusswirksamer Gebirgsbereich bezeichnet. Sie dürfen keine wichtigen wasserdurchlässigen Schichten (regionale Aquifere) enthalten.



der Richtlinie ENSI-G03 festgesetzten Wertes. Die von der Nagra getroffene Auswahl der sicherheitsrelevanten Nuklide für die weitere Berechnung der Nuklidfreisetzung wurde vom ENSI mit eigenen Berechnungen überprüft und wird als korrekt beurteilt.

Die von der Nagra dokumentierte Konzeptualisierung der möglichen Wirtgesteine ist stufengerecht. Mit den darauf beruhenden sicherheitstechnischen Berechnungen lassen sich die Anforderungen an die Wirtgesteine ableiten. Das ENSI stimmt der Wirtgesteinkonzeptualisierung der Nagra zu. Sie deckt die in der Schweiz vorkommenden Wirtgesteinsformationen hinreichend ab.

Das ENSI stimmt der Auswahl der Rechenfallfamilien für die generischen Sicherheitsbetrachtungen zu. Die Rechenfälle umfassen die grundsätzlichen Varianten möglicher in Frage kommender Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche. Die in den Berechnungen verwendeten Parameter decken den Kenntnisstand der Eigenschaften der Wirtgesteine ab (die geochemischen Parameter werden in Kapitel 3.2 beurteilt). Da die Sicherheitsbetrachtungen generischer Natur sind, hat die Nagra auf Anfrage des ENSI zusätzlich dokumentiert (NAB 09-29), welchen Wirtgesteinkonzeptualisierungen die in Etappe 1 SGT als bevorzugt betrachteten Gesteinsformationen zugeordnet werden. Diese Zuteilung ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar.

Die Nagra hat mit der Berechnung der möglichen radiologischen Folgen aus der erosiven Freilegung des Tiefenlagers die Forderung der ENSI-G03 stufengerecht umgesetzt. Das ENSI bewertet die Herleitung des Betrachtungszeitraums in Kapitel 3.4. Die Argumente und Schlussfolgerungen der Nagra sind für das ENSI nachvollziehbar.

2.4 Zuteilung der Abfälle auf das SMA- und das HAA-Lager

Angaben der Nagra

Die Nagra hat die Resultate der sicherheitstechnischen Berechnungen mit Vorgaben bezüglich der maximal zulässigen Dosis ausgewertet (NTB 08-05, S. 81). Eine solche Analyse erlaubt zwei Arten von Schlussfolgerungen:

- Sie zeigt auf, welche Wirtgesteinstypen und -situationen voraussichtlich für ein geologisches Tiefenlager für sämtliche ATA und SMA geeignet wären.
- Sie zeigt auf, für welche Wirtgesteinstypen und -situationen bei Wegnahme von bestimmten dosisdominierenden Abfallsorten die vorgegebene Dosislimite voraussichtlich eingehalten werden kann.

Für jeden Rechenfall ergibt sich so eine Liste mit den dem HAA-Lager (Teil LMA) zuzuteilenden ATA/SMA-Sorten. Dabei ist es wichtig, nur diejenigen Rechenfälle zu betrachten, bei denen bei ausgewogenen sicherheitstechnischen Anforderungen an die Geologie noch ein vertretbares Abfallvolumen im SMA-Lager verbleibt; d. h. ein Volumen, das den Bau eines SMA-Lagers rechtfertigt (NTB 08-05, S. 81).

Die erhaltenen Listen mit den dem HAA-Lager (Teil LMA) zuzuteilenden Abfallsorten werden zu einer einzigen Liste zusammengefasst, die alle dosisdominierenden ATA/SMA-Sorten umfasst. Dies erlaubt die Definition eines reduzierten Inventars für das SMA-Lager, welches alle ATA/SMA-Sorten umfasst, abzüglich der dem HAA-Lager (Teil LMA) zugeteilten Abfallsorten (NTB 08-05, Tab. A4.6-18).

Die Nagra schlägt zwei Varianten der Abfallzuteilung vor, ausgedrückt je als Liste derjenigen SMA, die zusätzlich zu allen ATA dem LMA-Teillager zugeteilt werden (NTB 08-05, Tab. 3.3-6 und 3.3-7). Die beiden Varianten sind charakterisiert durch eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins von $K = 10^{-10}$ m/s und 10^{-9} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von $K = 10^{-10}$ m/s oder kleiner gibt, wird die entsprechende Zuteilungsvariante als Referenzzuteilung (RZ) bezeichnet, die andere (10^{-9} m/s) als alternative Zuteilung (AZ). Zusammenfassend schlägt die Nagra vor, ein Volumen von 2'710 m³ bzw. 8'510 m³ für die Fälle Referenzzuteilung bzw. alternative Zuteilung (NTB 08-05, Tab. 3.3-8 und 3.3-9) jeweils dem LMA-Teil des HAA-Lagers zuzuteilen.

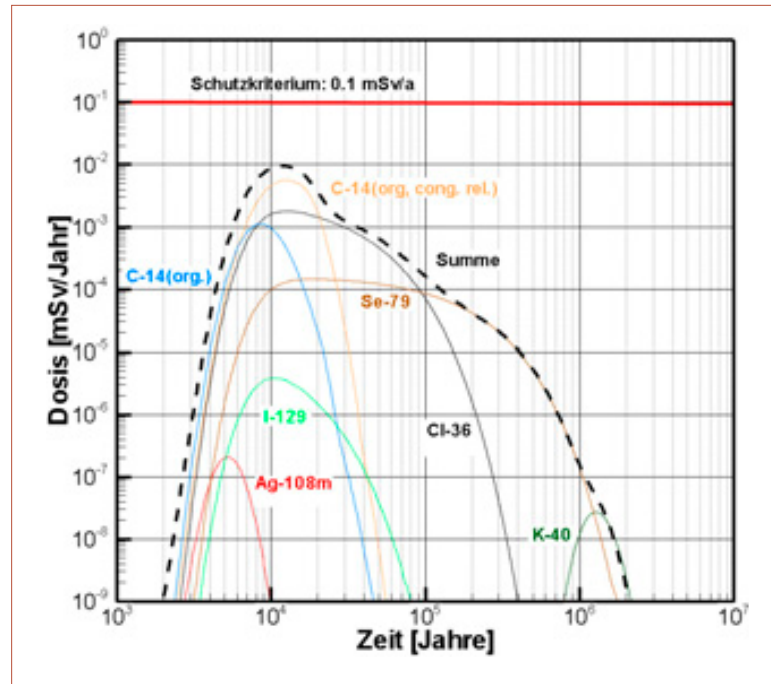
Die Mindestanforderung von $K \leq 10^{-9}$ m/s für das SMA-Lager wird in späteren Teilschritten basierend auf den Resultaten der Evaluation der Eigenschaften der bevorzugten Wirtgesteine modifiziert und für die Bewertung der Wirtgesteine und die nachfolgenden Schritte auf 10^{-10} m/s festgelegt (NTB 08-03, S. 119).

Beurteilung des ENSI

Ausgehend vom modellhaften Inventar für radioaktive Materialien MIRAM hat das ENSI die gesamten Aktivitäten für jedes Nuklid als Summe der Nuklidvektoren der betrachteten Abfallsorten berechnet. Diese Aktivitäten bildeten den Quellterm für die Ausbreitungsberechnungen des ENSI mit den Programmen TOUGH2 und COMSOL, mit denen die Varianten der Abfallzuteilung und ihre Auswirkungen auf die Dosis für ein SMA-Lager untersucht wurden. Zur Überprüfung der von der Nagra vorgeschlagenen Abfallzuteilung hat das ENSI eigene Berechnungen für alle Rechenfallfamilien durchgeführt (z. B. Figur 2.4-1) und dokumentiert (ENSI 33/55).

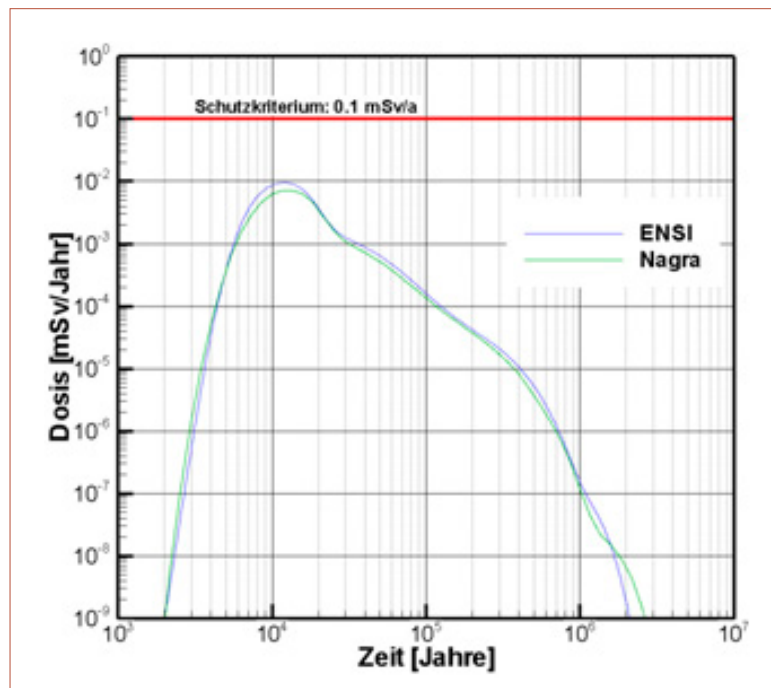
Figur 2.4-1:

Resultate der vom ENSI berechneten Dosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein für die dosisdominierenden Radionuklide basierend auf der Referenzzuteilung; hydraulischer Gradient: 0.1 m/m; hydraulische Durchlässigkeit: $K = 10^{-10}$ m/s; Transportpfadlänge: 50 m; Sorption: Tonstein-Datensatz (vgl. Rechenfallfamilie R1, NTB 08-05, Fig. 3.3-6).



Figur 2.4-2:

Vergleich der vom ENSI (blau) und der Nagra (grün) berechneten Gesamtdosen für ein SMA-Lager in einem homogen-porösen Wirtgestein ($K = 10^{-10}$ m/s) (vgl. Rechenfall R1, NTB 08-05, Fig. 3.3-6).



Das Vorgehen der Nagra, den Beitrag einzelner Abfallsorten zu berechnen und für alle Rechenfallfamilien zu prüfen, welche Abfallsorten aus dem SMA-Lager entfernt und dem HAA-Lager zugeteilt werden müssen, ist nach Ansicht des ENSI transparent und zielführend.

Das ENSI hat mit eigenen Berechnungen den Nuklidtransport in homogen-porösen Wirtgesteinen (Rechenfallfamilien R1, R3 und R4) überprüft und kann die Ergebnisse der Nagra nachvollziehen. Das ENSI erhält etwas grössere maximale Dosen als die Nagra, die aber noch deutlich unterhalb des Schutzkriteriums 1 der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr liegen (Figur 2.4-2). Die von der Nagra abgeleiteten Anforderungen an die hydraulischen Durchlässigkeiten der Wirtgesteine für ein SMA-Lager sind deshalb aus Sicht des ENSI nachvollziehbar.

Für die Rechenfallfamilie R2 (geklüftete Wirtgesteine) verwendet das ENSI ein zweidimensionales Modell, das den Nuklidtransport im Nah- und Fernfeld gemeinsam berechnet und das Wirtgestein durchgängig als geklüftetes Medium voraussetzt. Die Nagra legt hingegen für die Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld den Ansatz eines homogen-porösen Wirtgesteins zugrunde. Der berechnete Nuklidfluss in einem Meter Abstand von den Kavernenwänden wird von der Nagra als Quellterm für die Berechnung des Nuklidtransports im Fernfeld eines geklüfteten Wirtgesteins verwendet. Die Berechnungen des ENSI zur Rechenfallfamilie R2 zeigen, dass sowohl mit der Referenz- als auch der alternativen Zuteilung der Abfälle das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a nicht überschritten wird. Die aus den Berechnungen abgeleiteten Anforderungen der Nagra an die hydraulischen Durchlässigkeiten der Wirtgesteine sind deshalb nachvollziehbar.

Das ENSI ist mit dem Vorgehen der Nagra und mit der vorgeschlagenen Abfallzuteilung einverstanden.

2.5 Zusammenfassende Beurteilung der Abfallzuteilung

Die Nagra hat das zugrunde liegende Inventar und die Zuteilung der Abfälle auf das SMA-Lager und HAA-Lager transparent und nachvollziehbar dargelegt. Das ENSI erachtet die von der Nagra gewählte Abfallzuteilung für plausibel und kann ihr zustimmen. Die zugrunde gelegten Rechenfälle sind ausreichend, um die Ausbreitung von Radionukliden aus dem Nahfeld eines Tiefenlagers durch die in Frage kommenden Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche zu beschreiben.

3 Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben an die geologische Barriere

Gemäss SGT (BFE 2008) müssen die Entsorgungspflichtigen basierend auf dem zugeteilten Abfallinventar das Sicherheitskonzept für die beiden Lagertypen SMA und HAA beschreiben, anhand von generischen (orientierenden) Sicherheitsbetrachtungen die quantitativen und qualitativen Anforderungen sowie die Zielvorgaben an die geologische Barriere darlegen und die sicherheitstechnischen Kriterien so weit als möglich quantifizieren.

Dazu haben sie für die beiden Lagertypen folgende Vorgaben festzulegen und zu erläutern (BFE 2008, S. 57):

- Barrieren- und Sicherheitskonzept des Lagers,
- Erwartete Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des gesamten Lagers,
- Quantitative Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre bezüglich des zu betrachtenden Zeitraumes, der Grösse und des Platzbedarfs des Lagers,
- Quantitative Zielvorgaben bezüglich Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches,
- Qualitative Bewertungsskala (z. B. sehr günstig/günstig/bedingt günstig/ungünstig) für die Anwendung der weiteren Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit (vgl. Tabelle 1.4-1). Der Bewertungsmassstab wird in Bezug auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft erläutert. Neben der qualitativen Bewertungsskala ist auch das Vorgehen bei der zusammenfassenden Bewertung zu beschreiben. Die zusammenfassende Bewertung der geologischen Standortgebiete ist auf einer entsprechenden qualitativen Bewertungsskala der Eignung (das heisst: sehr geeignet/geeignet/bedingt geeignet/weniger geeignet) darzustellen.

Im Folgenden werden Barrieren-, Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen für das SMA- und HAA-Lager (Kapitel 3.1), die Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Langzeitsicherheit (Kapitel 3.2), die lagerbedingten Einflüsse (Kapitel 3.3) und die Herleitung der Anforderungen an die Geologie (Kapitel 3.4) besprochen. Die Ergebnisse werden in Kapitel 3.5 zusammengefasst.

3.1 Barrieren-, Sicherheitskonzepte und Sicherheitsfunktionen für SMA- und HAA-Lager

Angaben der Nagra

Das Barrierenkonzept beschreibt die funktionale Beschaffenheit der verschiedenen technischen und geologischen Barrieren des Tiefenlagers. Es basiert auf einem System von gestaffelten passiven Sicherheitsbarrieren, bestehend aus folgenden Elementen:

Tabelle 3.1-1: Barrierenkonzept gemäss NTB 08-05, S. 110

Abfall	Abfallmatrizen	Behälter	Verfüllung	Geosphäre
HAA	Brennstofftabletten bzw. Glasmatrix	Stahlbehälter (oder Behälter aus alternativen Materialien)	Bentonit	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
LMA/SMA	Verfestigungsmatrizen	Betoncontainer	zementbasierter Mörtel	einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Das Sicherheitskonzept zeigt auf, wie die verschiedenen technischen und geologischen Barrieren zur Sicherheit des Gesamtsystems beitragen (NTB 08-03, S. 20). Generell wird ein Sicherheitskonzept angestrebt, bei dem sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren (Wirtgestein, allenfalls vorhandene Rahmengesteine und ihre geologische Situation) in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beitragen. Gemäss diesem Grundsatz werden Sicherheitskonzepte, die sich praktisch vollständig auf die Barrierenwirkung der technischen Barrieren abstützen (z. B. Kupferbehälter in durchlässigeren Gesteinsformationen) oder bei denen die technischen Barrieren praktisch nicht zur Barrierenwirkung beitragen (z. B. nicht sorbierendes Verfüllmaterial in Lagerkammern und Zugangsbauwerken, Lager mit Langzeitkontrolle ohne Verfüllung) bei der Evaluation der Standortmöglichkeiten nicht in Betracht gezogen. Des Weiteren werden Wirtgesteine nicht betrachtet, die zwar von einschlusswirksamen Rahmengesteinen umschlossen sind, sonst aber über keine eigene Barrierenwirkung verfügen (z. B. höher durchlässige Fremdgesteinseinschlüsse).

Die Elemente des Barrierensystems gewährleisten eine Reihe von Sicherheitsfunktionen, welche einen unerwünschten direkten Kontakt des Menschen mit den radioaktiven Abfällen verhindern, die Freisetzung von Radionukliden aus dem geologischen Tiefenlager klein halten und damit die radiologische Langzeitsicherheit des Tiefenlagers und den Schutz des spaltbaren Materials vor unerwünschtem menschlichen Zugriff gewährleisten.

Die Sicherheitsfunktionen umfassen (NTB 08-05, S. 118):

- die physische Trennung der Abfälle vom menschlichen Lebensraum («Isolation»),
- die Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität («Stabilität»),
- den Einschluss der Radionuklide («Einschluss»),
- verzögerte Freisetzung der Radionuklide («verzögerte Freisetzung»),
- die Radionuklidrückhaltung im Nahfeld und in der Geosphäre («Rückhaltung»),
- kleine Freisetzungsraten.

Beurteilung des ENSI

Die Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers ist durch ein System gestaffelter, passiv wirkender technischer und natürlicher Barrieren (Mehrfachbarrierensystem, Art. 11 Abs. 2 Bst. b KEV) zu gewährleisten. Das ENSI beurteilt das von der Nagra im Lagerkonzept vorgesehene Mehrfachbarrierensystem als geeignet, um den im KEG und in der Richtlinie ENSI-G03 geforderten dauernden Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten. Der Grundsatz, dass sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren in signifikantem Masse zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems beitragen, entspricht den gesetzlichen Vorgaben.

Die Richtlinie ENSI-G03 fordert im Sinne einer Optimierung der Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers, dass die Lagerbehälter für hochaktive Abfälle auf einen vollständigen Einschluss der Radionuklide während 1'000 Jahren ab deren Einlagerung auszulegen sind. Die von der Nagra vorgesehene Verwendung dickwandiger Endlagerbehälter aus Stahl (bzw. aus alternativen Materialien) für hochaktive Abfälle setzt diese behördliche Forderung um.

Das ENSI betrachtet die Verwendung von Bentonit als Verfüllmaterial für ein HAA-Lager als vorteilhaft. Bentonit bietet dank seiner Quellfähigkeit viele Vorteile. Er übernimmt eine Schutzfunktion für den Endlagerbehälter und die enthaltenen Abfälle gegen innen sowie das Wirtgestein gegen aussen, indem er durch seine mechanischen Eigenschaften die untertägigen Bauwerke stabilisiert und die Nuklidfreisetzung aufgrund seiner Porenraumgeometrie und geochemischen Eigenschaften begrenzt.

Nach Ansicht des ENSI ist die Verwendung von hochporösem Mörtel für die Verfüllung der SMA-Lagerkavernen und LMA-Tunnel sinnvoll. Dieser Mörtel besitzt günstige mechanische Eigenschaften und begrenzt durch Sorption die Radionuklidfreisetzung. Die Porosität der Zementverfüllung erlaubt es zudem, die durch Korrosion/Degradation⁴ entstehenden Gase bis zu einem gewissen Masse im Porenvolumen zu speichern.

Das ENSI erachtet es als günstig, wenn die geochemischen Bedingungen und die Gesteinsbeschaffenheit zu einem guten Radionuklid-Rückhaltevermögen im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen und zugleich geochemische Bedingungen vorliegen, welche die Radionuklid-Rückhaltung in den technischen Barrieren begünstigen und zur langfristigen Beständigkeit der Eigenschaften der technischen Barrieren im Tiefenlager beitragen.

3.2 Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Langzeitsicherheit

Die Rückhaltung der Radionuklide im Nahfeld des Tiefenlagers und in der Geosphäre (Sicherheitsfunktion Rückhaltung) wird durch die Auswahl geeigneter Behältermaterialien, Abfallmatrixen und durch chemische Prozesse (Ausfällung der Radionuklide als Festphasen, Sorptions-

⁴ Mit Degradation wird die Zersetzung von chemischen Verbindungen bezeichnet. Diese kann entweder katalytisch durch Mikroorganismen oder chemisch durch die vorherrschenden Bedingungen erfolgen.

verhalten) in den technischen und natürlichen Barrieren bestimmt. Zudem hängt sie von den Transporteigenschaften dieser Barrieren ab, welche im Kapitel 3.1 diskutiert wurden. Die Überprüfung des ENSI konzentriert sich daher in den nächsten Abschnitten auf die chemischen Prozesse, die die Rückhaltung der Radionuklide beeinflussen.

Die chemische Zusammensetzung des Porenwassers und die chemischen Eigenschaften der Mineraloberflächen des Verfüllmaterials sind von zentraler Bedeutung für die Mobilität der Radionuklide im Tiefenlager. Die Porenwasserchemie bestimmt massgeblich die Speziation der chemischen Elemente, d. h. die Verteilung eines Elements auf seine verschiedenen chemischen Formen. Zusammen mit der Kenntnis der Stabilität relevanter Festphasen lässt sich die maximale Konzentration des Elements im Nahfeld (Löslichkeitslimite) berechnen. Auf dem Ausbreitungspfad gehen die Radionuklide, wie andere Wasserinhaltsstoffe, Wechselwirkungen mit den Mineraloberflächen ein und bleiben teilweise an diesen haften. Das Ausmass dieser Haftung (Sorption) wird durch Sorptionskoeffizienten (K_d -Werte) beschrieben. Diese werden wie Gleichgewichtskonstanten verwendet und quantifizieren in summarischer Weise die zwischen Radionukliden und Mineraloberflächen auftretenden chemischen und physikalischen Wechselwirkungen.

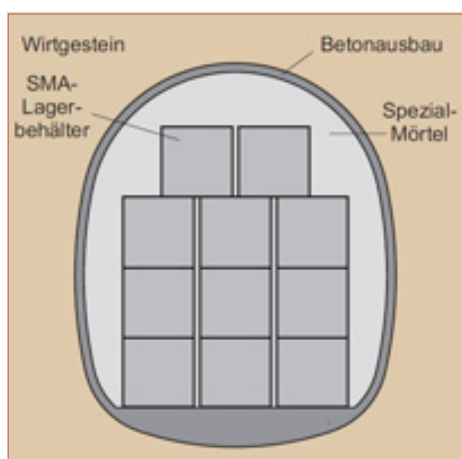
In den nächsten Abschnitten legt das ENSI die Ergebnisse der Überprüfung der maximalen Löslichkeiten und K_d -Werte im Nahfeld des SMA- und HAA-Lagers sowie der K_d -Werte für die genestischen Wirtgesteine dar.

3.2.1 Nahfeld des SMA-Lagers

Angaben der Nagra

Das System der technischen Barrieren eines SMA-Lagers umfasst (NTB 08-05, S. 40, siehe auch Figur 3.2-1):

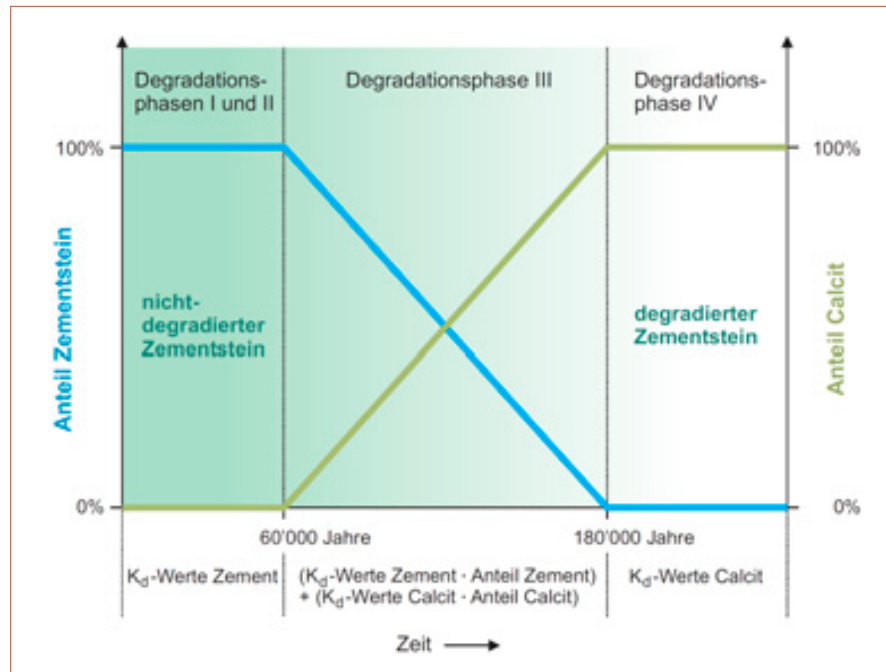
- Abfallgebinde mit den mehrheitlich in einer Zementmatrix konditionierten Rohabfällen,
- Endlagerbehälter aus Beton mit den Abfallgebänden und dem porösen Verfüllmaterial aus Zementmörtel,
- Lagerkavernen mit den darin eingelagerten Endlagerbehältern und porösem Verfüllmaterial aus Zementmörtel,
- Kavernenauskleidung aus Beton.



Figur 3.2-1:
Konzeptionelle Darstellung
eines Querschnitts durch
eine SMA-Lagerkaverne
(NTB 08-03, S. 20)

Figur 3.2-2

Schematische Darstellung der Zementdegradation in der Lagerkaverne in Abhängigkeit der Zeit. Das gezeigte Beispiel gilt für einen Darcy-Fluss⁵ von 10^{-10} m/s im Wirtgestein. In der Zeit von 60'000 bis 180'000 Jahren werden die sorbierenden Komponenten im Zementstein (wie z. B. die CSH-Phasen) in Calcit umgewandelt (NAB 08-51, S. 7 – 12, modifiziert)



Für die Langzeitentwicklung des durch Zementmaterial dominierten SMA-Lagers werden für die sicherheitstechnischen Betrachtungen die folgenden Annahmen getroffen (NTB 08-05, S. 42):

- Das Material im SMA-Lager besteht zu über 90 Massenprozenten aus Beton und zu wenigen Prozenten aus Stahl, organischen Abfallkomponenten und anderen chemischen Stoffen. Beton (Zementstein und Zuschlagstoffe) sowie Stahl und ggf. organische Abfallstoffe bestimmen in Verbindung mit dem Tiefengrundwasser über lange Zeiträume die chemischen Eigenschaften des Nahfelds, welche für den Transport bzw. die Rückhaltung der Radionuklide von grosser Bedeutung sind.
- Die Radionuklide sorbieren vorwiegend am Zementstein, welcher durch das Tiefengrundwasser über lange Zeiträume kontinuierlich ausgelaugt wird. Die Korrosionsprodukte des Stahls bestimmen den Redox-Zustand des SMA-Nahfelds, welcher wiederum Auswirkungen auf die Sorption der Radionuklide hat.
- Bei der Berechnung des Sorptionsgleichgewichts wird berücksichtigt, dass der Zementstein der zementierten Nahfeldbarrieren durch den kontinuierlichen Austausch des Porenwassers ausgelaugt werden kann, indem die für die Sorption wichtigen Festphasen aufgelöst und in Sekundärphasen (insbesondere Calcit) umgewandelt werden (NTB 08-05, S. 43). Vereinfacht bedeutet dies für die Modellierung, dass sich die Sorptionskoeffizienten für das anfänglich intakte Zementstein-System in Abhängigkeit des Wasserflusses durch die Kavernen und linear mit der Zeit in die Werte für ein Calcitsystem umwandeln (Figur 3.2-2).

Für die Abschätzung der Lebensdauer von Zementstein in den SMA-Lagerkavernen wurde im Rahmen des Wellenbergprojektes ein Boxmodell SEQDISSOLVE (Neall 1996) verwendet. Dieses Modell wurde für die generischen Sicherheitsbetrachtungen in Etappe 1 SGT übernommen und für höhere hydraulische Durchlässigkeiten erweitert. Mit diesem Modell wird die Degradation des Zementsteins als Funktion der Anzahl Porenwasseraustauschzyklen modelliert. Mit Hilfe des

⁵ Der Darcy-Fluss (m/s) ist proportional zur hydraulischen Durchlässigkeit (m/s) und zum hydraulischen Gradienten (m/m). Er entspricht dem Durchfluss (m³/s) bezogen auf die Querschnittsfläche eines porösen Mediums.

Darcy-Flusses im Wirtgestein kann diese Angabe in eine Lebensdauer für Zementstein umgerechnet werden.

Für das SMA-Lager in einem Wirtgestein mit einem Darcy-Fluss von 10^{-10} m/s wird in den generischen Sicherheitsbetrachtungen innerhalb der ersten 60'000 Jahre mit den K_d -Werten für Zement gerechnet. Danach wird angenommen, dass die Sorption der Radionuklide abnimmt und die K_d -Werte sich linear mit der Zeit in die Werte für ein Calcitsystem verändern. Nach 180'000 Jahren ist der Zementstein vollständig degradiert (Figur 3.2-2). Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde für die LMA-Tunnel im Opalinuston gezeigt, dass im Opalinuston mit einem Darcy-Fluss von $2 \cdot 10^{-14}$ m/s selbst nach einer Million Jahren noch mit einem intakten Zementnahfeld gerechnet werden kann (NTB 08-05, S. 44).

Die (elementspezifischen) Löslichkeitslimiten werden in den Rechenmodellen für das SMA-Lager im Gegensatz zum LMA-Teillager konservativerweise ausser Acht gelassen (NTB 08-05, S. 44). Grundsätzlich wäre eine Berücksichtigung auch für das SMA-Lager möglich. Die Radionuklid-Rückhaltung im zementierten Nahfeld des SMA-Lagers wird aber für die sicherheitstechnischen Betrachtungen zur Etappe 1 SGT einzig mit Sorption beschrieben. Ein Grund für dieses Vorgehen ist, dass wegen des wesentlich kleineren Radionuklidgehaltes im SMA-Lager geringere Konzentrationen im Porenwasser vorkommen und die Löslichkeitslimiten seltener als im LMA-Teillager erreicht werden (NAB 08-51, S. 8 – 9).

Die Nagra verwendete für die Sorption der Radionuklide im Zementnahfeld zwei Sorptionsdatensätze: nicht-degradiertes Zement «Zement» (intaktes Nahfeld) und degradiertes Zement «Calcit» (NTB 08-05, Tab. A3.2-3):

- Die K_d -Werte für nicht-degradiertes Zement wurden aus dem Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston LMA-Teillager übernommen (HSK 35/99; NTB 02-20). Im Vergleich zum Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston wurden in den generischen Sicherheitsbetrachtungen zusätzlich die Elemente Ag, Be und K verwendet. Für alle Elemente schlägt die Nagra einen K_d -Wert von 0 vor (NAB 08-51).
- Die meisten K_d -Werte für degradiertes Zement «Calcit» (NTB 08-05) wurden aus NTB 96-06 übernommen (NAB 08-51). Für Be schlägt die Nagra aus Mangel an Daten einen K_d -Wert von 0 vor (NAB 08-51). Bei den Elementen Pa, Pb, Np, U und Pu wurden die K_d -Werte gemäss dem aufdatierten Calcitdatensatz in NAB 08-50 angepasst. Für diese Elemente wurde der K_d -Wert mittels einer Korrelation zwischen dem Logarithmus des K_d -Wertes und dem Ionenradius bestimmt (NAB 08-50).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die geochemischen Parameter für das Zementnahfeld in den generischen Sicherheitsbetrachtungen überprüft. Die Resultate der Überprüfung werden im Folgenden zusammengefasst.

Zeitabhängiges Sorptionsmodell

Das verwendete Modell der Nagra für die zeitabhängige Sorption beschreibt vereinfachend wichtige Prozesse, wie z. B. die Reaktion von Portlandit zu Calcit und die kontinuierliche Abnahme der CSH-Phasen in der Degradationsphase III des Zementnahfeldes (Glasser und Matschei 2007). Die CSH-Phasen spielen eine wichtige Rolle für die Sorption von Kationen im Zement.

Die von der Nagra berechnete Lebensdauer von Zementstein in einem Wirtgestein mit einem Darcy-Fluss von 10^{-10} m/s wurde mit einfachen Massenbilanzen vom ENSI und der KNE nachvollzogen. Bei einem geringeren Darcy-Fluss im Wirtgestein von 10^{-11} m/s ist eine entsprechend 10-mal längere Lebensdauer des Zementsteins im SMA-Nahfeld zu erwarten. In diesem Fall wäre unter den getroffenen Modellannahmen das Zementnahfeld im gesamten Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren für das SMA-Lager noch in Degradationsphase II. Die K_d -Werte für nicht-degradierten Zement können dann für den gesamten Betrachtungszeitraum verwendet werden. Grundsätzlich sind das zeitabhängige Sorptionsmodell und die abgeleiteten Zeitintervalle nachvollziehbar und zweckmässig.

Maximale Löslichkeiten im Zementnahfeld

Die Nagra verwendet für das SMA-Lager keine maximalen Löslichkeiten. Das Vorgehen der Nagra ist aus Sicht des ENSI sicherheitsgerichtet.

Sorption im Zementnahfeld (K_d -Werte)

Das ENSI ist grundsätzlich mit den gewählten K_d -Werten der Radionuklide für nicht-degradierten Zement einverstanden. Ausnahmen sind die K_d -Werte für C_{anorg} , Co, Ni, die durch Isotopenverdünnung im Zementnahfeld zurückgehalten werden und so die berechneten K_d -Werte je nach verwendetem Inventar für die Radionuklide und für die stabilen Isotope variieren können (NTB 02-20, S. 73 – 79). Das ENSI hat mit eigenen Berechnungen mit den vom ENSI empfohlenen K_d -Werten den Rechenfall eines homogen-porösen Wirtgesteins aus Tonstein mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von $K = 10^{-10}$ m/s nachvollzogen (ENSI 33/55). Die Differenzen durch diese K_d -Werte sind nicht signifikant und haben für das Einengungsverfahren in Etappe 1 SGT keine Bedeutung.

Die Qualität der Sorptionsdaten für degradierten Zement (Degradationsphase IV) ist nicht vergleichbar mit dem Sorptionsdatensatz für nicht-degradierten Zement, da sich die K_d -Werte für degradierten Zement auf wenige Einzelmessungen abstützen. Das ENSI ist mit der Auswahl der meisten K_d -Werte für degradierten Zement einverstanden. Ausnahmen sind die K_d -Werte für die Elemente Np, Pa, Pb, Pu, U und Zr. Für die Berechnung dieser K_d -Werte (mit Ausnahme von Zr) wurde aus Sicht des ENSI eine noch nicht experimentell gut belegte Korrelation zwischen dem Logarithmus des K_d -Wertes und dem Ionenradius verwendet. Auf der anderen Seite schlägt die Nagra im Schritt 4 der Etappe 1 SGT nur Wirtgesteine mit hydraulischen Durchlässigkeiten von kleiner als 10^{-11} m/s (verschärfte Anforderung $K = 10^{-10}$ m/s) vor (NTB 08-03, S.142–155). Im Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren kann in diesem Fall gemäss der Modellannahmen mit den K_d -Werten für nicht-degradierten Zement gerechnet werden. Demnach haben die vom ENSI abweichenden K_d -Werte für degradierten Zement keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen auf die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete.

Bei der Sorption auf Zement in Degradationsphase III gibt es ebenfalls noch Ungewissheiten. Die Nagra verwendet K_d -Werte, die für die Degradationsphase III im Vergleich mit den Degradationsphasen I und II weniger gut experimentell belegt sind. Dies gilt vor allem für die K_d -Werte für Anionen in der Degradationsphase III, welche wahrscheinlich überschätzt werden. Die Nagra hat aber in zusätzlichen generischen Sicherheitsbetrachtungen (NAB 07-43; NAB 09-29) gezeigt, dass das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a eingehalten wird, selbst wenn in den Modellannahmen der Zementstein im Nahfeld von Anfang an vollständig degradiert ist und das homogen-poröse Wirtgestein mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von $K = 10^{-10}$ m/s aus Tonstein oder aus Calcit zusammengesetzt ist. Demnach haben diese abweichenden K_d -Werte keinen Einfluss auf das Einengungsverfahren in Etappe 1 SGT.

Das Vorgehen und die Auswahl der Parameter der Nagra sind nachvollziehbar und stufengerecht.

3.2.2 Nahfeld des HAA-Lagers

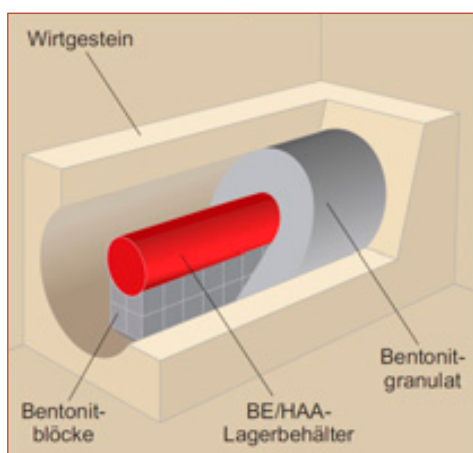
Das Konzept für das HAA-Lager sieht zwei Lagerbereiche vor: einen für hochaktive Abfälle (1) und einen für langlebige mittelaktive Abfälle (2).

(1) Hochaktive Abfälle

Angaben der Nagra

Das System der technischen Barrieren eines HAA-Lagers umfasst die Brennstoffmatrix und die Zirkaloy-Hüllrohre bei den abgebrannten Brennelementen bzw. die Glasmatrix und die dünnwandige Stahlkokille bei den hochaktiven Abfällen aus der Wiederaufarbeitung. Die HAA werden in massiven Endlagerbehältern, welche ihrerseits vollständig von stark tonhaltigem Verfüllmaterial (Bentonitgranulat) eingeschlossen sind, gelagert (Figur 3.2-3). Die Eigenschaften und die Modellannahmen zu den einzelnen technischen Barrieren sind in NTB 08-05 (S. 47 – 49) dokumentiert.

Die geringe Löslichkeit vieler Schlüsselradionuklide ist eine wichtige Begrenzung für deren Konzentration im Porenwasser und limitiert damit die Diffusion durch die Bentonit-Barriere. Die



Figur 3.2-3:
Konzeptionelle Darstellung
eines Lagerstollens für ab-
gebrannte Brennelemente
sowie für verglaste hochak-
tive Abfälle aus der Wieder-
aufarbeitung
(NTB 08-03, S. 21)

elementspezifischen Löslichkeitslimiten und die Gleichgewichts-Verteilungskoeffizienten (Sorptionkoeffizienten) zur Berechnung des Retentionsfaktors für das Bentonit-Nahfeld wurden von der Nagra in NTB 08-05, Anhang 3, zusammengestellt.

Die maximalen Löslichkeiten, Sorptionskoeffizienten (K_d), effektiven Diffusionskoeffizienten (D_e) und Porositäten (ϵ) im Bentonit (NTB 08-05, Tab. A3.2-7) wurden grösstenteils vom Projekt Opalinuston (NTB 02-10; NTB 02-18) übernommen. Abweichende Werte gemäss der HSK-Beurteilung (HSK 35/99) wurden berücksichtigt (NAB 08-51, S. 3).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston die sicherheitstechnischen Eigenschaften der Abfallmatrix und der Abfallbehälter beurteilt (HSK 35/99, S. 119 – 172). Das von der Nagra dokumentierte Sicherheitskonzept ist unverändert für die generischen Sicherheitsbetrachtungen übernommen worden.

Die Bentonitverfüllung hat eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit. Die Nuklidenausbreitung im Bentonit findet deshalb überwiegend durch Diffusion statt. In der Bentonitverfüllung wird die Konzentration vieler Radionuklide durch Löslichkeitslimiten begrenzt, dadurch wird die Freisetzung der Radionuklide zusätzlich begrenzt.

Für die Berechnung der Radionuklidfreisetzung wurden die meisten Parameter für die Bentonitverfüllung in den generischen Sicherheitsbetrachtungen aus dem Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston von der Nagra übernommen, die bereits vom ENSI überprüft wurden (HSK 35/99). Die Resultate der ENSI-Überprüfung zu den maximalen Löslichkeiten, den K_d -Werten und den effektiven Diffusionskoeffizienten werden im Folgenden zusammengefasst:

Maximale Löslichkeiten im Bentonit

Die von der Nagra vorgeschlagenen elementspezifischen Werte für die maximale Löslichkeiten im Referenzporenwassers für Bentonit sind aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und plausibel.

Sorption auf Bentonit

Das ENSI ist mit den vorgeschlagenen Referenz- K_d -Werten mit Ausnahme von Iod einverstanden. Neue Sorptionsexperimente mit Opalinuston unter anoxischen Bedingungen haben gezeigt, dass Iod, im Gegensatz zu oxischen Bedingungen, nicht sorbiert (NAB 08-50). Analoge Ergebnisse sind für Bentonit aufgrund der mineralogischen Ähnlichkeiten zu erwarten. Daher empfiehlt das ENSI für Iod einen K_d -Wert von 0 im Bentonit.

Die Nagra konnte im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston mit zusätzlichen Berechnungen zeigen, dass das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a auch mit einem K_d -Wert von 0 für Iod in der Bentonitverfüllung und im Opalinuston eingehalten wird (NTB 02-05). Das ENSI hat damals die Ergebnisse der Nagra mit eigenen Berechnungen nachvollzogen (HSK 35/99). Demnach ergeben sich durch den abweichenden K_d -Wert für das ENSI keine Auswirkungen auf die Auswahl der geologischen Standortgebiete. In den zukünftigen Sicherheitsanalysen sollte dieser Wert aber berücksichtigt werden.

Effektive Diffusionskoeffizienten im Bentonit

Das Diffusionsmodell und die effektiven Diffusionskoeffizienten (D_e) wurden vom ENSI bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston überprüft (HSK 35/99). Das Vorgehen der Nagra bei der Festlegung der Diffusionskoeffizienten ist nachvollziehbar und plausibel.

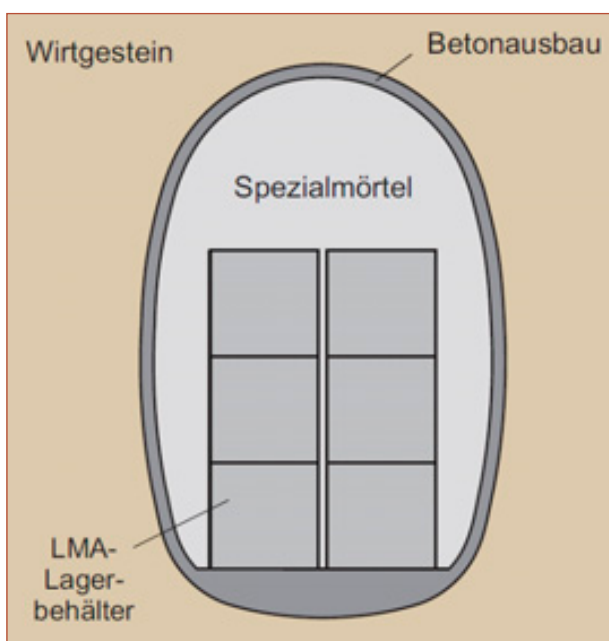
(2) Langlebige mittelaktive Abfälle

Angaben der Nagra

Die langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) werden in Endlagerbehälter, welche entweder die Abfallgebinde oder direkt die einzulagernden Abfälle (z. B. metallische Stilllegungsabfälle) enthalten, verpackt und mit Zementmörtel verfüllt. Die mit Beton ausgekleideten horizontalen Einlagerungstunnel mit den Endlagerbehältern werden mit Zementmörtel verfüllt und anschliessend versiegelt (Figur 3.2-4).

Im Gegensatz zum SMA-Lager verwendet die Nagra Löslichkeitslimiten bei den sicherheitstechnischen Betrachtungen für das Zementnahfeld im LMA-Teillager (NAB 08-51, S. 9). Für das LMA-Nahfeld wurden die Löslichkeitslimiten vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (HSK 35/99; NTB 02-22, Addendum) übernommen; sie sind in NTB 08-05, Tab. A3.2-4 zusammengestellt. Für das LMA-Teillager werden die gleichen Sorptionskoeffizienten wie für das SMA-Lager verwendet.

Gestützt auf eine geschätzte Zeitdauer für die vollständige Aufsättigung des Lagersystems sowie die anfängliche Immobilisierung der Radionuklide innerhalb der Endlagerbehälter wird für die Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus den LMA-Tunneln angenommen, dass die Freisetzung frühestens 100 Jahre nach Einlagerung beginnen kann (NTB 02-05). Nach diesem Zeitpunkt wird eine Immobilisierung (z. B. für Aktivierungsprodukte in den «Hülsen und Endstücken») konservativerweise vernachlässigt (NTB 08-05, S. 49).



Figur 3.2-4: Konzeptionelle Darstellung eines Querschnitts durch einen Lagertunnel für langlebige mittelaktive Abfälle (LMA, NTB 08-03, S. 21)

Beurteilung des ENSI

Die Herleitung und Auswahl der maximalen Löslichkeiten für das Zementnahfeld im LMA-Teillager ist in allen Fällen nachvollziehbar. Das ENSI hat, mit Ausnahme von Se, keine Einwände zu den von der Nagra verwendeten maximalen Löslichkeiten für das Referenzporenwasser anzubringen. Der abweichende Wert für die maximale Löslichkeit von Se hat für das Einengungsverfahren in Etappe 1 SGT keine Bedeutung, da die Nagra bei der Abfallzuteilung mit einem modellhaften SMA-Lager die Freisetzung der Radionuklide berechnet hat und generell keine Löslichkeitslimite verwendet wurden.

Im Gegensatz zum SMA-Lager wird von der Nagra für das LMA-Lager aufgrund der langsamen Aufsättigung analog zum Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston angenommen, dass die Freisetzung frühestens nach 100 Jahren beginnen kann. Die Rückhaltung der Aktivierungsprodukte in den «Hülsen und Endstücken» wird nicht berücksichtigt. Diese Angaben wurden bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston vom ENSI geprüft (HSK 35/99). Die Modellierung der Barrierenwirkung der Zementverfüllung für das LMA ist nach Ansicht des ENSI zweckmässig.

Weitere geochemische Parameter für das Zementnahfeld im LMA-Teillager sind identisch mit den Parametern für das Zementnahfeld im SMA-Lager und wurden im Kapitel 3.2.1 beurteilt.

3.2.3 Geochemische Bedingungen in den generischen Wirtgesteinen

Angaben der Nagra

Die Bedeutung des geologischen Umfelds für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers liegt in der Begrenzung des Wasserflusses durch das Tiefenlager, im Schutz des technischen Barrierensystems vor mechanischen Einwirkungen, der Gewährleistung eines günstigen und langfristig stabilen chemischen Milieus und in der Verringerung der Radionuklidfreisetzung durch, im Verhältnis zu den Halbwertszeiten der zu betrachtenden Radionuklide, lange Transportzeiten (NTB 08-05, S. 50).

In Bezug auf die Langzeitsicherheit wird die Wirksamkeit der Geosphäre als Barriere für den Radionuklidtransport einerseits durch die hydrogeologischen Eigenschaften und andererseits die geochemischen Verhältnisse im Wirtgestein bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bestimmt. Vorteilhafte hydrogeologische Situationen zeichnen sich aus durch geringe Grundwasserfließraten (Produkt aus hydraulischem Gradient und hydraulischer Durchlässigkeit), einem günstigen kleinräumigen Aufbau der wasserführenden Systeme und einem möglichst langen Migrationspfad zwischen den Lagerkammern und dem menschlichen Lebensraum (Biosphäre).

Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption am Gestein führt für die meisten sicherheitsrelevanten Radionuklide zu einer signifikanten Reduktion der Aktivitätsfreisetzung aus der Geosphäre in die Biosphäre. Abhängig von der spezifischen Mineralogie von Wirtgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ist es insbesondere eine günstige Porenwasserchemie, d. h. reduzierende chemische Bedingungen entlang des Transportpfads, ein annähernd neutraler pH-

Wert, eine geringe Salinität und eine niedrige Konzentration von komplexbildenden chemischen Substanzen im Tiefengrundwasser, welche die Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre begrenzt. Die Rückhaltung der Radionuklide kann bei fehlender Filtration von Kolloiden und durch die pH-Fahne aus dem Zementnahfeld beeinträchtigt werden (NTB 08-05, S. 51).

Um die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption (K_d -Werte) für alle zu beurteilenden Wirtgesteine quantifizieren zu können, wurden generische Sorptionsdatensätze für Tonsteine, kristallines Gestein und Calcit hergeleitet (NAB 08-50). Die Nagra untersuchte den Einfluss der Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption am Wirtgestein in den Rechenfällen R1 bis R4 anhand der generischen geochemischen Systeme Tonstein und Calcit (NTB 08-05, Tab. A3.3-2). Für die beiden generischen geochemischen Systeme nahm die Nagra jeweils die gleichen hydraulischen und physikalischen Eigenschaften, aber ein unterschiedliches Sorptionsverhalten der Radionuklide am Wirtgestein an. Mit diesen beiden Sorptionsdatensätzen deckt die Nagra in den generischen Sicherheitsbetrachtungen mögliche Variationen in den potenziellen Wirtgesteinen bezüglich Rückhaltung durch Sorption ab. Bei der Herleitung der Sorptionsdatensätze wurde jeweils eine dazugehörige Porenwasserzusammensetzung berücksichtigt.

Löslichkeitslimiten werden in den generischen Sicherheitsbetrachtungen für die Geosphäre nicht verwendet (NTB 08-05, S. A4-5).

Sorption auf Tonstein

Für Tonstein wurden die Referenz- K_d -Werte aus dem Entsorgungsnachweis Projekt Opalinustons (NAB 08-50, Tab. 7) als Basis verwendet. Für die Herleitung der Referenz- K_d -Werte Tonstein wurde die Referenzporenwasserzusammensetzung des Opalinustons (NAB 08-50, Tab. 8) verwendet. Für die Kationenaustauschkapazität von Tonstein wurde ein Wert von 100 meq kg^{-1} angenommen. Die K_d -Werte für Tonstein sind im NTB 08-05 (Tab. A3.3-2) dokumentiert.

Sorption auf Calcit

Karbonate sind in fast allen Gesteinen vorhanden und haben eine kleine Kationenaustauschkapazität und eine kleine spezifische Oberfläche (vergleichbar mit Quarz und kleiner als viele Feldspäte). Allgemein wird die Sorption auf Calcit als gering betrachtet. Die Sorptionsmechanismen für Karbonatfestphasen bestehen wahrscheinlich aus einer Kombination aus Oberflächenaustauschreaktionen mit Calcium und der Bildung von Mischkristallen («solid solutions»). Es ist sehr wenig quantitatives Wissen über diese Prozesse verfügbar (NAB 08-50, S. 6). Bei der Herleitung der K_d -Werte für dieses generische geochemische System wird angenommen, dass Calcit keine signifikanten Mengen an Schichtsilikaten enthält und nur die Sorption an Calcit relevant ist (NAB 08-50, S. 49).

Die Datengrundlagen, die für die Entwicklung des generischen Sorptionsdatensatzes Calcit verwendet wurden, sind in NTB 96-05 beschrieben. Die beschränkte Datengrundlage hat seitdem wenig geändert. Aufgrund der lückenhaften Datengrundlage und des beschränkten Verständnisses der Sorptionsprozesse auf Calcit ist es schwierig, einen belastbaren Sorptionsdatensatz für Calcit zu entwickeln.

Die Nagra verwendet für die Berechnung unbekannter K_d -Werte die Annahme einer linearen Korrelation zwischen den Sorptionskoeffizienten ($\log K_d$ -Werte) und den Ionenradien der Metalle (Co(II), Cd(II), Mn(II), Zn(II), Np(V), Th(IV), Am(III)) (NAB 08-50, Fig. 5). Es gibt keinen eindeutigen theoretischen Hintergrund, warum diese Korrelation existieren soll, ausser dass die Grösse des Ions einen Einfluss auf den Austausch mit Ca oder beim Einbau in die Calcit-Gitterstruktur haben könnte. Diese Korrelation wurde verwendet, um die unbekannteren K_d -Werte einiger Elemente für die generische Sorptionsdatenbank Calcit abzuschätzen (NAB 08-50, S. 49).

Beurteilung des ENSI

Die Annahmen zu den hydrogeologischen Eigenschaften der geologischen Barrieren wurden bereits im Kapitel 2.4 diskutiert. Das ENSI fokussiert daher in diesem Abschnitt auf die Annahmen zur Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption.

Die Nagra verwendet die Sorptionsdatensätze Tonstein und Calcit, um die Bandbreite der möglichen Variationen verschiedener Wirtgesteine bezüglich Rückhaltung durch Sorption aufzuzeigen. Der Sorptionsdatensatz Tonstein entspricht einem Wirtgestein mit sehr guten Sorptionseigenschaften wie z. B. Opalinuston, wohingegen der Sorptionsdatensatz Calcit aus Sicht des ENSI ein Modellwirtgestein mit schlechten Sorptionseigenschaften repräsentiert.

Das ENSI hat für jedes Element den K_d -Wert für die Datensätze Tonstein und für Calcit überprüft. Die Resultate der Überprüfung werden im Folgenden zusammengefasst:

Sorption auf Tonstein

Die K_d -Werte für Tonstein wurden grösstenteils vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (NTB 02-19) übernommen (NAB 08-50) und vom ENSI bereits überprüft (HSK 35/99). Die Herleitung und Selektion der Sorptionskoeffizienten durch die Nagra ist in allen Fällen nachvollziehbar. Der Sorptionsdatensatz für Tonstein basiert auf vielen Sorptionsexperimenten. Die Sorptionsmechanismen sind in vielen Fällen bekannt. Die noch bestehenden, in HSK 35/99 erwähnten Ungewissheiten sind für die Langzeitsicherheit von untergeordneter Bedeutung und haben auf das Einengungsverfahren in Etappe 1 SGT keinen Einfluss.

Sorption auf Calcit

Die Grundlagen für die K_d -Werte im Calcit beruhen auf wenigen Einzelmessungen. Im Vergleich zur Datenlage für Tonstein sind die Ungewissheiten hier relativ gross. Würde der Sorptionsdatensatz für Calcit in einer Sicherheitsanalyse beurteilt werden, dann müssten aus Sicht des ENSI für die Elemente Be, Nb, Np, Pa, Pb, Pd, Pu, Sn, Tc, Th, U und Zr konservativere K_d -Werte verwendet werden. Wird der Sorptionsdatensatz Calcit aber als mögliche untere Abgrenzung für die Variationsmöglichkeiten potenzieller Wirtgesteine betrachtet, und wird dieses Modellwirtgestein mit einem Tonmineralgehalt von wenigen Prozenten definiert, sind die von der Nagra vorgeschlagenen K_d -Werte für alle Elemente repräsentativ.

Die Auswahl zu konservativer K_d -Werte könnte zur Folge haben, dass zu strenge Anforderungen an das Wirtgestein, z. B. an dessen hydraulische Durchlässigkeit, abgeleitet werden würden. Mit den von der Nagra vorgeschlagenen K_d -Werten für das pessimistische Modellwirtge-

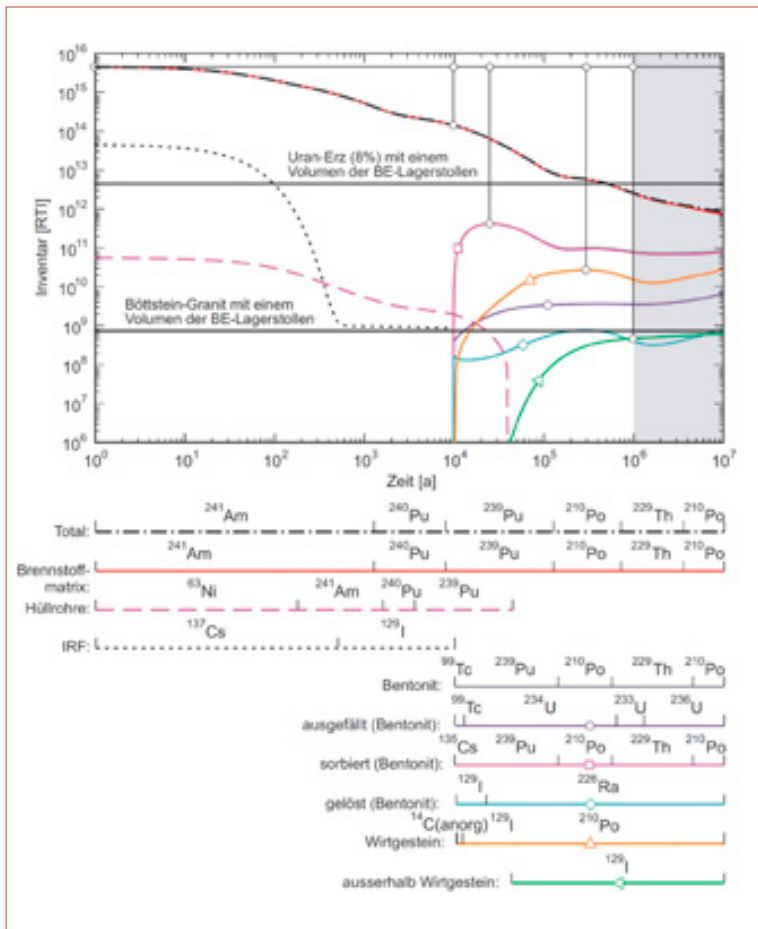
stein wird eine grosse Bandbreite an Wirtgesteinen abgedeckt und sichergestellt, dass potenzielle Wirtgesteine nicht zu früh ausscheiden. Dieses Vorgehen ist für Etappe 1 SGT aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und zweckmässig. Für die weiteren Etappen empfiehlt das ENSI die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption wirtgesteinsspezifisch aufzuzeigen.

3.2.4 Illustration der Beiträge der einzelnen Barrieren zur Langzeitsicherheit

Angaben der Nagra

Zur Illustration der Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems hat die Nagra ein generisches geologisches Tiefenlager für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA) einerseits und eines für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) andererseits betrachtet. Das Wirtgestein wird als homogen-porös angenommen, mit einer Transportpfadlänge von 40 m (wie im Projekt Entsorgungsnachweis, NTB 02-05).

Figur 3.2-5 zeigt die Aufteilung der Radiotoxizität (dargestellt als Radiotoxizitätsindex, RTI, NTB 02-05, Appendix 3) zu verschiedenen Zeiten auf die verschiedenen Komponenten des Systems (technische Barrieren, Wirtgestein) sowie das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für abgebrannte Brennelemente. Die Figur zeigt, dass der grösste Teil der Gesamt-Radiotoxizität, welche hauptsächlich von Aktiniden stammt, während mehr als 10 Millionen Jahren fast vollständig in der Brennstoff-Matrix eingeschlossen bleibt.



Figur 3.2-5:

Entwicklung und Aufteilung der Radiotoxizität für abgebrannte Brennelemente auf die verschiedenen Komponenten des Nahfelds, das Wirtgestein und das Gebiet ausserhalb des Wirtgesteins für $K = 10^{-13}$ m/s (NTB 08-05, S. 129). Die Balken unter der Figur zeigen auf, welche Radionuklide zu welchen Zeiten in welchen Komponenten des Systems hauptsächlich zur Radiotoxizität beitragen (IRF: instant release fraction).

Nach dem Versagen der Behälter, welches hier nach einer Zeitdauer von 10'000 Jahren angenommen wurde, ist neben der Brennstoff-Matrix die Sorption am Bentonit der zweitwichtigste Beitrag zur Rückhaltung, der dritt wichtigste Beitrag ist der langsame Transport im Wirtgestein, gefolgt von der begrenzten Löslichkeit wichtiger Radionuklide im Bentonit-Porenraum. Der maximale Anteil der Radiotoxizität, der sich zu einem bestimmten Zeitpunkt ausserhalb der technischen und geologischen Barrieren befindet, beträgt ca. 10^{-7} des Werts zum Zeitpunkt der Einlagerung der Abfälle. Eine Analyse der anderen Abfallströme (HAA, SMA, LMA) erfolgt in ähnlicher Weise.

Die quantitativen Betrachtungen der Nagra für ein SMA- und ein HAA-Lager zeigen, dass bei einem Lager an einem geeigneten Standort und mit einem geeigneten Barrierensystem der grösste Teil der in das Lager eingebrachten Radiotoxizität innerhalb des Nahfelds und der Geosphäre zerfällt.

Beurteilung des ENSI

Gemäss SGT (BFE 2008, S. 57) haben die Entsorgungspflichtigen für beide Lagertypen die erwarteten Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Sicherheit des gesamten Lagers darzulegen. Die Nagra hat dies mit ihren Analysen zur Wirksamkeit der Elemente des Barrierensystems für BE, HAA, LMA und SMA (NTB 08-05, Kap. 4.7) transparent und nachvollziehbar dokumentiert. Das ENSI hat mit seinen unabhängigen Modellierungen für die Rechenfallfamilien R1 bis R4 (siehe Kapitel 2.4) die Ausbreitung von Radionukliden aus dem SMA-Lager durch die technischen und natürlichen Barrieren bis in die Biosphäre nachvollzogen und so auch die Wirksamkeit der einzelnen Barrieren geprüft. Im Falle eines HAA-Lagers wurde die Barrierenwirkung des Wirtgesteins Opalinuston (HSK 35/99, S. 207) und allgemein des Mehrfachbarrierensystems (HSK 35/99, S. 210) bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises beurteilt.

Das ENSI hat mit den Angaben zum Radionuklidinventar von Brennelementen und verglasten Abfällen (NTB 01-01) die Reduktion der Radiotoxizität dieser Abfälle aufgrund der Einschlusszeit im Endlagerbehälter überprüft und kann die Angaben der Nagra zur Reduktion der Radiotoxizität nachvollziehen.

Sowohl die Matrix des abgebrannten Brennstoffs wie auch die verglasten Abfälle stellen unter den im Tiefenlager vorherrschenden reduzierenden Bedingungen und dem geringen Wasseraustausch äusserst stabile Abfallformen dar, die sich durch hohe Einschlussfähigkeit für Radionuklide und durch geringe Korrosionsraten auszeichnen.

Durch die Wahl von Gesteinen mit erheblichem Tonmineralgehalt und einer hydraulischen Durchlässigkeit von $< 10^{-10}$ m/s wird sichergestellt, dass die Geosphäre eine wirksame Barriere für den Transport der meisten sicherheitsrelevanten Nuklide darstellt. Die gute Barrierenwirkung des Wirtgesteins beruht darauf, dass der geringe diffusive und advective Nuklidtransport zusätzlich durch die Sorption verlangsamt wird.

3.3 Lagerbedingte Einflüsse

Mit dem Kriterium 2.3 wird die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers gegenüber lagerbedingten Einflüssen bewertet. Diese sind abhängig von den Eigenschaften der eingelagerten Abfälle, der technischen Barrieren und des betrachteten Wirtgesteins. Folgende Prozesse stehen dabei im Vordergrund (BFE 2008):

- In den Abfällen vorhandene Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung,
- Ausbildung einer pH-Fahne bei Verwendung von Zement,
- Bildung von Nahfeld-Kolloiden,
- Gasbildung durch Korrosions- und Degradationsprozesse im Tiefenlager,
- Wärmeeintrag ins Tiefenlager durch die eingelagerten Abfälle.

Günstig sind Wirtgesteine, bei welchen lagerinduzierte Prozesse zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung ihrer Barrierenwirkung führen. 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, werden ebenfalls als günstig bewertet.

3.3.1 Komplexbildner und andere Stoffe mit dem Potenzial zur Beeinträchtigung der Barrierenwirkung

Angaben der Nagra

Organische und anorganische Komplexbildner als Bestandteile oder Degradationsprodukte der Abfälle können die Sorption von Radionukliden im Endlagernahfeld signifikant vermindern (NTB 08-05, S. 43). In Übereinstimmung mit der bisherigen Praxis (NTB 02-05; NTB 94-06) ist vorgesehen, diejenigen Abfallsorten, welche Stoffe enthalten, die die Mobilität der Radionuklide im Zementnahfeld erhöhen können (d. h. Abfallsorten, die entweder zu den ATA oder den SMA gehören), diesbezüglich zu analysieren und entsprechend dem Gehalt an solchen Stoffen in zwei Gruppen einzuteilen. Dabei werden der Gruppe 1 solche Abfälle zugeteilt, die im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung der geochemischen Rückhalte-mechanismen nur geringe Konzentrationen von Störstoffen enthalten, der Gruppe 2 alle übrigen Abfälle. Sowohl im SMA- als auch im HAA-Lager (LMA-Teil) ist vorgesehen, die beiden Gruppen in räumlich getrennten Lager-teilen (Kavernen resp. Tunnel) einzulagern (NAB 08-51, S. 5 – 8; NTB 08-05, S. 43).

Die folgenden Kriterien bezüglich im Abfall vorhandener Stoffe wurden für die Zuteilung zu Gruppe 2 berücksichtigt:

- (1) Ein hoher Gehalt an organischen Stoffen kann durch mikrobiologisch katalysierte Zersetzung zu CH_4 und CO_2 und damit zu Zementdegradation führen (Verlust eines wesentlichen Teils des sorbierenden Zementsteins (Kapitel 3.2.1); (Kriterium für Abfallgruppe 2: Die Menge organischer Stoffe kann zu einer Degradation von mindestens 2/3 des Portlandits im zementierten Nahfeld führen).

- (2) Ein Gehalt an Zellulose, welcher durch Zersetzung im alkalischen Milieu des Zements zu komplexbildenden Verbindungen (hauptsächlich Isosaccharinsäure, ISA) führt, bewirkt unter Lagerbedingungen eine Reduktion der Sorption von Radionukliden an Zementstein (Kriterium für Abfallgruppe 2: Der Gehalt an Zellulose kann zu einer ISA-Konzentration von mindestens 10^{-4} mol/L im Porenwasser führen).
- (3) Gehalte an organischen oder anorganischen Verbindungen wie EDTA oder Berliner Blau können durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden erhöhen. Die Kriterien für Abfallgruppe 2 sind, dass der organische Gehalt zu einer EDTA-Konzentration von mindestens 10^{-3} mol/L im Porenwasser und der Gehalt an Berliner Blau zu einer Cyanid-Konzentration von mindestens 10^{-5} mol/L im Porenwasser führen kann.
- (4) Ein hoher Nitratgehalt kann mikrobiologisch katalysiert zu unerwünschten oxidierenden Bedingungen führen (Kriterium für Abfallgruppe 2: Der Gehalt an Nitrat kann zu einer Nitratkonzentration von mindestens 0.1 mol/L im Porenwasser führen).

In den generischen Sicherheitsbetrachtungen wird generell der Einfluss von solchen Stoffen quantitativ berücksichtigt, indem für die Abfallgruppe 2 in den geochemischen Nahfelddaten im Vergleich mit der Abfallgruppe 1 radionuklidspezifisch die Sorptionswerte reduziert und die Löslichkeitslimiten erhöht werden (NTB 08-05, S. 121).

Beurteilung des ENSI

Das Prinzip der getrennten Lagerung der Abfälle, um die möglichen Wechselwirkungen (Einfluss auf die Rückhaltewirkung der technischen Barrieren anderer eingelagerter Abfälle) zwischen den verschiedenen Abfallsorten zu reduzieren, wird vom ENSI als sinnvoll erachtet.

Das Kriterium für den Anteil der organischen Stoffe in den einzelnen Abfallsorten (1) (Abfallgruppe 1: Menge organischer Stoffe $\leq 2/3$ Portlanditverlust im Zementnahfeld) erweckt den Eindruck, dass relativ grosse Mengen an organischen Stoffen in Abfallgruppe 1 gelangen. Wird jedoch die tatsächliche Zuteilung der Abfallsorten auf die Gruppe 1 und 2 gemäss MIRAM 08 (NAB 07-43; NAB 08-51; NTB 08-06) betrachtet, stellt das ENSI fest, dass die tatsächlich vorgesehene Menge an organischen Stoffen im SMA-1-Lagerbereich gering ist. Der Anteil organischer Stoffe in den Abfällen variiert zwischen 0 bis 6.7 Gew.% bzw. der SMA-1-Lagerbereich enthält ca. 155 t Organika (NAB 07-43). Das kann zu einem Portlanditverlust von < 5 Gew.% im SMA-1 führen; daher ist der Einfluss der organischen Stoffe auf die Zementdegradation in Abfallgruppe SMA-1 vernachlässigbar.

Die Kriterien für zelluloseartige Materialien (2), organische Komplexbildner und Cyanid (3) hat die Nagra aus Sorptionsexperimenten abgeleitet (NAB 08-51). Diese sind nachvollziehbar und plausibel.

Aus Sicht des ENSI ist es nachvollziehbar, die nitrathaltigen Abfälle (4) im Tunnel für LMA-2 zu lagern, um mögliche oxidierende Bedingungen durch Mikroorganismen lokal zu begrenzen. Der genaue Wert für das Kriterium ist zwar schwierig herzuleiten und erfolgt nur argumentativ, das ENSI beurteilt aber die Grössenordnung des vorgeschlagenen Wertes als zweckmässig. Das ENSI weist darauf hin, dass die Abfallsorte BA-P-HL9 nur knapp das Kriterium erfüllt. Das ENSI empfiehlt, im Rahmen der weiteren Schritte der Lagerrealisierung zu prüfen, ob diese Abfallsorte nicht besser der Gruppe 2 zugeteilt werden sollte.

Für die Etappe 1 SGT ist aber die von der Nagra gewählte Zuteilung in Abfallgruppe 1 und 2 aus Sicht des ENSI zweckmässig und stufengerecht.

Der Einfluss der potenziell beeinträchtigenden Stoffe auf das Zementnahfeld wird von der Nagra durch die Reduktion der K_d -Werte und die beschleunigte Zementdegradation in Abfallgruppe 2 für Etappe 1 genügend berücksichtigt. Das ENSI erachtet das Vorgehen der Nagra als nachvollziehbar und stufengerecht.

3.3.2 Hoch-pH-Fahne

Angaben der Nagra

Im Kontakt mit dem Porenwasser des Wirtgesteins degradiert der Zementstein in den Kavernen/Tunneln eines SMA-Lagers oder eines LMA-Teillagers, so dass sich um diese Kavernen/Tunnel alkalisches Porenwasser ausbreitet (Hoch-pH-Fahne, $\text{pH} > 12$), welches die geochemischen Bedingungen (Porenwasserchemie), aber auch die Wirtgesteinsmineralogie verändert. Dadurch wird sich die Sorption elementspezifisch verändern; die Gesamtretardierung der Radionuklide im Einflussbereich einer Hoch-pH-Fahne ist aber der Gesamtretardierung im ungestörten Wirtgestein etwa ebenbürtig (z. B. im Opalinuston (NTB 03-12) und in den Mergel-Formationen des Helvetikums (NTB 96-06)). Die Geschwindigkeit sowohl der Zementdegradation als auch der Ausbreitung einer Hoch-pH-Fahne hängt stark vom Wasserfluss durch das Nahfeld ab, also von der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins. In der Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne und in der Ungewissheit dieser Entwicklung unterscheiden sich homogen-poröse Gesteine mit diffusionsdominiertem Transport von geklüfteten Gesteinen mit advektionsdominiertem Transport (NTB 08-05, S. A1-107).

Bei einem homogen-porösen Gestein mit diffusionsdominiertem Transport wie etwa Opalinuston verlaufen die Zementdegradation und die Entwicklung einer Hoch-pH-Fahne wegen des geringen Wasseraustauschs zwischen dem Gestein und dem zementierten Nahfeld und wegen der hohen Pufferkapazität des Gesteins sehr langsam über Millionen von Jahren. Eine Hoch-pH-Fahne ist örtlich beschränkt und würde sich weniger als 10 m in das Gestein ausdehnen, selbst wenn sämtlicher Zementstein in den Kavernen/Tunneln degradiert würde (NTB 02-03; NTB 02-05; NTB 08-05, S. A1-107).

Die Ungewissheit über die Folgen einer Hoch-pH-Fahne für geklüftete Gesteine ist grösser (NTB 94-06; NTB 96-06). Aber auch hier kann davon ausgegangen werden, dass die Transmissivität der Fliesspfade unter dem Einfluss einer Hoch-pH-Fahne wegen Mineralumwandlungen mit

der Zeit tendenziell abnimmt. Ein pessimistisches Szenario innerhalb der Ungewissheit wäre, dass sich die Fließwege nicht verschliessen, die Fließgeschwindigkeit tendenziell zunimmt, und die Porosität wegen Mineralumwandlungen in der an die Fließwege angrenzenden Matrix verringert wird, was ihre Rückhaltefähigkeit für Radionuklide beeinträchtigen würde. Bei der in der Lagertiefe erwarteten geringen Transmissivität der wasserführenden Systeme wird dies aber als wenig bedeutend beurteilt (NTB 08-05, S. A1-107).

Die Evaluation der Konsequenzen der Hoch-pH-Fahne für den Gastransport erfolgt gemäss Nagra im Rahmen des EU-Projektes FORGE (NTB 08-02). In diesem werden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der Wechselwirkungen zwischen Zementporenwasser und Tonmaterialien auf die Gaspermeabilität zu untersuchen.

Beurteilung des ENSI

Der Einfluss der Hoch-pH-Fahne wurde bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises für den Opalinuston (HSK 35/99) und im Rahmen des Projekts Wellenberg für die Mergel-Formationen des Helvetikums (HSK 30/26) vom ENSI überprüft.

Die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne auf die Sicherheit des Tiefenlagers können aufgrund der heute vorhandenen Kenntnisse der Vorgänge durch umhüllende Szenarien mit entsprechenden K_d -Werten abgeschätzt werden, obwohl die durch den Einfluss von Zementwasser im Wirtgestein entstehenden Umwandlungsprodukte erst teilweise im Detail bekannt sind.

Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass in einem hydraulisch gering durchlässigen homogen-porösen Wirtgestein wie z. B. Opalinuston der von der Phasenumwandlung betroffene Bereich räumlich limitiert ist und der Einfluss der Hoch-pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinustons von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist (HSK 35/99, S. 216).

Das ENSI stimmt der Nagra zu, dass die Ungewissheiten bezüglich Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne in geklüfteten Wirtgesteinen grösser als in homogen-porösen Wirtgesteinen sind. Die Auswirkungen der Hoch-pH-Fahne sind grundsätzlich von den Eigenschaften des Wirtgesteins wie hydraulische Durchlässigkeit, präferenzielle Fließpfade und Pufferkapazität der Minerale abhängig und können daher nur gemeinsam bewertet werden. Die Nagra hat für die Bewertung der einzelnen Wirtgesteine den Indikator 'Chemische Wechselwirkungen' definiert. In diesem wird auch der Aspekt der Hoch-pH-Fahne berücksichtigt. Die Bewertung der Wirtgesteine bezüglich Hoch-pH-Fahne anhand eines Indikators ist nachvollziehbar und plausibel. In Etappe 1 SGT wird der Einfluss der Hoch-pH-Fahne nur generisch behandelt, in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung sollte er stufengerecht und wirtgesteinsspezifisch abgeschätzt werden.

Neben einer möglichen Beeinträchtigung der Radionuklidrückhaltung im Wirtgestein können die Mineralumwandlungen und Ausfällungen durch die Hoch-pH-Fahne einen negativen Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit der technischen und natürlichen Barrieren haben. Die Ausfällungen können den Porenraum im angrenzenden Wirtgestein verkleinern und damit zu geringeren Gasdurchlässigkeiten führen (HSK 35/99, S. 206). Das vertiefte Verständnis der möglichen Konse-

quenzen dieser Wechselwirkungen auf die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers ist aus Sicht des ENSI von grosser Bedeutung. Es begrüsst deshalb die von der Nagra in NTB 08-02 dokumentierten Forschungsaktivitäten.

3.3.3 Nahfeld-Kolloide

Angaben der Nagra

Kolloide können Radionuklide transportieren und so deren Mobilität erhöhen. Kolloide spielen in geklüfteten Gesteinen mit advektivem Transport eine viel grössere Rolle als in Gesteinen mit diffusionskontrolliertem Transport (NTB 08-05, S. A1-69). Damit der durch Kolloide beeinflusste Radionuklidtransport im Wirtgestein einen bedeutenden Beitrag liefern kann, müssen gleichzeitig die folgenden Bedingungen erfüllt sein (NTB 08-05, S. 122):

- Signifikante Kolloidkonzentrationen im Porenwasser des Wirtgesteins,
- Mobilität der Kolloide (keine Kolloid-Filtration),
- (chemische) Stabilität der Kolloide im Wirtgestein,
- grosses bzw. irreversibles Sorptionsvermögen der Radionuklide auf Kolloiden.

Grundsätzlich können Kolloide entweder aus dem Nahfeld stammen oder aber unabhängig von der Anwesenheit eines geologischen Tiefenlagers im Wirtgestein vorhanden sein (natürliche Kolloide). In diesem Abschnitt werden ausschliesslich Kolloide betrachtet, die im Nahfeld gebildet werden.

Die Bentonit-Barriere hat nicht nur günstige Rückhalteeigenschaften für Radionuklide, sondern wirkt auch als Kolloidfilter (NTB 02-05). Demzufolge wird es im Wirtgestein (ausserhalb der Bentonit-Barriere) zu keinen signifikanten Konzentrationen von Kolloiden, die innerhalb der Bentonit-Barriere gebildet werden, kommen (NTB 08-05, S. 123).

Grundsätzlich kann der Bentonit selbst als Quelle für Kolloide in Frage kommen (Bentonit-Erosion). Bei den geringen Wasserfliessraten im Nahfeld (sichergestellt durch die Mindestanforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins) und der vergleichsweise hohen Salinität des Porenwassers im Bentonit für die in Frage kommenden Wirtgesteine wird davon ausgegangen, dass sich keine signifikante Mengen an Bentonit-Kolloiden bilden können (NTB 08-05, S. 123).

In NTB 01-02 wird gezeigt, dass in einem für ein LMA- bzw. SMA-Lager repräsentativen Zementnahfeld die Porenwasserkonzentration von Kolloiden, die aus Zementmineralien bestehen, sehr niedrig ist ($\leq 100 \mu\text{g/L}$). Ausserdem wird erwartet, dass solche Kolloide beim Übergang vom Nahfeld (hoher pH-Wert) in die Geosphäre (etwa neutraler pH-Wert in den in Frage kommenden Wirtgesteinen) ausflocken, da sie in einer solchen Umgebung nicht stabil sind (NTB 01-02; NTB 08-05, S. 123).

Nach heutigem Kenntnisstand ist der Einfluss dieser Nahfeldkolloide auf die Langzeitsicherheit für die betrachteten Barrierenkonzepte und für die in Frage kommenden Wirtgesteine vernachlässigbar (NTB 08-05, S. 123).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI stimmt der Nagra zu, dass der Einfluss der Kolloide im Nahfeld auf die Rückhaltung der Radionuklide nur signifikant ist, wenn die Kolloide auch im Wirtgestein chemisch stabil sind und physikalisch transportiert werden können. Das bedeutet, dass selbst wenn im Nahfeld Kolloide gebildet werden, der Einfluss durch die geeignete Wahl des Wirtgesteins minimiert werden kann. Zum Beispiel sind im Opalinuston Kolloide aufgrund der kleinen Poren nicht mobil (NTB 02-05, S. 165). Zusätzlich würden die Kolloide im Opalinustoneporenwasser durch die hohe Ionenstärke von 0.1 – 0.3 M schnell aggregieren (z. B. Grolimund et al. 2000; NTB 02-14).

In geklüfteten Wirtgesteinen mit präferenziellen Fließspfadern ist die physikalische Filtration von Kolloiden wahrscheinlich nicht ausreichend. Daher spielt in diesen Wirtgesteinen die chemische Instabilität der Kolloide eine wichtige Rolle, um den Kolloidtransport der Radionuklide zu minimieren. Die Nagra hat den Indikator 'Kolloide' zur Bewertung der einzelnen Wirtgesteine definiert. In diesem Indikator werden die physikalische Filtration und die chemische Stabilität von Kolloiden berücksichtigt und damit jedes Wirtgestein bezüglich Kolloidtransports bewertet. Das Vorgehen der Nagra ist nachvollziehbar und stufengerecht.

3.3.4 Gasbildung und -transport

Angaben der Nagra

Radioaktive Abfälle enthalten Metalle und/oder organische Materialien, die durch Korrosion respektive Degradation Gase bilden können. Zusätzlich kann durch Radiolyse Wasserstoffgas gebildet werden. Der Anteil an Radiolysegas ist bei allen Abfällen klein im Vergleich zum Anteil der durch Korrosion von Metallen und Abbau von organischen Materialien gebildeten Gasen. Die relativen Anteile dieser Prozesse an der Gasbildung sind abhängig von der Art der Abfälle sowie von den geochemischen Bedingungen (NTB 08-05, S. 123).

Gasbildung in einem geologischen Tiefenlager kann grundsätzlich die folgenden Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben:

1. Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein (graduelle temporäre Veränderung der Wirtgesteinseigenschaften)
2. Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden
3. Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase

Mögliche Massnahmen zur Reduktion der Gasbildung bzw. ihrer Auswirkungen in einem Tiefenlager

Um die Gasbildung bzw. ihre Auswirkungen in geologischen Tiefenlagern zu minimieren, gibt es ein breites Spektrum von (möglichen) Massnahmen (NTB 08-05, S. 87):

HAA: Es existieren verschiedene Optionen bezüglich der Wahl des Behältermaterials.

LMA/SMA: Mögliche Massnahmen umfassen

- Vorgaben an die Abfallproduzenten (Bsp.: PSI-Abfälle mit einem hohen Anteil an Aluminium: Minimierung des Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnisses durch Einschmelzen und Umgiessen).

- Platzierung der Abfälle (Bsp.: Abfälle mit einem hohen Anteil an Aluminium: Platzierung möglichst nahe am Boden der Lagertunnels, damit bei der Wiederaufsättigung die Gasentwicklung möglichst früh stattfindet, wenn die Tunnels noch weitgehend ungesättigt sind und dementsprechend viel Porenraum für die Aufnahme des Gases zur Verfügung steht).
- Bautechnische Massnahmen: Verwendung von Lagertunnel-Versiegelungen, welche eine Freisetzung von Gas bei Übersteigen eines kritischen Druckes ermöglichen.

SMA-Lager

Im Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Standort Wellenberg (NTB 94-06) wurden die zweite und dritte Auswirkung (Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden und Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) ebenfalls im Detail analysiert, mit dem Ergebnis, dass diese die Langzeitsicherheit nicht in Frage stellen. Die erste Auswirkung (Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein) ist in dem betrachteten geklüfteten Wirtgestein (Mergel-Formationen des Helvetikums) mit einem vergleichsweise niedrigen in-situ Gaseintrittsdruck, der unterhalb des Drucks liegt, ab welchem mit einer Schädigung des Wirtgesteins gerechnet werden muss, von untergeordneter Bedeutung (s. auch NTB 96-01).

Grundsätzlich könnte ein SMA-Lager auch in einem dichteren Wirtgestein als den Mergel-Formationen des Helvetikums gebaut werden; z. B. im Opalinuston. In diesem Falle wären aus den oben erwähnten Gründen die Gasbildung und der Gastransport durch die technischen und geologischen Barrieren speziell zu untersuchen. Falls gezeigt werden kann, dass die Gasbildung selbst im Opalinuston nicht zu einer Beeinträchtigung der Langzeit-Barrierenwirkung führt, so würde dies auch für Wirtgesteine mit einer im Vergleich zum Opalinuston höheren Durchlässigkeit gelten.

Wegen der grossen Menge an Korrosions- und Degradationsgasen ist die Entwicklung von Gasüberdrücken in den verfüllten Lagerkavernen unvermeidlich. Aus diesen Gründen hat die Nagra die Gasbildung in einem generischen SMA-Lager im Opalinuston detailliert untersucht (NTB 08-07). Das gesamte Porenvolumen der verfüllten Lagerbauwerke im Opalinuston beträgt für das betrachtete Inventar ca. 58'000 m³. Würde man die Gesamtmenge der produzierten Korrosions- und Degradationsgase hermetisch in diesem Porenvolumen einschliessen, so würde dies zu einem hohen Gasdruck führen. Im realen System wird dieses Gas jedoch zumindest teilweise durch das Wirtgestein abtransportiert, so dass der resultierende Gasdruck deutlich reduziert wird.

Um den Gasdruck auch bei sehr geringer Durchlässigkeit des Wirtgesteins und/oder bei erhöhter Gasbildung klein zu halten, könnten spezielle Verfüll- und Versiegelungsmaterialien verwendet werden, wie beispielsweise hochporöse Mörtel zur Verfüllung der Einlagerungskavernen und Sand-/Bentonit-Mischungen mit einem Bentonitanteil von 20 – 30 % für die Verschluss- und Versiegelungsbauwerke («Engineered Gas Transport System» – EGTS). Das EGTS bezweckt, die Gastransportkapazität der verfüllten Untertagebauwerke zu erhöhen, ohne die Radionuklid-Rückhaltefunktion der technischen Barrieren zu beeinträchtigen. Sand/Bentonit-Gemische mit geringem Bentonitanteil besitzen aufgrund ihres (mikro)strukturellen Aufbaus eine geringe Wasserdurchlässigkeit und zeichnen sich gleichzeitig durch eine relativ hohe Gasdurchlässigkeit aus.

Mit Hilfe von numerischen Modellierungen (NTB 08-07) wird gezeigt, dass für die erwarteten Gasproduktionsraten, für die gewählte Lagerauslegung und für eine typische Gasdurchlässigkeit des Wirtgesteins der Gasüberdruck in den Kavernen unterhalb des Schwellendrucks für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung bleibt. Für solche Bedingungen müssten keine zusätzlichen technischen Massnahmen zur Gasabführung getroffen werden. Unter der Annahme konservativer Gasproduktionsraten oder wenn die Gasdurchlässigkeit des Gebirges sehr gering ist (Gaspermeabilität im Opalinuston $\leq 10^{-21} \text{ m}^2$), könnte der Gasdruck über den Schwellendruck für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung ansteigen. Dann wäre die Verwendung geeigneter Verfüll- und Versiegelungsmaterialien zur Gewährleistung der Freisetzung der Gase auch über den Zugangsstollen eine geeignete Massnahme, um den Gasdruck zu begrenzen.

Es konnte in NTB 08-07 gezeigt werden, dass bei entsprechender Auslegung der Verfüllung und Versiegelung des Zugangstunnels ein Teil des Gases durch das Wirtgestein und ein weiterer Teil durch den verfüllten und versiegelten Zugangstunnel transportiert wird, so dass die maximalen Drücke in den SMA-Kavernen keine Werte erreichen, die zu einer Beeinträchtigung der Langzeit-Barrierenwirkung der technischen und geologischen Barrieren führen.

HAA-Lager

Im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis wurde die Gasbildung und deren Auswirkung auf die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und LMA im Opalinuston untersucht (NTB 02-03; NTB 02-05; NTB 04-06). Speziell wurde die mögliche Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein detailliert behandelt, da Opalinuston sowohl eine niedrige hydraulische Durchlässigkeit als auch eine niedrige Permeabilität für Gas aufweist. Es wurde aufgezeigt, durch welche Prozesse das Gas durch das Wirtgestein transportiert wird und dass diese Prozesse die Langzeitbarrierenwirkung des Wirtgesteins nicht wesentlich beeinträchtigen. Es wurde auch gezeigt, dass keine der beiden anderen grundsätzlich möglichen Auswirkungen (Auspressen von Porenwasser mit Radionukliden und Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) die Langzeitsicherheit in Frage stellt. Für Wirtgesteine mit einer höheren hydraulischen Durchlässigkeit und Gaspermeabilität als Opalinuston (d. h. für alle anderen potenziellen Wirtgesteine) verliert die Bildung von neuen Freisetzungspfaden für Radionuklide im Wirtgestein an Bedeutung.

Bewertung der Eignung von Wirtgesteinen

Zum Zweck der Ableitung von geologischen Standortgebieten werden keine Mindestanforderungen an das Wirtgestein bezüglich Gastransporteigenschaften gestellt; hingegen wird bei der Bewertung der Wirtgesteine anhand des Indikators 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' berücksichtigt, inwiefern bauliche Massnahmen zur Ableitung der im Lager produzierten Gase entlang der Zugangsbauwerke notwendig sind.

Beurteilung des ENSI

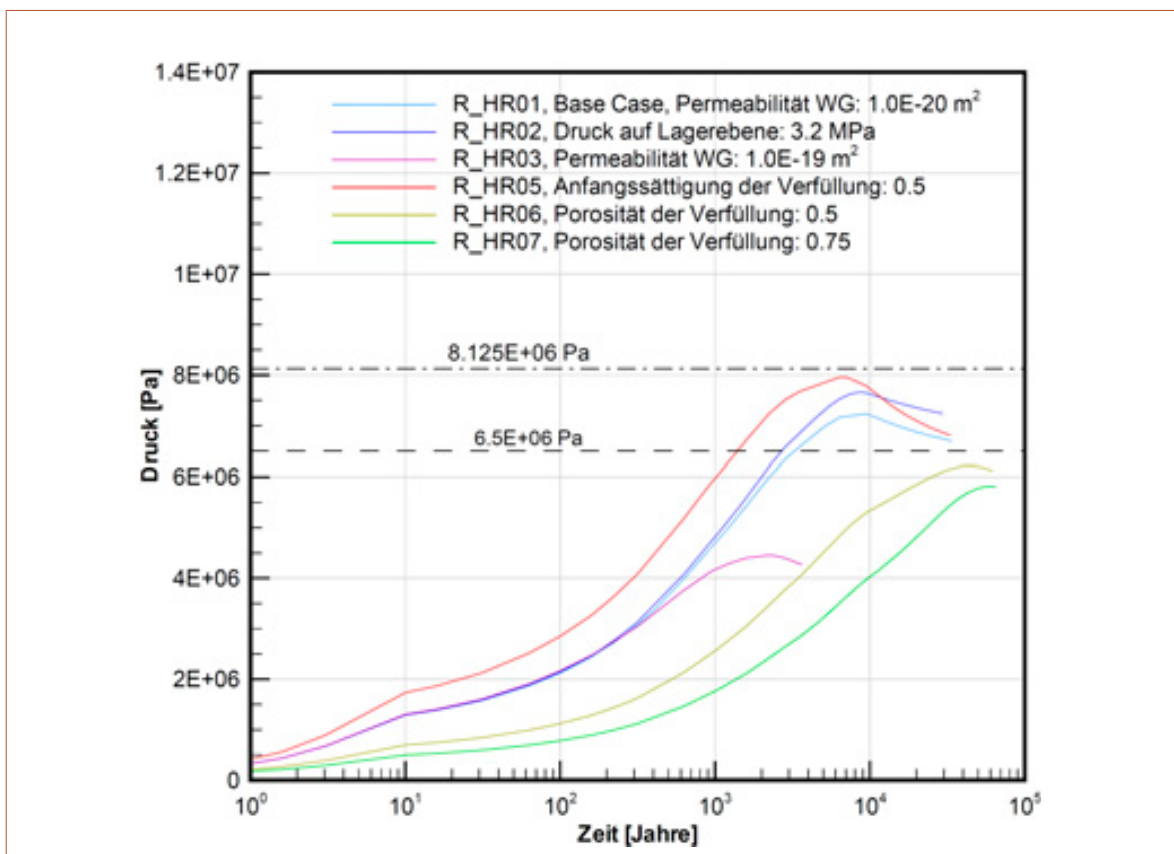
SMA-Lager im Opalinuston

Das Vorgehen der Nagra, den Nachweis der Beherrschbarkeit des Gastransportes für alle betrachteten Wirtgesteine anhand des Beispiels eines SMA-Lagers in einem Wirtgestein mit sehr

geringer Gaspermeabilität wie dem Opalinuston zu führen (NTB 08-07), ist für Etappe 1 stufengerecht. Die Überprüfung der verwendeten Konzepte der Nagra (Emch+Berger AG 2009, 2010) und der Resultate der Nagra durch eigene Berechnungen (Figur 3.3-1) mit dem Programm TOUGH2 (ENSI 33/56) zeigen, dass sich bei Annahme von realistischen Gasproduktionsraten und Annahme eines Zweiphasenflusses in Verfüllung und Wirtgestein der Druckaufbau in einer SMA-Kaverne bei geeigneter Dimensionierung der Lagerkavernen und bei Verwendung geeigneter Verfüllmaterialien die Barrierenfunktion des Wirtgesteins nicht in Frage stellt.

In NTB 08-07 werden die gemäss den Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' und 'Lagerbedingte Einflüsse' zu untersuchenden Fragestellungen diskutiert und die Funktionsweise des EGTS wird anhand von verschiedenen Modellrechnungen dargelegt. Der Bericht NTB 08-07 ist vom Ansatz her eine Machbarkeitsstudie, als solche entspricht sie dem Stand der Technik. Das ENSI bewertet die Darlegungen der Nagra zu den gasinduzierten Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit als nachvollziehbar und stufengerecht.

Die in NTB 08-07 beschriebenen Konzepte zur Beherrschung der gasinduzierten Phänomene müssen in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht vertieft werden. Dabei sind auch in NTB 08-07 weitgehend ausgeklammerte Fragen wie bauliche Realisierbarkeit, Langzeit-



Figur 3.3-1: Resultate zweidimensionaler Berechnungen des ENSI (ENSI 33/56) zum zeitlichen Verlauf des Gasdruckaufbaus in den Lagerkavernen eines SMA-Lagers mit dem Programm TOUGH2. Die erhaltenen Kurven erlauben es, die entsprechenden Berechnungen der Nagra nachzuvollziehen (NTB 08-07, S. 93). Die angegebenen Werte $6.5 \cdot 10^6$ Pa und $8.125 \cdot 10^6$ Pa entsprechen dem Schwellendruck für dilatanzkontrollierte Gasausbreitung beziehungsweise dem lithostatischen Druck des Wirtgesteins (WG).

stabilität, Kompatibilität mit den generischen Sicherheitsbetrachtungen und die Konsistenz der verschiedenen Annahmen für Materialien, deren Eigenschaften, Einbauzustände etc. zu berücksichtigen. Für Etappe 1 ergeben sich daraus keine grundsätzlichen Vorbehalte.

Die Nagra argumentiert hinsichtlich der Reduktion des Porenraums im Übergangsbereich von der Kavernenversiegelung ins Wirtgestein, dass dieser Bereich zum Zeitpunkt hoher Gasproduktionsraten (< 10'000 Jahre) völlig aufgesättigt ist. Deshalb nimmt die Nagra an, dass die Wahrscheinlichkeit eines schlechten Funktionierens des EGTS aufgrund von hydrochemischen Wechselwirkungen vernachlässigbar ist. Dass diese Annahme auch für Gesteine mit höherer hydraulischer Durchlässigkeit zutrifft, ist stufengerecht in den Sicherheitsanalysen der weiteren Etappen des SGT zu demonstrieren. Um das Funktionieren des EGTS zu belegen, erachtet das ENSI die Bestrebungen der Nagra als notwendig, das Verständnis der hydrochemischen Prozesse im gesättigten wie ungesättigten Nahfeld der Einlagerungskavernen durch zusätzliche Modellierungen, Labor- und in-situ-Experimente zu verbessern.

HAA-Lager im Opalinuston

Die durch die Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' und 'Lagerbedingte Einflüsse' angesprochenen gasrelevanten Aspekte für ein HAA-Lager im Opalinuston wurden bereits im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweises beurteilt (HSK 35/99). Die Überprüfung zeigte, dass der von der Nagra erbrachte Nachweis generell robust ist und dass irreversible Schäden im Wirtgestein durch die auftretenden Gasdrücke nicht zu erwarten sind.

Die damalige Empfehlung, die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager und zum Transport des entstehenden Gases durch Bentonitverfüllung, Zementverfüllung und Opalinuston führen, seien eingehender zu untersuchen, ist weiterhin gültig. Die Datenbasis zu den Gasdurchlässigkeiten und Gaseintrittsdrücken des Opalinustons ist stufengerecht für die Durchführung der sicherheitstechnischen Betrachtungen in Etappe 1 des SGT, ist aber für die weiteren Schritten der Lagerrealisierung (z. B. durch Auswertung und Weiterführung der Experimente am Mont Terri) zu vertiefen. Das bezieht sich auch auf die von der Nagra vorgebrachte Annahme, dass die Gastransportkapazität infolge des Auftretens von Dilatanz beim Druckanstieg um das Zehnfache linear zunimmt (NTB 02-03, S. 354).

Bewertung der Eignung von Wirtgesteinen

Aus Sicht des ENSI ist es nachvollziehbar, dass die Nagra keine quantitativen Mindestanforderungen formuliert hat, sondern die Eignung des Wirtgesteins hinsichtlich des Gastransports mit dem Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' bewertet. Die bedingt günstige Bewertung für das Wirtgestein Opalinuston für beide Lagertypen ist für das ENSI nachvollziehbar.

Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

Das ENSI hat im Rahmen seiner Überprüfung der Unterlagen der Nagra festgestellt, dass die Berechnungen in Bezug auf die Modellgeometrie und Modellparameter untereinander nicht immer konsistent sind. Unterschiedliche Angaben finden sich beispielsweise in den 2D- und 3D-Berechnungen zum Druckaufbau im SMA-Lager (NTB 08-07, vgl. Tab. 3-3 und Tab. 4-3) oder zu der Porosität für die Mörtelverfüllung im SMA-Lager bei den Radionuklidfreisetzungsberechnungen

(NTB 08-05, S. A3-17) und für die Berechnung von Gasspeicherung und Gastransport (NTB 08-07, S. 31). So werden auch unterschiedliche Inventare für die Gasberechnungen (MIRAM 05) und die Nuklidfreisetzungsberechnung (MIRAM 07) verwendet. Insbesondere fehlen ein für alle Rechenfälle definierter Referenzfall und systematische, nachvollziehbar begründete Parametervariationen, die die identifizierten Modellunsicherheiten hinreichend abdecken.

Das ENSI ist sich bewusst, dass bei der Erstellung der generischen Sicherheitsbetrachtungen in Etappe 1 des SGT gewisse Aspekte teilweise unabhängig voneinander und zeitlich gestaffelt untersucht wurden. Die Verwendung von unterschiedlichen Parameterwerten in den Berechnungen stellen die Schlussfolgerungen der Nagra nicht in Frage. Für die Sicherheitsanalysen der weiteren Etappen des SGT ist jedoch darauf zu achten, dass die verwendeten Modelle und Parameter bei der Beurteilung aller sicherheitstechnischen Aspekte konsistent verwendet werden. Die lagerbedingten Auswirkungen der bisher im MIRAM nicht spezifizierten Abfälle von Grossforschungsanlagen sind stufengerecht in die Sicherheitsanalysen der weiteren Etappen des SGT einzubeziehen.

3.3.5 Wärmeeintrag

Angaben der Nagra

Alle radioaktiven Abfälle generieren Wärme durch den radioaktiven Zerfall der darin enthaltenen Radionuklide. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen sind die im SMA-Lager zu erwartenden Temperaturerhöhungen klein, d. h. die Barriereigenschaften des Wirtgesteins werden thermisch nicht signifikant beeinflusst. Die typischen spezifischen Wärmeleistungen im HAA-Lager sind hingegen ungleich höher als im Falle des SMA-Lagers. Die damit verbundene Temperaturerhöhung hat unter Umständen das Potenzial, die transportrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren zu beeinträchtigen (NTB 08-05, S. 125).

Für die HAA-Lagerauslegung ist die Wärmeentwicklung eine wichtige Einflussgrösse. Die Wärmeentwicklung in einem geologischen Tiefenlager darf nicht zu Temperaturen führen, welche die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen bzw. geologischen Barrieren signifikant beeinträchtigen. Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde die Wärmeentwicklung für Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und LMA berechnet (NTB 01-04) und deren Einfluss auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren analysiert und bewertet. Dabei wurde für die Brennelemente eine Wärmeleistung zum Zeitpunkt der Einlagerung von 1'500 W/Behälter, für die verglasten hochaktiven Abfälle eine solche von rund 700 W/Behälter und für die LMA eine solche von rund 30 W/m Tunnel angenommen. Im Projekt Entsorgungsnachweis wurde von einer Kokille pro Endlagerbehälter ausgegangen, während in NTB 08-05 von zwei Kokillen (verglaste hochaktive Abfälle) pro Endlagerbehälter ausgegangen wird. Auch wenn nicht ausgeschlossen werden konnte, dass bei den BE und HAA der innerste Teil der Bentonit-Barriere beeinträchtigt wird, wurde gezeigt, dass dies keine bedeutenden Auswirkungen auf das Verhalten des Gesamtsystems hat.

Das verbesserte Verständnis der thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Eigenschaften der Bentonitverfüllungen ist ein Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten der Nagra. Forschungsbe-

darf besteht insbesondere für das Verhalten des Bentonits bei Temperaturen, die deutlich über 100° C liegen. Zu diesem Zweck wurden langjährige Forschungsprojekte initiiert (NTB 08-02).

Beurteilung des ENSI

Die Nagra beurteilt die Folgen des Wärmeeintrags in einem Tiefenlager anhand des Kriteriums 'Lagerbedingte Einflüsse'. Die Nagra hat dies für ein HAA-Lager im Wirtgestein Opalinuston in NTB 01-04 dargelegt, in NTB 08-05 aktualisiert und zusätzlich für ein SMA-Lager betrachtet. Die von der Nagra dargelegten Überlegungen sind für den Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' nachvollziehbar.

Die Überprüfung der Wärmeausbreitung und der daraus resultierenden Auswirkungen auf das Fernfeld eines HAA-Lagers für das Projekt Entsorgungsnachweis mittels zweidimensionaler Modellrechnungen (Emch+Berger AG 2005) zeigt, dass sich die Temperatur im Opalinuston zusätzlich zum bereits herrschenden geothermischen Temperaturfeld um 20 bis maximal 50° C erhöhen kann. Die Berechnungen zeigen weiter, dass im Opalinuston mit keinen thermisch induzierten Zugspannungen zu rechnen ist. Damit ist auch nicht mit der Bildung von Rissen und neuen Wasserwegsamkeiten im Opalinuston zu rechnen.

Da die spezifische Wärmeleistung von HAA um mehrere Größenordnungen grösser ist als jene von ATA oder SMA (NTB 08-05, Fig. 3.2-3b), sind die Folgen der Temperaturentwicklung bei den letzten beiden Abfallkategorien viel geringer. Berechnungen des ENSI zeigen, dass nur eine unwesentliche Temperaturerhöhung im Umfeld der SMA-Lagertunnel zu erwarten ist. Es ist deshalb angemessen, dass die Nagra im Standortauswahlverfahren auf diesbezügliche Mindestanforderungen im Falle des SMA-Lagers verzichtet. Dass allfällige Auswirkungen auf die eingelagerten Abfälle und das Wirtgestein durch die Zementverfüllung in den Lagerkavernen (anfängliche Hydratationswärme) in Etappe 1 von der Nagra nicht betrachtet wurden, ist vertretbar. Dieser Aspekt ist aber stufengerecht in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung zu berücksichtigen.

3.4 Herleitung der Anforderungen an die Geologie

Angaben der Nagra

Die Festlegung der Anforderungen an die Geologie erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden die Indikatoren festgelegt, welche die im SGT aufgeführten Kriterien adäquat erfassen und im Verfahren zur Festlegung von geologischen Standortgebieten verwendet werden. In einem zweiten Schritt werden die Anforderungen bzw. Bewertungsskalen für die Indikatoren festgelegt.

Modellrechnungen zur Radionuklid-Freisetzung kommen für Indikatoren zur Anwendung, welche für die Barrierenwirkung des Gesamtsystems von Bedeutung sind. Bei diesen Modellrechnungen handelt es sich einerseits um Resultate aus Sicherheitsanalysen für die verschiedenen Projektmeilensteine (vgl. Projekte Wellenberg NTB 93-26, Kristallin-I NTB 93-22, Entsorgungsnachweis NTB 02-05) sowie um generische Sicherheitsbetrachtungen. Die Resultate der Berechnungen kommen insbesondere zur Anwendung für die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Länge der

Freisetzungspfade', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade', 'Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'.

Quantitative Modellvorstellungen zum Verhalten einzelner Barrieren oder Prozesse kommen zum Einsatz, wenn das Verhalten einzelner Barrieren oder spezifische Prozesse im Vordergrund stehen. Dazu gehören insbesondere Indikatoren, die wichtig sind im Hinblick auf geometrische Aspekte (vereinfachte Abschätzungen für die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Laterale Ausdehnung', 'Platzangebot untertags') oder auf geochemische Aspekte (Modellvorstellungen zur Sorption: Einfluss der Indikatoren 'Mineralogie', 'pH', 'Redox-Bedingungen', 'Salinität') sowie weitere Indikatoren (insbesondere 'Chemische Wechselwirkungen', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur').

Eine weitere Grundlage bilden Beobachtungen und Erfahrungen (Messwerte, Beobachtungen und Erfahrungswerte, teilweise ergänzt durch quantitative und qualitative Modellvorstellungen), welche in den technischen Berichten der Nagra (z. B. im Zusammenhang mit den verschiedenen Projektmeilensteinen, vgl. Projekte Wellenberg, Kristallin-I, Entsorgungsnachweis) sowie in der Literatur dokumentiert sind. Die Messwerte, Beobachtungen und Erfahrungswerte werden insbesondere für Indikatoren verwendet, die wichtig sind im Hinblick auf Nutzungskonflikte im Untergrund ('Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins', 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins', 'Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins', 'Mineralquellen und Thermen', 'Geothermie') oder im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen ('Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit', 'Erfahrungen', 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation') sowie für zahlreiche weitere Indikatoren (insbesondere 'Tongehalt', 'Selbstabdichtungsvermögen', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Abstand zu regionalen Störungszonen', 'Seismizität', 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum').

Betrachtungszeitraum

Bei den quantitativen Anforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre spielt der Betrachtungszeitraum eine spezielle Rolle, da die Anforderungen für verschiedene Indikatoren von diesem abhängen. Deshalb wird der Betrachtungszeitraum festgelegt, bevor die potenziell wichtigen Indikatoren diskutiert werden (NTB 08-05, S. 160).

Der Betrachtungszeitraum legt fest, wie lange die Barrieren des SMA- bzw. HAA-Lagers ihre Funktion zu erfüllen haben. Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Lagerkammern aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt werden. Auch für diese Zeiten soll der Variationsbereich der von einem geologischen Tiefenlager ausgehenden möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Ungewissheiten im Bereich der natürlichen radiologischen Umweltrisiken liegen (ENSI-G03). Der erforderliche Betrachtungszeitraum ist in erster Linie abhängig vom zugeteilten Nuklidinventar und seiner zeitlichen Entwicklung (radioaktiver Zerfall) und wird deshalb für SMA- und HAA-Lager unterschiedlich sein.

Als Betrachtungszeitraum wird zunächst aufgrund der Erkenntnisse aus früheren eigenen Sicherheits- und Systemanalysen sowie aus internationalen Erfahrungen für das SMA-Lager 100'000 Jahre und für das HAA-Lager 1 Million Jahre veranschlagt. Die Resultate der generischen Sicherheitsbetrachtungen zu diesem Thema im vorliegenden Projekt zeigen, dass diese Werte vernünftig sind und dass auch für diese Phase, für die angenommen wurde, dass sich die Lagerkammern im Einflussbereich der Erdoberfläche befinden, weder durch den Konsum von Trinkwasser noch durch die Direktstrahlung aus dem Boden eine übermässige Strahlenbelastung zu erwarten ist.

Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins

Der Vorschlag der Nagra enthält zwei Varianten bezüglich der Mindestanforderung an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins für das SMA-Lager von 10^{-10} m/s und 10^{-9} m/s. Aufgrund der Einschätzung der geologischen Möglichkeiten in der Schweiz, die zeigt, dass es genügend geeignete Wirtgesteine resp. einschlusswirksame Gebirgsbereiche mit einer grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-10} m/s oder besser gibt, wird die entsprechende Variante der Abfallzuteilung als Referenzzuteilung bezeichnet, die Variante für 10^{-9} m/s als alternative Zuteilung. In beiden Varianten werden alle ATA dem HAA-Lager (LMA-Teil) zugeteilt (NTB 08-05, Zusammenfassung).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die Herleitung der Anforderungen an die Geologie hinsichtlich zweier Aspekte geprüft:

- Wurden die im SGT vorgegebenen Kriterien stufengerecht korrekt umgesetzt?
- Sind die durch die Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen Vorgaben nachvollziehbar?

Die Nagra verwendet 49 Indikatoren, um die 13 im Sachplan vorgegebenen Kriterien in ihrem Einengungsverfahren bewerten zu können. Das ENSI hat die Herleitung der Anforderungen an die Indikatoren geprüft und in ENSI 33/43 detailliert beschrieben. Es kommt zum Schluss, dass die Nagra die im Konzeptteil des Sachplans erwähnten Indikatoren bei der Herleitung der Anforderungen an die Geologie verwendet hat und dass die aus den Indikatoren abgeleiteten Anforderungen und Bewertungsskalen nachvollziehbar sind.

Betrachtungszeitraum

In der Richtlinie ENSI-G03 wird gefordert, dass für die Festlegung des Nachweiszeitraums die zeitliche Entwicklung des radiologischen Gefährdungspotenzials der eingelagerten Abfälle und die Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung massgebend sind. Für einen Zeitraum bis zu einer Million Jahre ist im Rahmen des Sicherheitsnachweises zur Bewertung des geforderten Schutzes die Einhaltung der Schutzkriterien nachzuweisen. Für spätere Zeiten ist der Variationsbereich der von einem geologischen Tiefenlager ausgehenden möglichen regionalen radiologischen Auswirkungen unter Berücksichtigung der inhärent vorhandenen Ungewissheiten zu ermitteln. Diese Auswirkungen dürfen nicht wesentlich höher als die natürliche radiologische Belastung sein. Die Berechnungen der radiologischen Auswirkungen für die ferne Zukunft sind nicht als effektive prognostizierte Strahlenexpositionen einer definierbaren Bevölkerungsgruppe

zu verstehen, sondern als Indikatoren zur Bewertung der potenziellen Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre. Szenarien, in denen der Tiefenlagerbereich aufgrund geologischer Vorgänge zunehmend Einflüssen der Erdoberfläche ausgesetzt wird, sind in diese Betrachtungen einzubeziehen.

Die für die Bestimmung des Betrachtungszeitraums verwendeten Modelle 1 bis 3 (NTB 08-05, S. 60 – 68) sind aus Sicht des ENSI geeignet, die radiologischen Konsequenzen der Freisetzung von im Grundwasser gelösten Radionukliden aus den nahe an der Erdoberfläche liegenden Lagerkammern sowie der Freisetzung durch Erosion aufzuzeigen. Die Überprüfung der Annahmen und Resultate durch das ENSI (ENSI 33/55) zeigt ebenfalls, dass die von der Nagra hergeleiteten Betrachtungszeiträume von 100'000 Jahre (SMA-Lager) und 1 Million Jahre (HAA-Lager) nachvollziehbar sind. Die Nagra setzt damit die Anforderungen aus der Richtlinie ENSI-G03 um.

Beurteilung der Herleitung der Anforderungen an die Indikatoren

Die Herleitung der quantitativen Vorgaben ist nach Ansicht des ENSI stufengerecht durch die generischen Sicherheitsbetrachtungen erarbeitet worden. Im Folgenden werden zusammenfassend diejenigen 22 der insgesamt 49 Indikatoren bewertet, die Mindestanforderungen (und in wenigen Fällen auch verschärfte Anforderungen) an Eigenschaften der Geologie stellen, sowie jene 5 Indikatoren, für die die Nagra keine Mindest-, aber verschärfte Anforderungen stellt.

Beurteilung der Bewertung der Indikatoren mittels Zahlenwerten

Die im Gutachten ausgeführten Bewertungen des ENSI beziehen sich auf die im SGT vorgegebenen Bewertungsstufen für Kriterien. Die von der Nagra vorgenommene Bewertung der Indikatoren mittels Zahlenwerten übernimmt das ENSI aus folgenden Gründen nicht:

- Die Zahlenwerte suggerieren eine Genauigkeit, die bei der Bewertung einzelner geologischer Aspekte aus Sicht des ENSI nicht vorhanden ist.
- Den Bewertungsstufen sehr günstig, günstig, bedingt günstig und ungünstig werden unterschiedlich grosse Zahlenbereiche zugeordnet (NTB 08-03, Anhang C.1). Dies kann aus Sicht des ENSI eine unbeabsichtigte Verzerrung verursachen.
- Gewisse Indikatoren (z.B. Indikator 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)') wirken nicht differenzierend und können damit das Ergebnis der Aggregation beeinflussen.

Das ENSI hat seine eigenen Bewertungen auf eine mehr qualitative Bewertung und die im SGT vorgegebenen Bewertungsstufen ausgerichtet. Dies führt auch dazu, dass die Tabellen mit den Bewertungen (Tabellen 5.2-2, 6.4-1 und 6.4-2) nur beschränkt einen Vergleich innerhalb von Wirtgesteinen und Standortgebieten zulassen. Das Ableiten einer Rangliste unter den Wirtgesteinen oder Standortgebieten aus diesen Tabellen ist wegen der Verschiedenheit der 13 Kriterien und wegen unterschiedlichem Kenntnisstand nicht sinnvoll.

Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT an Wirtgesteine: SMA: ≤ 800 m u. T. (Sedimentgesteine), $\leq 1'200$ m u. T. (Kristallingesteine) und HAA: ≤ 900 m u. T. (Sedimentgesteine) $\leq 1'200$ m u. T. (Kristallingesteine). Für Schritt 5 SGT gelten dieselben Zahlenwerte, jedoch bezogen auf die Mitte des notwendigen, einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Für den Opalinuston in der östlichen Subjurassischen Zone ≤ 700 m u. T. (SMA) bzw. ≤ 800 m u. T. (HAA), sonst keine verschärften Anforderungen.

Die maximale Tiefenlage eines geologischen Tiefenlagers wird einerseits von bergbautechnischen und felsmechanischen Aspekten und andererseits von den im Untergrund herrschenden Temperaturen bestimmt: Je tiefer, desto höher die Temperatur und desto höher die auftretenden Gebirgsspannungen und damit desto schwieriger die bautechnischen Verhältnisse. Die Nagra berücksichtigt dies und stützt sich bei der Herleitung der Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen auf Erfahrungswerte aus dem Untertagebau, auf semiempirische Gesetzmässigkeiten sowie auf orientierende felsmechanische Berechnungen ab. Im Einklang mit internationalen Erfahrungen sollten die Maximaltemperaturen des Gebirges zudem 55°C nicht überschreiten, da sonst die Machbarkeit (Bau und Betrieb) eines Lagers aus thermischer wie bergbautechnischer Sicht erheblich erschwert wird. Durch die Begrenzung der maximalen Tiefenlage hat die Nagra diesen Aspekten Rechnung getragen. Die Vorgaben des Sachplans wurden von der Nagra damit adäquat berücksichtigt.

Das ENSI hat mit seinen Bautechnik-Experten (Ingenieurgeologie ETH Zürich und Emch+Berger AG) die Herleitung der Anforderungen an die maximale Tiefenlage bezüglich bautechnischer Machbarkeit in Sedimentgesteinen überprüft (Amann und Löw 2009). Bezüglich SMA-Lager kommt das ENSI zum Schluss, dass die festgelegten Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen nachvollziehbar und sinnvoll sind. Im Falle des HAA-Lagers hält das ENSI fest, dass der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen (kreisrunde Querschnitte, Durchmesser 2.5 m bei eingeschränkter Sicherung einzig mit Anker und Netzen) für intakten Opalinuston nur bis in eine Tiefenlage von 650 m erbracht ist. Für Tiefen > 650 m wären zusätzliche flächige Stützmittel notwendig, welche bisher im Lagerkonzept der Nagra nicht aufgeführt sind. Für diese Tiefen legt die Nagra neue Ausbaukonzepte (NAB 09-07) vor; die vom ENSI als zweckmässig beurteilt werden. Für diese Ausbaukonzepte (z. B. Liner aus Spritzbeton) sind aber die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit und die sicherheitstechnisch relevanten Prozesse im Nahfeld noch nicht im Detail untersucht. Weitere Untersuchungen sind in Etappe 2 vorzulegen.

Für Kristallingesteine sind die angegebenen maximalen Tiefenlagen aus den Kristallinprojekten der Nagra (NTB 93-01) ableitbar. Wegen der hohen Gesteinsfestigkeiten wird hier die maximale Tiefenlage nicht aus felsmechanischen oder bergbautechnischen Gründen, sondern durch die Temperaturlimite von 55°C bestimmt (NTB 93-01).

Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Top⁶ notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m u. T. (SMA) und ≥ 400 m u. T. (HAA).

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Unterschiedlich für SMA- und HAA-Lager, abhängig vom Wirtgestein und der Wirksamkeit oberer Rahmengesteine (NTB 08-05, S. A1-10).

Der Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' bezieht sich auf die Distanz zwischen der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Terrainoberfläche (NTB 08-05, S. A1-11). Er dient der Begrenzung der Auswirkungen von Gesteins-Dekompaktionseffekten auf die Langzeitsicherheit. Wenn durch Hebungs- und Erosionsprozesse die Überdeckung abnimmt, können Dekompaktionseffekte zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit um mehrere Grössenordnungen führen.

Die quantitativen Anforderungen an die erforderliche minimale Tiefenlage des Wirtgesteins im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion leitet die Nagra gesteinspezifisch aufgrund von gemessenen Änderungen in der hydraulischen Durchlässigkeit ab. Für die Mergel-Formationen des Helvetikums verweist die Nagra auf tiefenabhängige Messwerte der hydraulischen Durchlässigkeit und der Grundwasserchemie, um die verschärfte Anforderung für SMA-Lager auf ≥ 400 m u. T. festzulegen. Die Abbildung in NTB 08-04 (Fig. 4.3-24) und der zugehörige Text zeigen jedoch, dass die Dekompaktionszone mit hydraulischen Durchlässigkeiten oberhalb von 10^{-10} m/s (Mindestanforderung an die hydraulische Durchlässigkeit für die Referenzzuteilung) bis in eine Tiefe von rund 530 m hinabreicht. Am betroffenen Standortgebietsvorschlag Wellenberg weisen die kretazischen und tertiären Mergel auch unterhalb 530 m bis zur maximalen Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit von 800 m u. T. ein ausreichendes Platzangebot auf, weshalb sich auch unter Berücksichtigung einer Mindestdtiefe von 530 m keine Auswirkungen auf die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete ergeben. Die übrigen abgeleiteten generellen Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen für SMA und HAA bieten den notwendigen Schutz des Wirtgesteins vor Dekompaktionseffekten und genügen nach Ansicht des ENSI aus sicherheitstechnischer Sicht.

Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: SMA: ≥ 200 m u. T.; HAA: ≥ 400 m u. T.

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: dieselben Zahlenwerte, jedoch bezogen auf das Top des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Der Indikator ist eng mit dem Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' verknüpft. Ausgehend vom gewählten Betrachtungszeitraum werden Tiefenlage und daran gekoppelte Hebungsdaten bestimmt, die verhindern, dass ein Tiefenlager im Betrachtungszeitraum in den Einflussbereich der Erdoberfläche gelangt. Die maximal in der Schweiz aktuell gemessenen Hebungsdaten betragen ca. 1.5 mm pro Jahr (NAB 07-13) und sind damit kleiner als die für ein SMA-Lager maximal angenommene Hebungsraten von ≤ 2 mm pro Jahr. Dieser Wert bestimmt über den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren die minimale Tiefenlage von 200 m. Die für HAA-Lager maximal angesetzte Hebungsraten von 0.4 mm pro Jahr (entsprechend einer Tiefen-

⁶ Der Begriff «Top» bezeichnet die Obergrenze eines Tiefenbereichs oder einer Gesteinseinheit.

lage von 400 m) entspricht in etwa der aktuellen Hebung am Alpenrand. Die linienhafte, d. h. maximale Erosion entlang der grossen Flüsse der Nordschweiz beträgt seit der Ablagerung der Höheren Deckenschotter vor 1.8 bis 2.5 Million Jahren ca. 200 bis 250 m. Dies entspricht einer Erosionsrate von 0.08 – 0.14 mm pro Jahr (NTB 99-08), ähnlich den heute mit geodätischen Methoden gemessenen Hebungsraten (NAB 07-13). Da die maximale lineare Erosion nicht tiefer greifen kann als die langfristige Hebung, die aus geodynamischer Sicht in den nächsten Millionen Jahren konstant bleiben oder geringfügig zunehmen wird, bewertet das ENSI die vorgelegten Bewertungsstufen des Indikators als zweckmässig und konservativ. Für SMA genügen die Mindestanforderungen, sofern die gesteinspezifisch variable Mächtigkeit der oberflächennahen Auflockerungszone geringer als 200 m ist.

Klimaprognosen und Landschaftsentwicklung

Die letzten 630'000 Jahre waren von schnellen Wechseln zwischen Kalt- und Warmzeiten geprägt, wobei die Kaltzeiten etwa im Abstand von 100'000 Jahren eintraten. Die Klima-Umstellung erfolgte jeweils innerhalb von weniger als 10'000 Jahren. Diese relativ langfristigen Klimaänderungen werden von der Form der Erdumlaufbahn um die Sonne, der Schiefe und einem Kreiseltaumeln der Erdrotationsachse gesteuert, deren zyklische Schwankungen die Stärke der Sonneneinstrahlung beeinflussen. Daran sind die Menge der Treibhausgase in der Atmosphäre und damit die Durchschnittstemperaturen an der Erdoberfläche gekoppelt. Die astronomischen Zyklen sind über hunderte von Millionen Jahren unverändert geblieben, so dass die zukünftige Klimaentwicklung grundsätzlich vorausberechnet werden kann. Nach solchen Berechnungen wäre in ca. 60'000 Jahren eine moderate kurze Kaltzeit zu erwarten. Erst in 100'000 Jahren wäre eine ausgeprägte Kaltzeit zu erwarten, in der Gletscher das Alpenvorland, aber kaum die Vorstossweite der letzten Eiszeit erreichen würden. Ob innerhalb der nächsten Million Jahre unter natürlichen Klimabedingungen überhaupt ein Gletschervorstoss die bisherige maximale Grenze oder auch nur die Vorstossweite der letzten Eiszeit erreichen könnte, ist nur unter Annahmen abschätzbar.

Es besteht die Möglichkeit, dass die Menschheit durch die Freisetzung von Kohlendioxid und Methan die natürliche Klimazyklizität

durchbricht und eine künstliche Warmzeit erzeugt, die über 150'000 Jahre oder länger (bis 500'000 Jahre) andauern könnte. Die Schweiz hätte durch den Treibhaus-Effekt einer künstlichen Warmzeit mit mehr Regen und sehr milden Wintern zu rechnen, wodurch die Alpengletscher zunächst weitestgehend verschwinden und die Alpen von Wäldern bedeckt würden. Das Treibhausklima wird vermutlich bereits in 100 Jahren die Umwelt massiv verändert haben und sich höchstwahrscheinlich über tausende von Jahren hinweg nur sehr langsam abschwächen und auf einem Temperaturniveau verharren, das mindestens 1 bis 2° C wärmer ist als das gegenwärtige Klima. Falls eine überlange künstliche Warmzeit eintritt, würde der in ca. 50'000 Jahren komplett verfüllte Bodensee in der Folge als Schwemmebene vom Alpenrhein eingeschnitten werden. Der Hochrhein würde in 150'000 Jahren unterhalb von Schaffhausen 10 m bis 15 m tiefer eingeschnitten sein und alle Flüsse im Schweizer Mittelland blieben in ihrem aktuellen Bett fixiert. Diese Art der Landschaftsentwicklung ist im Detail vergleichsweise gut vorher-sagbar.

Unklar und massgeblich von der Treibhausgas-Freisetzung der Menschheit abhängig ist die Klimaentwicklung beim Übergang einer künstlichen Warmzeit in den natürlichen Kaltzeit-Modus, weil durch die Wärme und Vegetationsverbreitung zu Beginn eines solchen Kaltzeitzyklus sehr viel Feuchte in der Atmosphäre vorhanden wäre und die Gletscherausbreitung verstärken könnte.



Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 200 m (SMA) und ≥ 400 m (HAA) unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen.

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich ≥ 300 m (SMA) und ≥ 500 m (HAA) unter Felsoberfläche im Bereich von übertieften Felsrinnen; ≥ 200 m (SMA) und ≥ 400 m (HAA) unter Felsoberfläche ausserhalb von übertieften Felsrinnen.

Glaziale Tiefenerosion kann potenziell in relativ kurzer Zeit (d. h. in zehntausenden von Jahren) im Rahmen einer Vorlandvergletscherung erfolgen (NTB 99-08). Dabei ist die erosive Kraft des Gletschers dort am grössten, wo der Untergrund weich und leicht erodierbar ist. So sind in weichen Molassegesteinen Rinnen von über 200 m Tiefe ausgehobelt worden. Einmal geschaffene

Glaziale Tiefenerosion

Glaziale Tiefenerosion kann ein geologisches Tiefenlager potenziell gefährden. Dieser Erosionsprozess greift oft unter einem Gletscher durch unter Druck stehendes Schmelzwasser in den Untergrund ein. Der Wasserdruck wird massgeblich durch die Eisdicke bestimmt. Durch den hohen Wasserdruck werden Gerölle an der Basis von Gletschern in Richtung Gletscherzunge gespült. Auch Gletschereis selbst kann durch die an der Basis eingefrorenen Felsblöcke Felsrinnen ausschürfen. Feste Gesteine wie z. B. unverkarstete Kalke des oberen Jura (Malm) widerstehen der Tiefenerosion weit besser als z. B. mittelländische Molasse-Schichten (Tertiär).

Die Erosion konzentriert sich an Linien mit weichem Untergrund, wie z. B. nicht gefrorenen Ablagerungen von Seen und Flüssen. Daher wird in einer Abfolge von Eiszeiten eine existierende Rinne meistens, aber nicht immer, in der nächstfolgenden Eiszeit wieder ausgeschürft, da in der vorgehenden Zwischeneiszeit (Warmzeit) in der Rinne typischerweise ein See mit Flussablagerungen aufgefüllt wird. So wird etwa der Bodensee, der heute rund 250 m tief ist und dessen Felsuntergrund nur knapp über dem Meeresspiegel liegt, in etwa 50'000 Jahren mit der Kies-, Sand- und Schlammfracht des Alpenrheins aufgefüllt sein und eine Schwemmebene bilden.

Bedeutende glaziale Tiefenerosion kann im Schweizer Mittelland nur erfolgen, wenn das Gletschereis sehr weit vorstösst und entsprechend dick ist. In der letzten Eiszeit (Würm) haben die Vorlandgletscher mindestens zweimal die übertieften Rinnen nordwestlich der Linie Zürich-Frauenfeld erreicht, ohne darin die Seeablagerungen der letzten Warmzeit vollständig auszuräumen. Für die Übertiefung der Rinnen kommen nur 5 Eiszeiten in Frage, die jeweils vor ca. 630'000, 430'000, 340'000, 250'000 und 180'000 Jahren ihre maximale Vorstossweite erreichten. Je älter also die tiefste Verfüllung einer Rinne an ihrem nordwestlichen Ende ist, desto weniger Phasen der glazialen Übertiefung bleiben übrig und desto geringer ist im natürlichen Klimazyklus die Wahrscheinlichkeit, dass eine zukünftige hypothetische «grösste» Eiszeit wiederkehrt und alles lockere Material aus den Rinnen ausräumt und den Fels darunter tiefer einschneidet.



Altersbestimmungen an Ablagerungen in übertieften Felsrinnen sind für das zeitliche Verständnis besonders wichtig. Geeignete Methoden zur Altersbestimmung von über 300'000 Jahre alten Ablagerungen sind in der Wissenschaft erst gerade verfügbar geworden und entsprechende Forschungsprogramme wurden gestartet.

übertiefte Täler werden in Warmzeiten wieder aufgefüllt. Die Füllungen können aber in einer späteren Eiszeit rasch wieder ausgeräumt werden, insbesondere da sich Gletscher bei ihren Vorstößen mehrheitlich an bestehenden Talfurchen orientieren (Haerberli 2004). Es ist daher aus Sicht des ENSI und seiner Experten korrekt, dass sich der Indikator an der Felsoberfläche orientiert. Unterschiedliche Werte für SMA- und HAA-Lager rechtfertigen sich aufgrund der Möglichkeit einer (SMA) oder mehrerer (HAA) Eiszeiten im Betrachtungszeitraum und der Tatsache, dass die entsprechenden stratigraphischen Profile oberhalb des für das HAA-Lager einzigen Wirtgesteins Opalinuston mit den Malmkalken einen ausgesprochenen Erosionshärtling aufweisen. Die Verschärfung der Anforderung um je weitere 100 m ist sicherheitsgerichtet. Die Herleitung der quantitativen Anforderungen für SMA und HAA ist daher aus Sicht des ENSI nachvollziehbar, die abgeleiteten Anforderungen genügen aus Sicht des ENSI für Etappe 1 SGT. Laufende Forschungsarbeiten der Nagra zum Thema glaziale Tiefenerosion werden die Kenntnisse dazu weiter verbessern.

Indikator 'Mächtigkeit'

Mindestanforderungen der Nagra in Schritt 4 SGT: ≥ 100 m (Sedimentgesteine) bzw. ≥ 50 m (Sedimentgesteine mit Akkumulationspotenzial) bzw. ≥ 200 m (Kristallingesteine)

Mindestanforderungen der Nagra in Schritt 5 SGT:

SMA: Nutzbare 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.

HAA: Nutzbare Mächtigkeit ≥ 100 m; Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis Opalinuston: je ≥ 20 m.

Verschärfte Anforderungen der Nagra in Schritt 5 SGT:

SMA: Nutzbare Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Abzug 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden; Nutzbare Mächtigkeit ≥ 150 m für die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit Rahmengesteinen (davon ≥ 75 m innerhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'); Nutzbare Mächtigkeit ≥ 200 m für Effinger Schichten und Helvetikum.

HAA: Nutzbare Mächtigkeit ≥ 100 m für Opalinuston mit Abzug 30 % auf die Mächtigkeit von Rahmengesteinen, wo diese zum Erreichen der notwendigen Mächtigkeit benötigt werden. Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis des Wirtgesteins: Opalinuston: je ≥ 40 m.

Die Berücksichtigung der Mächtigkeit des Wirtgesteins und seiner Rahmengesteine fließt in die Beurteilung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' ein. Die Nagra formuliert, abgeleitet aus den Resultaten von sicherheitstechnischen Betrachtungen, quantitative Zielvorgaben für die Evaluation von geeigneten Wirtgesteinen (NTB 08-05). Die Vorgaben des Sachplans sind damit adäquat berücksichtigt worden. Das ENSI hat mit eigenen Berechnungen zur Nuklidenausbreitung die Resultate der Nagra nachvollziehen können. Die Anforderungen an die Mächtigkeit der Wirtgesteine sind vernünftig.

Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: SMA und HAA: Der 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.

Die Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse (z. B. regionale Störungszonen) fliesst in die Beurteilung des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung' ein. Der festgesetzte Abstand zu den Störungszonen hat eine direkte Auswirkung auf das zur Verfügung stehende Platzangebot für ein Tiefenlager. Die Vorgaben des Sachplans sind adäquat berücksichtigt worden. Die Berechnungen des ENSI zeigen, dass in homogenen tonhaltigen Gesteinen mit den betrachteten K_h -Werten (horizontale hydraulische Durchlässigkeit) von $< 10^{-10}$ m/s ein Minimalabstand von 200 m ausreichend ist, damit die Schutzziele der Richtlinie ENSI-G03 eingehalten werden können.

Das ENSI wendet diesen Indikator sinngemäss auch bei der Abgrenzung der Gesteinsakkumulationen im Helvetikum an (Abstand zu den durchlässigen Kalkgesteinen der angrenzenden Deckeneinheiten), um der Einheitlichkeit des Auswahlverfahrens Rechnung zu tragen.

Indikator 'Laterale Ausdehnung'

Mindestanforderungen der Nagra: Räumliches Potenzial vorhanden für wenig zergliederte Bereiche, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können (SMA: ≥ 2 km² in Schritt 3 und 4 SGT bzw. ≥ 3 km² in Schritt 5 SGT, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1 km, resp. HAA: ≥ 4 km² in Schritt 3 und 4 SGT bzw. ≥ 6 km² in Schritt 5 SGT, bei einer nutzbaren Breite von ≥ 1.5 km).

Der Indikator 'Laterale Ausdehnung' ist korrekt gewählt und quantifiziert einen Teilaspekt des Kriteriums 'Räumliche Ausdehnung'. Die Anforderung an den Indikator 'Laterale Ausdehnung' erscheint plausibel, kann aber nicht isoliert für sich alleine betrachtet werden, da enge Verknüpfungen oder Abhängigkeiten zu anderen Indikatoren bestehen (unter anderem: 'Platzangebot untertags', 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Länge der Freisetzungspfade'). Das ENSI beurteilt die abgeleiteten Anforderungen für SMA und HAA mit Erhöhung der Anforderung für Schritt 5 (Identifikation geeigneter Wirtgesteinskonfigurationen) für gerechtfertigt und nachvollziehbar, um genügende Platzreserven bezüglich ungünstiger geologischer Konfigurationen zu schaffen (vgl. NTB 08-05, S. A2-18).

Indikator 'Platzangebot untertags'

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar (200'000 m³ für SMA 20'000 m³ für BE/HAA, 7'500 m³ für LMA) unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung.

Die Bewertung des nötigen Platzangebots untertags ist qualitativ und unterscheidet zwei Bewertungsstufen, die mindestens günstig sein müssen. Damit wird für ein günstiges Platzangebot untertags mindestens ein zweifach umhüllendes Abfallinventar verlangt, entsprechend der

doppelten lateralen Ausdehnung. Die Gleichbehandlung von SMA und HAA bezüglich einer geforderten zweifachen lateralen Ausdehnung ist aus Sicht des ENSI gerechtfertigt, wenn die Abstände der Kavernen für SMA bzw. Lagerstollen bei HAA in Hinblick auf die Wärmeabgabe robust geplant sind bzw. zukünftig verwendete Brennelemente erst eingelagert werden, wenn die Wärme hinreichend abgeklingen ist. Ein mehr als zweifaches Platzangebot erscheint bei derzeitigem Kenntnisstand ausreichend, um die hinsichtlich der Geologie möglichen Limitierungen und Ungewissheiten zu berücksichtigen.

Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: SMA: $K_v \leq 10^{-9}$ m/s (AZ: Alternative Abfallzuteilung); $K_v \leq 10^{-10}$ m/s (RZ: Referenz-Abfallzuteilung) und HAA: $K_v \leq 10^{-10}$ m/s.

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: SMA: $K_h \leq 10^{-9}$ m/s (AZ: Alternative Abfallzuteilung); $K_h \leq 10^{-10}$ m/s (RZ: Referenz-Abfallzuteilung) und HAA: $K_h \leq 10^{-10}$ m/s.

Der Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' quantifiziert das Kriterium 'Hydraulische Barrierenwirkung' des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und berücksichtigt damit die Vorgaben des Sachplans. Die Nagra hat den Indikator in den Schritten 4 (als Mindestanforderung, verschärfte Anforderung und für die Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine) angewendet (in Schritt 5 wird er nur für die Bewertung der geologischen Standortgebiete eingesetzt). Das ENSI hat mit eigenen Berechnungen die aus einem SMA- und HAA-Lager resultierenden Dosen berechnet. Die abgeleiteten Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit von $K_v = 10^{-10}$ m/s (Referenzzuteilung) und $K_v = 10^{-9}$ m/s (Alternative Zuteilung für SMA) ist für das ENSI nachvollziehbar. Die Anwendung von verschärften Anforderungen für die hydraulische Durchlässigkeit in horizontaler Richtung ist sicherheitsgerichtet.

Indikator 'Redox-Bedingungen'

Mindestanforderung der Nagra für SMA und HAA (Schritt 5 SGT): Keine ungesättigten (oxidierenden) Bedingungen, basierend auf Wirtgesteinseigenschaften bzw. hydrogeologischer Situation.

Der Indikator 'Redox-Bedingungen' ist korrekt gewählt und bewertet einen Teilaspekt des Kriteriums 'Geochemische Bedingungen'. Das ENSI stimmt mit der Nagra überein, dass reduzierende Bedingungen für die Langzeitstabilität der Endlagerbehälter für hochaktive Abfälle, der Brennstoffmatrix sowie für die Rückhaltung der redoxsensitiven Radionuklide im Wirtgestein vorteilhaft sind. Bei gesättigten hydrologischen Verhältnissen, geringer hydraulischer Durchlässigkeit und diffusionskontrollierten Transportmechanismen können Sauerstoff und andere Oxidationsmittel nur wenig in die Umgebung des Tiefenlagers eindringen. Bei Anwesenheit von Mineralen wie z. B. Pyrit oder Siderit können reduzierende Bedingungen wiederhergestellt werden. Um die reduzierenden Bedingungen langfristig zu gewährleisten, ist es notwendig, dass kein O_2 -haltiges Wasser in ein Tiefenlager infiltrieren kann. Das ENSI betrachtet die von der Nagra gewählte Mindestanforderung als sinnvoll und nachvollziehbar.

Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus'

Verschärfte Anforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: HAA: Homogener Aufbau des Wirtgesteins; Wirtgestein enthält keine mehrere Meter mächtigen und über hunderte von Metern ausgedehnten Elemente mit gegenüber dem restlichen Gestein klar reduzierten Barriereigenschaften.

Die verschärfte Anforderung beinhaltet, dass das Potenzial für eine Reduktion der vertikalen Migrationsdistanz für ein HAA-Lager nicht in Kauf genommen wird. Das ENSI stuft die Verwendung der verschärfte Anforderung für das HAA-Lager als sicherheitsgerichtet ein.

Die Nagra stellt für das SMA-Lager keine entsprechende Anforderung. Im Falle des SMA-Lagers ist es aufgrund der grösseren Flexibilität bei der Anordnung der Lagerkavernen eher möglich, Elementen auszuweichen, die die vertikale Migrationsdistanz verkleinern könnten. Das ENSI weist darauf hin, dass mächtigeren lateralen Elementen wohl ausgewichen werden kann, dass dies bei gering mächtigen, häufig auftretenden Elementen aber schwierig sein dürfte. Allfällig daraus folgende radiologische Konsequenzen werden aber mit einer verschärfte Anforderung an die Wirtgesteinsmächtigkeit («Brauner Dogger»⁷, Effinger Schichten, Mergel-Formationen des Helvetikums) beschränkt.

Indikator 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: SMA: $T \leq 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ und HAA: $T \leq 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Wenn keine Erfahrungswerte für die Transmissivität vorliegen: mittlerer Tongehalt $\geq 25 \%$ (bei Sedimentgesteinen, ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.

Gemäss SGT ist der Indikator 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' in den Schritten 4 und 5 anzuwenden und beurteilt die präferenzierten Transportpfade und ihre Eigenschaften. Der Indikator gehört zum Kriterium 'Freisetzungspfade'. Die Nagra hat diesen Indikator im Schritt 4 als Mindestanforderung, sowie in den Schritten 4 und 5 mit einer Bewertungsskala für die bevorzugten Wirtgesteine bzw. für die geologischen Standortgebiete angewendet und entspricht damit den Vorgaben des SGT.

Der Indikator 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' ist wesentlich für die Beurteilung der Wasserführung und des Stofftransports innerhalb der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches'. Auf der Basis eigener Berechnungen (ENSI 33/55) kann das ENSI die Anforderungen aus sicherheitstechnischer Sicht nachvollziehen.

Indikator 'Tongehalt'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: Wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') bzw. die Transmissivität

⁷ Der von der Nagra verwendete Begriff der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' entspricht aus Sicht von swisstopo und ENSI nicht einem nomenklatorisch korrekten Begriff für eine stratigraphische Abfolge. Das ENSI verwendet daher den Begriff in seinen Beurteilungstexten immer markiert mit Anführungszeichen.

(Indikator 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade') vorliegen: Mittlerer Tongehalt $\geq 25\%$ (bei Sedimentgesteinen ausser Evaporiten) oder geologische Beschreibung der Gesteinseinheiten und generelle Erfahrungen.

Der Indikator Tongehalt wird in Schritt 4 des Sachplanverfahrens zur Beurteilung der präferenziellen Transportpfade und ihre Eigenschaften für das Kriterium 'Freisetzungspfade' definiert. Die Nagra hat den Indikator in Schritt 4 für die Kriterien 'Hydraulische Barrierenwirkung' und 'Freisetzungspfade' angewendet. Damit sind aus Sicht des ENSI die Vorgaben des Sachplans berücksichtigt.

Der Indikator «Tongehalt» wird als Mindestanforderung eingesetzt, wenn keine Erfahrungswerte für die hydraulische Durchlässigkeit bzw. die Transmissivität vorliegen. Er hat aus Sicht des ENSI eine wichtige Bedeutung bei der Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche. Dabei wird der Begriff «Tongehalt» von der Nagra als Gehalt an Tonmineralen in Gewichtsprozenten definiert (NTB 08-03, Fussnote 85). Aus Sicht des ENSI ist diese Definition anwendbar, soweit anchizonal oder metamorph überprägte Gesteine ausgeschlossen werden. Hohe Tongehalte im Wirtgestein werden mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit, Quellbarkeit und Selbstabdichtungsvermögen in Verbindung gebracht. Diese Eigenschaften haben nicht ausschliesslich mit dem Gehalt an Tonmineralen zu tun. So können anchizonal überprägte Tongesteine zwar noch grössere Mengen an Tonmineralen wie Chlorit und Illit enthalten, quellbare, selbstabdichtende Mineralphasen aber nicht mehr vorhanden sein (vgl. Kapitel 4.2). Ausserdem wäre für nicht-homogene Gesteine festzulegen, welche Nachteile in Gesteinen vorhanden wären, die zwar einen mittleren Tongehalt von 25 % haben, aber insgesamt bezüglich Tongehalt stark variabel sind.

Zum Grenzwert von 25 % hat die Nagra festgehalten (NAB 09-29), dass sowohl mit Daten von natürlichen Gesteinen als auch von Sand/Bentonit-Mischungen mit variablen Tongehalten gezeigt werden kann, dass die hydraulische Durchlässigkeit (K-Wert) des Gesteins und die Transmissivität präferenzierter Fliesspfade zwischen 0 und ca. 15 % Tongehalt massiv abnehmen. Bei einem Wert ab 20 % Tongehalt nehmen die Durchlässigkeiten und Transmissivitäten nur noch wenig ab (Figuren in NAB 09-29). Das ENSI ist daher mit der Wahl des Grenzwertes von 25 % einverstanden.

Die Anwendung des Indikators 'Tongehalt' bei der Evaluation geeigneter Wirtgesteine bedingt, dass die Grenze von 25 % Tongehalt einem Feldbegriff zugeordnet werden kann. Gemäss NTB 08-04 (Fussnote 61) entspricht der Tongehalt von 25 % etwa dem Feldbegriff eines «Kalkmergels». Es ist davon auszugehen, dass die Feldbeschreibungen tonhaltiger Gesteine auch durch andere Faktoren wie den Organikagehalt (Farbe), und die tektonische Beanspruchung (Schieferung) beeinflusst worden sind. Das ENSI erwartet daher, dass die Ableitung des Tonmineralgehaltes aus vorhandenen Feldbeschreibungen nur ungenau erfolgt ist. Der Begriff des Tongehaltes kann daher bei fehlenden Daten zur Tonmineralogie nur sehr approximativ verwendet werden. Das ENSI ist mit dem Vorgehen der Nagra bei der Wirtgesteinsevaluation einverstanden. Es ergeben sich in der Anwendung des Indikators durch die Nagra aus Sicht des ENSI keine Abweichungen, die auf die in Schritt 4 getroffene Auswahl der Wirtgesteine einen entscheidenden Einfluss hätten.

Indikator 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 3 SGT: Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA), respektive 1 Million Jahren (HAA) keine schwerwiegende grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik bzw. Neotektonik. Für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren (SMA) respektive 1 Million Jahre (HAA) ist eine Beurteilung der geologischen Stabilität möglich.

Gemäss SGT ist dieser Indikator als Teil der Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' und 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' in den Schritten 3 und 5 anzuwenden. Die Nagra hat in Schritt 3 für diesen Indikator Mindestanforderungen gestellt und benutzt ihn zur Bewertung in den Schritten 3 und 5. Aus Sicht des ENSI sind damit die Anforderungen des SGT von der Nagra korrekt umgesetzt worden.

Die Geodynamik und Neotektonik aller geologischen Standortgebiete wird aus Sicht des ENSI vor allem von der zukünftigen tektonischen Entwicklung der Alpen im Wechselspiel mit der klimatischen Entwicklung in Mitteleuropa abhängen. Die Möglichkeiten, diese Entwicklungen vorzusagen, orientieren sich an den heutigen Möglichkeiten, das bestehende krustale Spannungsfeld, die Bewegungen der Kruste in horizontaler und vertikaler Richtung, die potenziell aktivierbaren Strukturen im Untergrund, das Spektrum der Klimaentwicklungen und die jeweils dazugehörigen Prozesse zu erfassen. Für die von der Nagra gewählten Betrachtungszeiträume ist nur beschränkt mit einer Änderung der geologischen Rahmenbedingungen zu rechnen. Die Möglichkeit starker klimatischer Schwankungen wird mit den Überlegungen zum Indikator 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion' abgedeckt. Das ENSI ist daher der Meinung, dass die Herleitung der Anforderungen und die von der Nagra vorgeschlagene qualitative Bewertungsskala aus sicherheitstechnischer Sicht sinnvoll sind.

Indikator 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 3 SGT: Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 Jahren (SMA), resp. 1 Million Jahren (HAA) wird keine vulkanische Aktivität erwartet.

Der Indikator 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' wird im SGT als Teil des in Schritt 3 zu beurteilenden Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' aufgelistet und angewendet. Damit sind die Vorgaben des Sachplans aus Sicht des ENSI berücksichtigt.

Der durch den Indikator geforderte Ausschluss vulkanischer Aktivität durch die Nagra und deren Beschränkung des Indikators auf vulkanische Prozesse sind aus Sicht des ENSI richtig. Die Bewertungsskala der Nagra folgt einer Ausschlussstrategie, d. h. es wird nur zwischen *sehr günstig* (kein Vulkanismus) und *ungünstig* unterschieden (NTB 08-05, S. A1-96). Aus Sicht des ENSI ist diese Betrachtung akzeptabel, da sich die vulkanische Aktivität Mitteleuropas (Intraplattenvulkanismus) nicht durch Gebiete episodischer vulkanischer Aktivität auszeichnet, sondern durch lokale Vorkommen vulkanisch aktiver Gebiete, in denen die Aktivität kurzzeitig blieb und nach längeren Pausen nicht wieder aufgenommen wurde. Das ENSI ist mit der Bewertungsskala der Nagra einverstanden. Durch die Anwendung dieses Indikators werden keine Gebiete abgeschnitten.

Indikator 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)'

Mindestanforderungen der Nagra: Kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung (Schritt 4 SGT) respektive keine Bereiche mit erheblichem Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten im Wirtgestein bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch Verkarstung, unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Situation (Tiefenlage, Topografie; Schritt 5 SGT).

Verkarstungsfähige Gesteine neigen unter spezifischen Bedingungen, insbesondere unter Einfluss von Oberflächenwässern, zur Bildung neuer, unter Umständen hoch transmissiver Wasserwegsamkeiten. Diese beeinträchtigen die Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften, da sie präferenzielle Radionuklid-Freisetzungspfade bilden können.

Mit diesem Indikator wird das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' angesprochen. Im SGT werden die Verkarstungsfähigkeit, die felsmechanischen Eigenschaften und das Selbstabdichtungsvermögen als eigenständige Indikatoren aufgeführt, um das Gesteinsverhalten über lange Zeiträume zu charakterisieren (BFE 2008, S. 60 und 62). Die Nagra bezieht diesen Indikator ausschliesslich auf den Prozess Verkarstung (siehe Titel des Indikators). Weil die anderen Teilaspekte, z. B. die Neigung zu Spröddefomation oder das Selbstabdichtungsvermögen durch andere Indikatoren abgedeckt werden, ist das ENSI mit diesem Vorgehen einverstanden, die Vorgaben des SGT sind erfüllt.

Durch die Mindestanforderung an die Wirtgesteine («kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung») würden Evaporite und Sulfatgesteine grundsätzlich ausgeschlossen. Jedoch hat die Nagra bei der Evaluation der Wirtgesteine in Schritt 4 SGT auch die hydrogeologische Situation (Tiefenlage und Topografie) im betrachteten Verbreitungsraum der Gesteine in die Beurteilung mit einbezogen (NAB 09-29). Das ENSI ist mit den genannten Mindestanforderungen einverstanden.

Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 3 SGT: Erosionsrate für SMA: ≤ 2 mm/a und für HAA: ≤ 0.4 mm/a.

Dieser Indikator ist eng mit dem Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' verknüpft (vgl. auch Beurteilung dort). Der Indikator wird im SGT als Teil des in Schritt 3 zu beurteilenden Kriteriums 'Erosion' aufgelistet, die Anforderungen des SGT werden damit aus Sicht des ENSI berücksichtigt. Die gesamte Schweiz ist mehrheitlich Hebungs- und mit wenigen Ausnahmen Abtragungsgebiet. Der Ansatz, dass Hebung und Erosion dabei in einem Gleichgewicht stehen, ist über sehr lange geologische Zeiträume betrachtet vernünftig und für 1 Million Jahre konservativ (ausser in den Alpen). Ein SMA- bzw. HAA-Lager darf für Zeiträume von 100'000 bzw. 1 Million Jahre nicht in den Einfluss von Oberflächenprozessen gelangen. Dies ist aus Sicht des ENSI mit den Mindestanforderungen an die maximalen Erosionsraten gewährleistet.

Die langfristige Hebung bildet den Maximalwert für Erosion in Flusstälern und über eine Zeitskala von Millionen Jahren das theoretische Potenzial für flächenhafte Erosion (NTB 99-08). Rezentere Hebungsraten betragen in den Alpen weniger als 2 mm pro Jahr und nördlich der Alpen weniger als 0.4 mm pro Jahr (NAB 07-13; NTB 99-08). Realistische flächenhafte Erosionsraten sind in der Nordschweiz (ausserhalb der Alpen) deutlich niedriger als die Hebungsraten (NAB 07-13). Dieses Vorgehen ist transparent und nachvollziehbar, die eingesetzten Raten sind konservativ. Die von der Nagra vorgeschlagene graduelle Bewertung ist aus Sicht des ENSI angemessen.

Neotektonik und Erosion in der Nordschweiz

Die Alpen sind ein aktives Gebirge, das vor allem im Südosten (Venetien) noch heute anhaltend zusammen geschoben wird und Druck auf das Alpenvorland ausübt. Im Bereich der Schweizer Alpen ist der Zusammenschub seit einigen Millionen Jahren gering. Vor 11 bis 10 Millionen Jahren hat dieser Druck die Auffaltung, Nordverschiebung und Hebung des Juras bewirkt. Die Juraufaltung endete allerdings vor etwa 4 bis 5 Millionen Jahren. Vor ca. 5 Millionen Jahren verdoppelten sich die Erosionsraten in den Schweizer Alpen auf ca. 400 bis 600 Meter pro Million Jahre, wodurch ein grosser Anteil der Verdickung der Alpen als Folge des anhaltenden Zusammenschubs kompensiert und der Druck auf das Vorland verringert wurde.

Die tektonischen Strukturen des Juras sind an der Oberfläche bis zur Lägern bei Regensberg zu sehen, setzen sich aber im Untergrund in abgeschwächter Form nach Osten fort. Diese tektonischen Strukturen sind anscheinend seit der letzten Eiszeit praktisch nicht aktiv gewesen und auch für die letzten 2.5 Millionen Jahre zeigen die Schotterablagerungen des Mittellandes nur geringe, meist diffuse Hebungen im Bereich weniger Meter und ganz vereinzelt lokale Verschiebungen bis zu 10 Metern. Die Hebungsraten im nördlichen Mittelland betragen meist 70 bis 120 Meter pro Million Jahre und waren während der letzten 10 Millionen Jahren recht

konstant. Der Wert entspricht der Einschneidungsgeschwindigkeit der grösseren Flüsse. Eine stärkere regionale Zunahme der Hebungsraten, z. B. eine langfristige Verdoppelung, ist aus geologischer Sicht unwahrscheinlich. Die Einschneidungsraten der Flüsse übertrifft die durchschnittliche Abtragungsraten in der Fläche bei weitem. Man erkennt dies an der Erhaltung eiszeitlicher Schotter, die vor 2.5 bis 2 Millionen Jahren auf einer flachwelligen Landoberfläche der Nordschweiz abgelagert wurden. Die von Kalk natürlich verfestigten Schotter werden fast nur durch Lösung abgetragen, also durch Regen, der die Minerale auflöst und über das Grundwasser in die Flüsse schwemmt. Diese Art der Abtragung beträgt im Mittelland ca. 10 Meter pro Million Jahre, je nach Niederschlagsmenge.



Eine gewisse lokale Zunahme der Hebung könnte im Bereich der tektonischen Strukturen des Juras erfolgen, wenn der Druck der Alpen auf das Vorland durch eine Reduzierung der Abtragung als Folge einer zivilisationsbedingten überlangen Warmzeit zunehmen würde. Es dauert aber hunderttausende von Jahren, bevor eine dafür ausreichende Spannung aufgebaut ist. Nordöstlich des Bodensees scheint der Druck der Alpen auf das Vorland auszureichen, um lokal erhöhte Hebungsraten bis 0.7 mm pro Jahr hervorzurufen. Diese Hebungprozesse setzen sich nicht über den Bodensee in das Schweizer Mittelland fort, wo durchwegs geringere Hebungsbeträge beobachtet werden.

Indikator 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 4 SGT: In absehbarer Zeit keine schwerwiegenden Konflikte in Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins. Kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung (Interessenabwägung).

Der Indikator ist Teil des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' und wird von der Nagra aus Sicht des ENSI korrekterweise in Schritt 4 als Mindestanforderung angewendet. Damit entspricht die Nagra den Vorgaben des SGT.

Nutzungskonflikte innerhalb des Wirtgesteins werden für Rohstoffe, Mineralquellen, Thermen und Geothermie getrennt betrachtet und es wird aus Sicht des ENSI nachvollziehbar erklärt, dass sich die Bewertung nutzungswürdiger Rohstoffe auf heutige Vorstellungen von zukünftiger Wirtschaftlichkeit beziehen. Die Bewertung ist qualitativ. Die Bewertungsskala mit einer qualitativen Abstufung in vier Klassen kann grundsätzlich nachvollzogen werden. Berücksichtigt werden nur Wirtgesteine und Regionen, in denen keine schwerwiegenden Konflikte im Zusammenhang mit der Nutzung von Rohstoffen innerhalb des Wirtgesteins bestehen oder in denen kein Potenzial zur Verhinderung der Nutzung von Rohstoffen grosser Bedeutung besteht. Diese Mindestanforderung ist mit Blick auf zukünftige Rohstoffausbeutung aus Sicht des ENSI kritisch zu sehen. Bei aktuellen Rohstoffpreisen werden die Anforderungen als genügend eingestuft, aber bei der Bewertung eines zukünftigen Rohstoffpotenzials (vor allem für Baustoffe, welche gleichzeitig langfristig den Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches vor Erosion sicherstellen) sind auch langfristige Perspektiven einzubeziehen und diesen eine angemessene Bedeutung zuzuordnen.

Indikator 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: wie vorangehender Indikator, aber unterhalb des Wirtgesteins.

Der Indikator ist Teil des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' und wird von der Nagra aus Sicht des ENSI korrekterweise in Schritt 5 als Mindestanforderung angewendet. Damit entspricht die Nagra den Vorgaben des SGT.

Unterhalb der potenziell möglichen Wirtgesteine sind als Erdölmuttergesteine bekannt: Untere Meeresmolasse (Rupelien), Posidonienschiefer (Lias: Kuhn und Etter 1994), Autunien-Schiefer und die Karbonkohlen der Karbontröge (Suva 2002) und könnten zukünftig abgebaut und zur Gewinnung von Öl oder Gas verschwelt werden. Auch Vorkommen von Kohlenwasserstoffen und Kohle in grösserer Tiefe (Permokarbontrög) könnten interessant für eine kommerzielle Nutzung werden. Davon betroffene geologische Standortgebiete sollten dieser langfristigen Gefährdung entsprechend, auch bei der Einrichtung von Schutzzonen, konservativ bewertet werden. Aus Sicht des ENSI ist die von der Nagra formulierte Mindestanforderung stufengerecht.

Indikator 'Mineralquellen und Thermen'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: 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.

Der Indikator spricht das Kriterium 'Nutzungskonflikte' an und wird bei der konfigurations-spezifischen Identifikation und Bewertung (Schritt 5) verwendet. Das Vorgehen der Nagra folgt den Vorgaben des SGT.

Vor dem Hintergrund der in Etappe 1 des Sachplanverfahrens erwünschten grossen Flexibilität bei der Anordnung und Ausgestaltung der Erschliessungsbauwerke sind die quantitativen Anforderungen und Bewertungsskalen angemessen. Die quantitativen Anforderungen für die Lagerzone (Langzeitsicherheit) sind ebenfalls stufengerecht. Dieser Aspekt ist in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung zu berücksichtigen.

Indikator 'Diffus gestörte Zonen'

Verschärfte Anforderung der Nagra für SMA und HAA für Schritt 5 SGT: Diffus gestörte Zonen werden gemieden.

Der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' wird im SGT nicht aufgeführt. Hingegen hält der SGT bezüglich der Charakterisierbarkeit der Gesteine fest, dass diese «kleinräumige Störungen» zu berücksichtigen hat, die in den von der Nagra als «diffus gestörte Zonen» definierten Gebieten gehäuft auftreten. Das ENSI ist mit der Einschätzung der Nagra, dass dieser Indikator «einen sehr ausgeprägten Einfluss auf die Sicherheit» hat (NTB 08-03, Tab. 2.4-2), und der Einführung dieses Indikators einverstanden. Der Indikator wird in Form einer verschärften Anforderung in Schritt 5 eingesetzt.

Der Indikator ist, wie aus NTB 08-03, Figur 5.1-5 sichtbar, ein wichtiges räumliches Ausschlusskriterium: Diffus gestörte Zonen werden gemieden bzw. die geologischen Standortgebiete um diese Zonen herum gelegt. Die Grenze, ab wann eine Zone als «diffus gestört» gilt, wird seitens der Nagra durch eine Reihe von «Anzeichen» definiert, die als Argumente für ein Ausscheiden verwendet werden (NTB 08-04, S. 311). Das Vorgehen der Nagra ist damit aus Sicht des ENSI nachvollziehbar.

Die von der Nagra ausgewiesenen diffus gestörten Zonen sind mit Ungewissheiten behaftet. Daher ist bei der Grenzziehung bei den geologischen Standortgebieten, wo sie nur aufgrund von einzelnen «Anzeichen» gezogen wurde, die nötige räumliche Flexibilität einzuräumen. Das Vorgehen der Nagra zu diesem Indikator entspricht jedoch aus Sicht des ENSI den sicherheitstechnischen Anforderungen des SGT.

Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'

Verschärfte Anforderung der Nagra für SMA und HAA für Schritt 4 SGT: Keine bevorzugten Fließpfade, welche ungünstige Radionuklid-Rückhalteeigenschaften haben (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente) und die nicht zuverlässig lokalisierbar und charakterisierbar sind.

Dieser Indikator ist zur Beurteilung des Kriteriums 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' in den Schritten 4 (Identifikation der Wirtgesteine) und Schritt 5 (Identifikation geeigneter Konfigurationen) vorgesehen und folgt damit den Vorgaben des SGT.

Die Nagra beschränkt sich bei den Gesteinseigenschaften auf die bevorzugten Fließpfade (Diskontinuitäten, sedimentäre Architekturelemente). Darin enthalten sind neben den hydraulischen Eigenschaften und der Ausbildung des Porenraums (Channeling) grundsätzlich auch geochemische Aspekte der Radionuklidrückhaltung (z. B. radionuklidzugängliche Mineralogie infolge von Kluftbelägen). Mit weiteren Angaben (NAB 09-29) ist die Herleitung des Indikators aus Sicht des ENSI nachvollziehbar (ENSI 33/43). Die quantitative Anforderung und die Bewertungsskala genügen aus sicherheitstechnischer Sicht für Etappe 1 SGT.

Indikator 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 3 SGT: Potenzial vorhanden zum Auffinden und zuverlässigen Explorieren von wenig zergliederten Bereichen, in denen die Lagerkammern angeordnet werden können. Im Falle des HAA-Lagers sind grössere unzergliederte Bereiche notwendig.

Der Indikator wird zur Beurteilung des Kriteriums 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' verwendet und in Schritt 3 angewendet. Die Nagra folgt damit den Vorgaben des SGT. Anforderung und Bewertungsskala sind qualitativ. Dies ist aus Sicht des ENSI sinnvoll, bis in späteren Etappen des SGT detailliertere Informationen aus 3D-Seismik und hochaufgelöstem LIDAR-Geländemodell vorliegen, die eine näherungsweise Quantifizierung zulassen.

Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Keine Bereiche, in denen die Exploration unmöglich sein könnte (gleiche Anforderung für SMA und HAA).

Der Indikator wird zur Beurteilung des Kriteriums 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' verwendet und in Schritt 5 angewendet. Das Vorgehen der Nagra stimmt mit dem SGT überein.

Die Bewertung über die vier Kriterien Topografie (Höhengradienten), Tiefenlage des verwendbaren Markerhorizontes, Oberflächennutzung und Ankoppelungsbedingungen (Quartär) ist sinnvoll und klar dargelegt. Die seitens Nagra hinsichtlich des potenziellen geologischen Informationsgehalts höhere Gewichtung der 3D-Seismik gegenüber Bohrungen ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar.

Indikator 'Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)'

Verschärfte Anforderungen der Nagra: Mit diesem Indikator wird ein einzelnes Gebiet, die Randzone Hegau-Bodensee-Graben, ausgeschlossen. Die Anforderungen gelten für SMA und HAA, der Indikator wird nur bei Schritt 5 eingesetzt. Eine Quantifizierung findet nicht statt (NTB 08-05, S. A1-143).

Dieser Indikator leitet sich nicht direkt aus dem Sachplan ab. Für die Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens wird eine neotektonische Aktivität nach konzeptionellen Kriterien nicht ausgeschlossen, und derartige Zonen sollen aufgrund potenziell mangelnder Beständigkeit der Standorteigenschaften gemieden werden. Graf (im Druck) beschreibt versetzte Schotter nordwestlich vor Neuhausen, die vermutlich aus der vorletzten Eiszeit stammen und weist damit neotektonische Aktivität nach. Die Nagra (NAB 09-29) weist darauf hin, dass der Indikator sich auf neotektonisch aktive Gebiete beschränkt und das in der Mindestanforderung genannte Gebiet erhöhte seismische Aktivität aufweist. Das ENSI ist mit dieser Argumentation einverstanden.

Der Indikator ist durch seinen in der Mindestanforderung hergestellten Bezug zu einer einzelnen Störungszone nur bedingt sinnvoll definiert, da in der Anforderung bereits das Ergebnis der Anwendung des Indikators festgehalten wird. Auf Anfrage des ENSI hat die Nagra bestätigt (NAB 09-29), dass im Areal der geologischen Standortgebiete keine weiteren Zonen mit neotektonischer Aktivität berücksichtigt werden müssen. Das ENSI ist mit dieser Einschätzung einverstanden.

Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'

Mindestanforderung der Nagra für Schritt 4 SGT: Kein kohäsionsloses, praktisch unkonsolidiertes Gestein, keine extrem geringe Festigkeit, keine extrem hohe Zerklüftung (sehr engtändig und kleine Festigkeiten in den Trennflächen).

Der Indikator entspricht der Beurteilung des Kriteriums 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' und wird korrekt gemäss SGT von der Nagra in Schritt 4 eingesetzt. Die Prüfergebnisse zur Herleitung der Anforderungen und Bewertungsskala sind im Expertenbericht (Amann und Löw 2009) festgehalten.

Zusammenfassend folgt daraus, dass das ENSI mit der definierten Mindestanforderung einverstanden ist, der Nachvollzug der Bewertungsskala hingegen nicht in allen Teilen gelingt und abweichende Auffassungen festgestellt wurden. Dies hat einen Einfluss auf die bautechnische Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine, die bei der Anwendung behördenseitig etwas kritischer erfolgt (Verschiebung zu bedingt günstig).

Die abgeleiteten Anforderungen genügen für Etappe 1. In den weiteren Schritten der Lagerrealisierung sind stufengerecht und standort- und wirtgesteinsspezifisch zusätzliche felsmechanische Untersuchungen durchzuführen, um eine genauere Erfassung aller relevanten felsmechanischen Kenngrößen sicherzustellen. Dies schliesst Variabilitäten infolge fazieller Unterschiede («Brauner Dogger») und die Berücksichtigung der Anisotropie und der Eigenschaften des Trennflächengefüges ein.

Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)'

Mindestanforderungen der Nagra für Schritt 5 SGT: Keine nachgewiesenen Erdgaslagerstätten im Wirtgestein (entsprechend Gefahrenstufe 4 nach Suva: Gas möglich oder sicher, mit Gas-Überflutungsgefahr, Ausgasen während langer Zeit).

Der Indikator 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)' beurteilt einen Teilaspekt des Kriteriums 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung'. Die Anwendung in Schritt 5 entspricht den Vorgaben des SGT. Das ENSI ist mit der festgelegten Mindestanforderung einverstanden.

Gaszutritte (Methan, Schwefelwasserstoff, etc.) stellen insbesondere während des Baus und Betriebes eine Gefahr dar und sind gemäss den Vorschriften der Suva zu beherrschen. Hinsichtlich der Bewertungsskalen stellt das ENSI aufgrund der eingeholten Expertenmeinungen (Emch+Berger AG 2010) fest, dass bereits eine Gefahrenstufe 2 nach Suva (Ausgasungen während langer Zeit) zu erheblichen Behinderungen führen und als ungünstig bewertet wird, da sich das Lager aufgrund der verästelten Stollensysteme nur mit erhöhtem Aufwand belüften lässt.

3.5 Zusammenfassende Beurteilung der Vorgaben an die geologische Barriere

Das ENSI beurteilt das von der Nagra im Lagerkonzept vorgesehene Mehrfachbarrierensystem als geeignet, um den im KEG und in der Richtlinie ENSI-G03 geforderten dauernden Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung radioaktiver Abfälle zu gewährleisten.

Die Nagra hat die Beiträge der verschiedenen Elemente des Barrierensystems zur Langzeitsicherheit transparent dargelegt. Nach Ansicht des ENSI wurden die Eigenschaften und zeitliche Entwicklung der technischen Barrieren wie beispielsweise des Zementnahfelds des SMA-Lagers stufengerecht beschrieben. Die Vorgehensweise der Nagra, die Rückhaltefähigkeit der Geosphäre durch generische Wirtgesteine mit den entsprechenden hydrogeologischen Eigenschaften (homogen-poröse, resp. engständig geklüftete Wirtgesteine, Störungszonen) und geochemischen Eigenschaften der modellhaften geochemischen Systeme Tonstein und Calcit zu beschreiben, ist für die Darlegungen in Etappe 1 sinnvoll und zielführend.

Der Einfluss von lagerbedingten Einflüssen (wie die Bildung einer pH-Fahne oder die Gasbildung und der Gastransport im Tiefenlager und der Geosphäre) auf die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers wurde von der Nagra nachvollziehbar und stufengerecht dokumentiert. Die Überprüfung der verwendeten Konzepte und Resultate der Nagra durch eigene Berechnungen zeigt, dass für das SMA-Lager die Barrierenfunktion des Wirtgesteins nicht in Frage gestellt ist. Für das HAA-Lager im Opalinuston waren entsprechende Beurteilungsergebnisse bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht worden.

Die quantitativen Vorgaben an die geologische Barriere wurden nach Ansicht des ENSI durch die generischen Sicherheitsbetrachtungen stufengerecht hergeleitet. Die abgeleiteten Zielvorgaben für die Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und die grossräumige hydraulische

Durchlässigkeit der Wirtgesteine, bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche konnten durch unabhängige Berechnungen des ENSI bestätigt werden.

Die Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben an die geologische Barriere entspricht den Vorgaben des Sachplans.

Bezüglich der Herleitung der Anforderungen an die maximale Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit kommt das ENSI zum Schluss, dass die festgelegten Anforderungen für das SMA-Lager nachvollziehbar und sinnvoll sind. Für die HAA-Lagerstollen im Opalinuston ist der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit bei Verwendung von beschränkten Stützmitteln (Anker, Netze) nur bis in eine Tiefe von 650 m erbracht. Für grössere Tiefen wären zusätzliche vollflächige Stützmittel notwendig. Dafür liegen seitens Nagra konzeptuelle Vorschläge vor (NAB 09-07). Für diese Ausbaukonzepte (z. B. Liner aus Spritzbeton) sind aber die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit und die sicherheitstechnisch relevanten Prozesse im Nahfeld noch vertieft zu untersuchen.

4 Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume

Gemäss Etappe 1 SGT sind in Schritt 3 die geologisch-tektonischen Grossräume der Schweiz in Hinblick auf ihre potenzielle Eignung für SMA- und HAA-Lager zu evaluieren. Die dafür zentral wichtige Langzeitstabilität der geologischen Barriere wird nach den Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften', 'Erosion', 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' und 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' beurteilt (BFE 2008).

Das ENSI geht in seiner Beurteilung zunächst auf das Vorgehen der Nagra und deren Grundlagen zur Identifikation der geologisch-tektonischen Grossräume ein und beurteilt beides (Kapitel 4.1). Auf die Angaben der Nagra aufbauend werden die geologisch-tektonischen Grossräume im Hinblick auf ihre Eignung für ein SMA-Lager (Kapitel 4.2) und für ein HAA-Lager (Kapitel 4.3) betrachtet und beurteilt. Die Beurteilungsergebnisse des ENSI werden in Kapitel 4.4 zusammengefasst.

4.1 Vorgehen und Grundlagen

Angaben der Nagra

Für die Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume werden die Kriterien 1.1, 2.1, 2.2, 3.2 und 3.3 gemäss SGT berücksichtigt, wobei folgende mit Mindestanforderungen versehene Indikatoren zur Anwendung kommen (NTB 08-03, Tab. 2.5-2):

- 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum',
- 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik',
- 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)',
- 'Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse',
- 'Laterale Ausdehnung'.

Mit diesen Indikatoren wurde geprüft, in welchen geologisch-tektonischen Grossräumen der Schweiz voraussichtlich eine genügende Langzeitstabilität gewährleistet werden kann. Für das SMA- bzw. HAA-Lager ist eine Langzeitstabilität über 100'000 bzw. 1 Million Jahre massgeblich (Kapitel 3.4).

Bei der Bewertung der weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume werden zusätzlich die folgenden Indikatoren zur Anwendung bzw. Beschreibung herangezogen:

- 'Kontinuität der interessierenden Schichten',
- 'Seismizität',
- 'Modellvorstellungen zu geochemischen Vorgängen'.

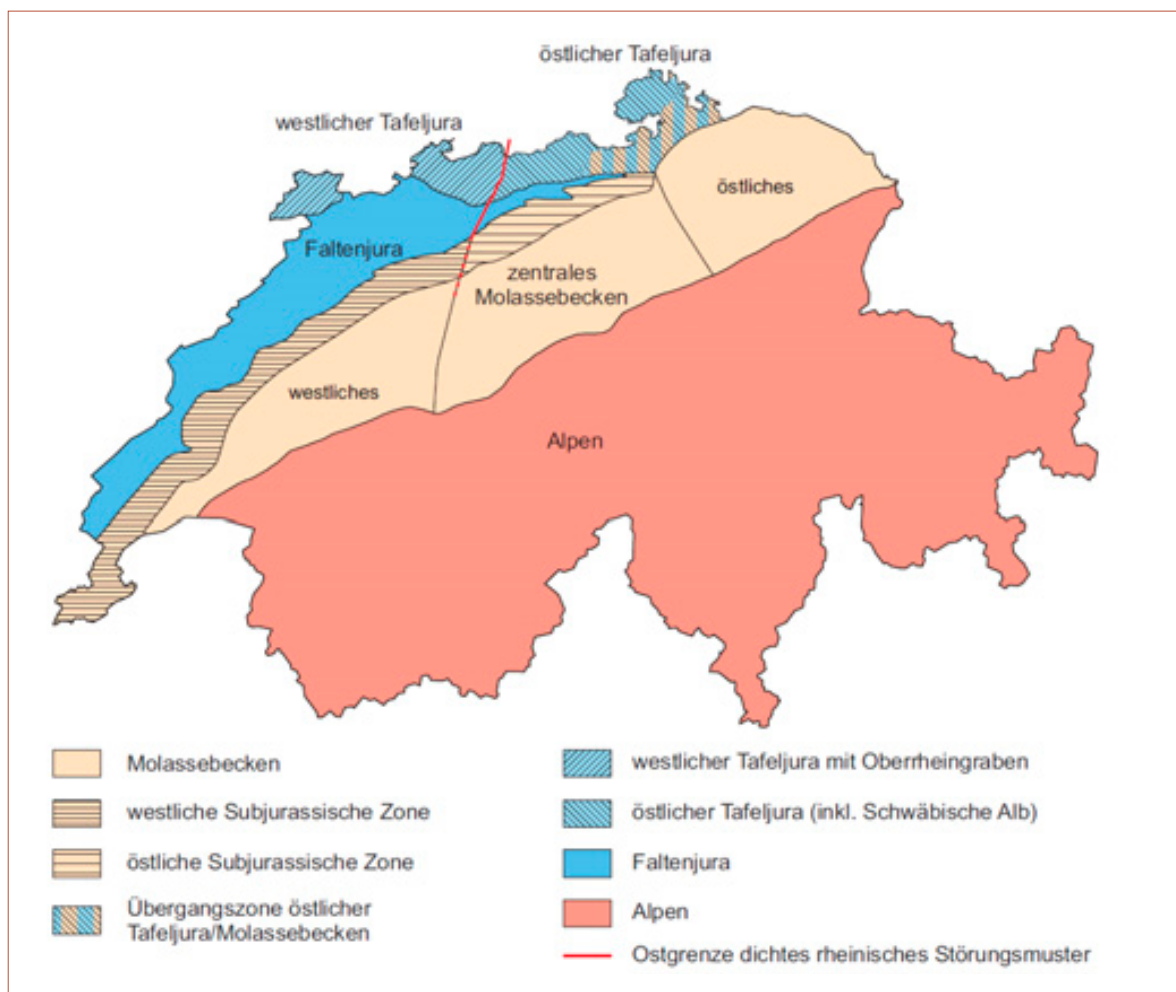
Der Indikator 'Seismizität' wird in Schritt 3 SGT nicht zur Einengung verwendet, weil an lokale Störungen gebundene Erdbeben besser in Schritt 5 SGT betrachtet werden (NTB 08-03, Fussnoten 37 und 39, S. 45 und 46).

Die Grundlagen für die Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume werden in NTB 08-03, S.91 – 97 und NTB 08-04 dargelegt. Diese Grundlagen betreffen die Langzeitstabilität, die durch Hebung, Erosion und Versätzen an tektonischen Störungen, z. T. begleitet von Erdbeben, massgeblich beeinflusst wird. Die geologisch-tektonische Komplexität als Folge vergangener tektonischer Aktivitätsphasen bestimmt die potenzielle Eignung und Explorierbarkeit hinreichend grosser, nicht zergliederter Wirtgesteinskörper. Die Gliederung der Schweiz in geologisch-tektonische Grossräume fasst die regional unterschiedlichen Auswirkungen dieser Faktoren zusammen (Figur 4.1-1).

Beurteilung des ENSI

Zur Einengung der für die geologischen Tiefenlager potenziell geeigneten geologisch-tektonischen Grossräume folgt die Nagra den Vorgaben aus Schritt 3, Etappe 1 SGT. Der zusätzliche Einbezug des Indikators 'Laterale Ausdehnung' erscheint aus Sicht des ENSI sinnvoll. Alle Grossräume stehen unter dem Vorbehalt, dass potenzielle Wirtgesteine (Kapitel 5) in bautechnisch machbarer Tiefe (Felstemperatur unter 55° C) vorhanden sind.

Die Unterscheidung eines zentralen und eines östlichen Molassebeckens seitens Nagra findet keine weitere Verwendung und ist daher nicht erforderlich. Andererseits befindet sich im süd-



Figur 4.1-1: Gliederung der Schweiz in geologisch-tektonische Grossräume (NTB 08-03, S.97)

lichen Bereich des Molassebeckens nördlich der zu den Alpen zu zählenden subalpinen Molasse verbreitet eine Zone mit Schichtverstellungen (Triangelzone, zentrales und östliches Molassebecken), die man analog zur Subjurassischen Zone mit einer Signatur hätte versehen können.

Die geologischen Grundlagen in Kapitel 2.1 bis 2.6 (NTB 08-04) sind im Allgemeinen umfassend präsentiert. Die Karte vertikaler Hebungsraten (NAB 07-13) zeigt in den Alpen Hebungsraten von 0.6 bis 1.7 mm pro Jahr (bezogen auf Laufenburg am Rhein) auf, die teils als isostatischer Ausgleich quartärer Erosion (Champagnac et al. 2007; Kuhlemann et al. 2006; Kuhlemann et al. 2002), teils als vorübergehende isostatische Reaktion auf Eisentlastung infolge beschleunigten Abschmelzens der Gletscher seit Mitte des 19. Jahrhunderts (Barletta et al. 2006) zu erklären sind. Eine geringe tektonische Hebungs Komponente durch Prozesse im Erdmantel, die sich in die Ostalpen verlagert, wird vermutet (Kuhlemann et al. 2002; Vernon et al. 2008). Die Nagra folgt einem konservativen Ansatz und rechnet mit langfristigen flächenhaften Erosionsraten im Bereich der Hebungsraten. Die realen langfristigen Erosionsraten in den Alpen sind wahrscheinlich geringer und dürften etwa die Hälfte der gemessenen Hebungsraten erreichen (Kuhlemann et al. 2002).

Nördlich des Bodensees wurden ungewöhnlich hohe lokale Hebungsraten bis zu 0.7 mm/Jahr ermittelt (NAB 07-27), welche südlich des Bodensees nicht beobachtet werden und auf einen regional begrenzten tektonischen Prozess in Oberschwaben hindeuten könnten. Aufgrund der Datenlage ist zurzeit unklar, ob diese lokalen Hebungsanomalien zukünftig eine Bedeutung für die Nordostschweiz haben könnten. Die lokalen Maximalwerte in Oberschwaben gehen über den von der Nagra angesetzten Maximalwert von 0.4 mm/Jahr für das Schweizer Alpenvorland hinaus, wo gemäss NAB 07-13 eine rezente Hebungsrates von 0.3 mm/Jahr nicht überschritten wird. Nach aktueller Kenntnis werden Veränderungen tektonisch bedingter Hebung so langsam erfolgen bzw. sich regional ausdehnen, dass die potenziellen Auswirkungen auf die Region südlich und südwestlich des Bodensees auch in einer Million Jahren unproblematisch sind.

Bedarf für einen Datenabgleich besteht grundsätzlich für GPS-Datensätze zur Bestimmung von Horizontalbewegungen (NTB 08-04, Kap. 2.7.1.2). Kapitel 2.7.2 (NTB 08-04) zeigt auf, dass neotektonische differenzielle Bewegungen nördlich der Alpen (westlich des Aare-Knies) ein geringes und nicht signifikantes Ausmass haben, obwohl das Alpenvorland durch den Nordwest gerichteten Druck der Alpen unter anhaltender Nordwest-Südost gerichteter Spannung steht (NTB 08-04, Kap. 2.7.3). Für den westlichen Jura wird angenommen, dass innerhalb der letzten 3 Millionen Jahre eine schwache Verformung von gekoppeltem Grund- und Deckgebirge stattfand, die möglicherweise bis in die Gegenwart wirksam war (NTB 08-04, S. 57). Vor 9 bis 4 Millionen Jahren (Ustaszewski und Schmid 2007) erfolgte dort, wie auch nach Osten abnehmend zum östlichen Ende der Lägeren, Deformation im Zuge der Jura-Faltung im Deckgebirge oberhalb eines Abscher-Horizontes in Gips- und Salzschiefern des Muschelkalks und/oder des Gipskeupers (*thin-skinned tectonics*). Ausgehend von diesem Abscherhorizont sorgten Rampenüberschiebungen vor allem an vorgeprägten Schwäche zonen im Untergrund (Permokarbontröge) für lokal starke Zergliederung. Dazwischen herrschen geringe Deformationsbeträge vor.

Nördlich der Jura-Hauptüberschiebung konnten mit Fernerkundungsmethoden keine tektonisch bedingten Versätze kaltzeitlicher Terrassen des Mittel- und Spätpleistozäns (Hoch- und Nie-

derterrasse) nachgewiesen worden (Fraefel 2008; Kock 2008). Diffuse differenzielle Bewegungen über hunderttausende Jahre werden vermutet (NTB 84-16).

Einige Kilometer nördlich der Lägeren wurde mit Hilfe des LIDAR-Geländemodells im Bereich des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments eine maximale Oberflächen-Verwerfung von ca. 10 m in den Höheren Deckenschottern beobachtet, welche vor 1.8 bis 2.5 Million Jahren abgelagert worden sind (Bolliger et al. 1996). Diese lokale Besonderheit in einer bekannten Störungszone mit starker Zergliederung der tiefer liegenden Gesteine zeigt, wie gering die Verformung des östlichen Tafeljura bzw. der Vorfaltenzone über lange Zeiträume war.

Die Nordwestschweiz (Faltenjura, westliche Subjurassische Zone und westlicher Tafeljura, Figur 4.1-1) wird von der Nagra für das HAA-Lager aufgrund erhöhter tektonischer Überprägung und stärkerer Zergliederung (rheinisches Störungsmuster) und daher schlechter Platzverhältnisse untertags, und schwieriger Explorationsverhältnisse auf der Basis unpublizierter Seismikdaten, zurückgestellt. Für das SMA-Lager werden keine Grossräume zurückgestellt. Das ENSI hat diese Daten eingesehen und kann die Zurückstellung für das HAA-Lager nachvollziehen.

Bei der Evaluation des Indikators 'Seismizität' (NTB 08-04, Kap. 2.7.4) fällt auf, dass die für Modellierungen verwendete synthetische Erdbebenhäufigkeit sehr schematisch ist und gegenüber der sehr guten Datenbasis für rezente und historische Beben teilweise den Bezug zu tektonischen Strukturen des Untergrundes verliert. Die Dokumentation der Nagra entspricht aber dem aktuellen Wissensstand und ist für die Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume geeignet. Der Zusammenhang zwischen seismischer Aktivität und geologischer Struktur wird nach Plänen der Nagra mithilfe von Mikrobeben-Messnetzen weiter untersucht werden.

Alpen- und Vorlandbildung

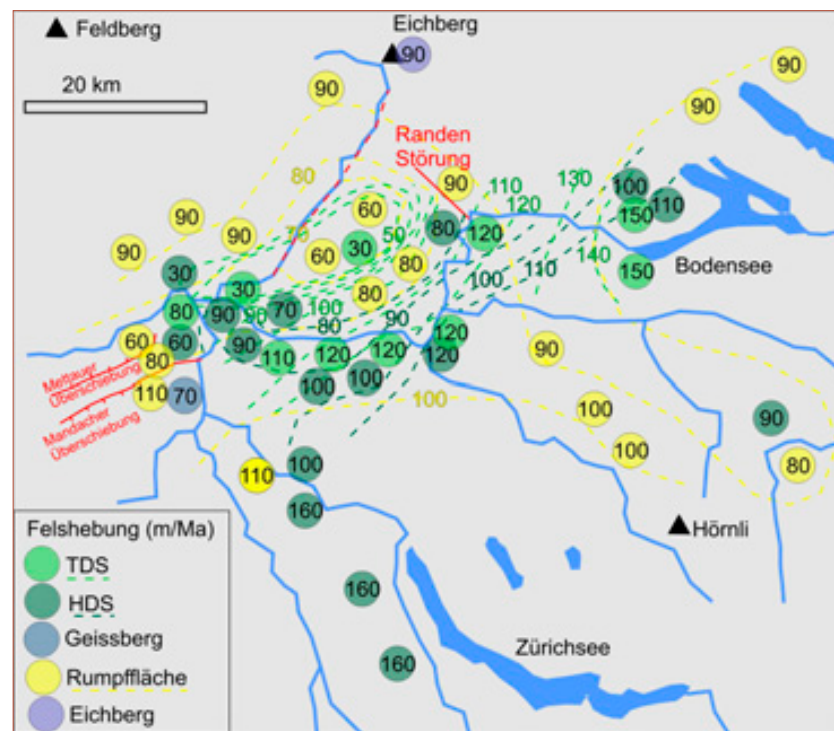
Die Alpen sind ein geologisch junges Gebirge. Vor etwa 50 Millionen Jahren kollidierten kontinentale Landmassen zwischen Europa und Afrika und türmten seither die Alpen auf. Dieser Prozess des Zusammenschubes zweier Kontinentplatten verlief nicht kontinuierlich, sondern eher in Schüben von jeweils einigen Millionen Jahren. Ebenso wurden die Alpen in Schüben gehoben und wieder abgetragen. So hat auch die weite Ebene vor den Alpen (das heutige Molassebecken) eine periodische Geschichte hinter sich, mit einer ersten mit Meer bedeckten Periode (Untere Meeresmolasse), auf die eine Periode der Verlandung folgte (Untere Süswassermolasse, USM). Darauf folgte eine weitere marine Phase (Obere Meeresmolasse), die von einer letzten Verlandung (Obere Süswassermolasse, OSM) abgelöst wurde.

Die Alpenbildung griff in ihrer Entwicklung immer weiter auf das Vorland über. So sind heute die südlichsten Teile des Molassebeckens in die Alpenfaltung integriert worden. Als eine der jüngsten Entwicklungen wurden vor 5 bis 10 Millionen Jahren Teile des Molassebeckens auf einer in der Tiefe duktilen, d.h. leicht verformbaren Schicht aus Salz und Anhydrit nach Norden geschoben und dort zu den Jurafalten zusammengeschoben. Dort, wo im östlichen Molassebecken im Untergrund das Salz fehlte, fand dieser Fernschub nicht statt, so dass sich die Jurafalten heute gegen Osten verjüngen, bis sie schliesslich an der Lägeren in nur noch einer Falte auslaufen. Der Zusammenschub der kontinentalen Landmassen hält auch heute noch messbar an, wobei sich die horizontalen Verkürzungen vorwiegend auf die Erdbebengebiete von Norditalien (Venedien) konzentrieren.



Figur 4.1-2:

Karte der Felshebung in Metern pro Million Jahre (m/Ma) nördlich des Zürichsees in den letzten 5 Millionen Jahren, hergeleitet aus der Hebung von Schotterterrassen gegenüber der lokalen Vorflut. Das Alter der jeweiligen Schotter, wie «Tiefere Deckenschotter» (TDS), «Höhere Deckenschotter» (HDS), Geissberg-Schotter und Eichbergschotter ist nur im Fall der HDS gut belegt. Die Genauigkeit der Höhenmessung beträgt $\pm 10\%$ (modifiziert nach NTB 99-08, Fig. 3.2).



Bei der Bewertung des Kriteriums 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' spielen Erosions-Szenarien in Abhängigkeit von der künftigen Klimaentwicklung eine wichtige Rolle. Die Nagra bezieht ein lang anhaltendes Warmzeit-Klimaszenario (Archer und Ganopolski 2005) in ihre Abschätzungen der potenziellen Erosion ein (NTB 99-08).

In den Kapiteln 2.8 und 2.9 (NTB 08-04) werden anhand aktueller Literatur maximale (konservative) und realistische Erosionsraten evaluiert. Das ENSI hat die Hebungsdaten der letzten 10 Millionen Jahre für die geologischen Standortgebiete für ein Landschaftsentwicklungsmodell überprüft. Die Felshebung und damit die maximale Einschneidung der Flüsse betrug in den letzten 4.2 Millionen Jahren in den geologischen Standortgebieten etwa 100 m pro Million Jahre und hat in der letzten Million Jahre als Folge glazialer Tiefenerosion leicht zugenommen (Figur 4.1-2). Nördlich der geologischen Standortgebiete sind im Bereich Waldshut-Tiengen, Klettgau die Hebungsbeiträge lokal geringer. Mögliche Ursache ist Gips- und Salzlösung im Untergrund, da Feinnivellements längs der Wutach kleinräumig hohe Senkungsraten gegenüber Laufenburg gezeigt haben (NAB 07-13; NAB 07-27), die durch tektonische Bewegungen kaum erklärt werden können.

Im Fall glazialer Tiefenerosion von mehreren hundert Metern bestehen offene Fragen hinsichtlich der Zeitphasen der Rinnenübertiefungen in der Nordschweiz, der dafür relevanten Prozesse und Eintiefungsraten und der Möglichkeit einer Wiederholung. Für ein Zukunftsszenario mit natürlichen Klimaschwankungen wäre in ca. 60'000 Jahren eine inneralpine Vergletscherung und in ca. 100'000 Jahren eine erste Vorland-Vergletscherung zu erwarten (Haerberli 2004), die nach Ansicht des ENSI eine potenziell geringe Tiefenerosion bewirken würde. Für ein Zukunftsszenario mit stark verzögerten Kaltzeiten infolge des menschengemachten Treibhausklimas (Archer und Ganopolski 2005) bestehen Unsicherheiten über das Ausmass der Verzögerung und der potenziellen Ausdehnung der Vorlandgletscher. Der lokale Erhalt unterschiedlich alter kalt- und

warmzeitlicher Ablagerungen (Müller 1996; Preusser et al. 2005) deutet darauf hin, dass einzelne Rinnen in den letzten 500'000 Jahren im Bereich ihres Nordwest-Endes nicht weiter in den Felsuntergrund eingetieft worden sind. Laut NTB 08-02 (S. 15, A13-15) laufen entsprechende Untersuchungen, um diese vorläufige Schlussfolgerung abzusichern. Die Rinnen werden im Zuge der weiteren regionalen Eingrenzung der geologischen Standortgebiete von der Nagra berücksichtigt. In deren Nähe plant die Nagra bezüglich der Lagertiefe Sicherheitszuschläge ein, die nach Ansicht des ENSI für alle plausiblen Szenarien ausreichend sind, weil eine Bildung ausgeprägter subglazialer Rinnen in wenig verkarsteten Malmkalken in den relevanten Gebieten unwahrscheinlich ist.

Bezüglich des Indikators 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' wird Vulkanismus im Bereich der Schweiz von der Nagra für den Betrachtungszeitraum ausgeschlossen. Das ENSI ist mit diesem Vorgehen einverstanden. Die jüngste vulkanische Aktivität im nahe gelegenen Hegau ist rund 7 Millionen Jahre alt (Schreiner 1992) und das Fehlen einer Wärmeanomalie im oberen Erdmantel (Ritter 2005) zeigt, im Unterschied zum Eifel-Plume, dass im Hegau für die nächsten Millionen Jahre eine vulkanische Aktivität ausgeschlossen werden kann.

Die Nagra geht bei der Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume nach SGT vor. Die Gliederung und Darstellung der Grossräume ist insgesamt sinnvoll und gut dokumentiert.

Die geologisch-tektonischen Grossräume werden in NTB 08-03 und NTB 08-04 jeweils mit Blick auf die unterschiedlichen Anforderungen für SMA- und HAA-Lager identifiziert, charakterisiert und bewertet.

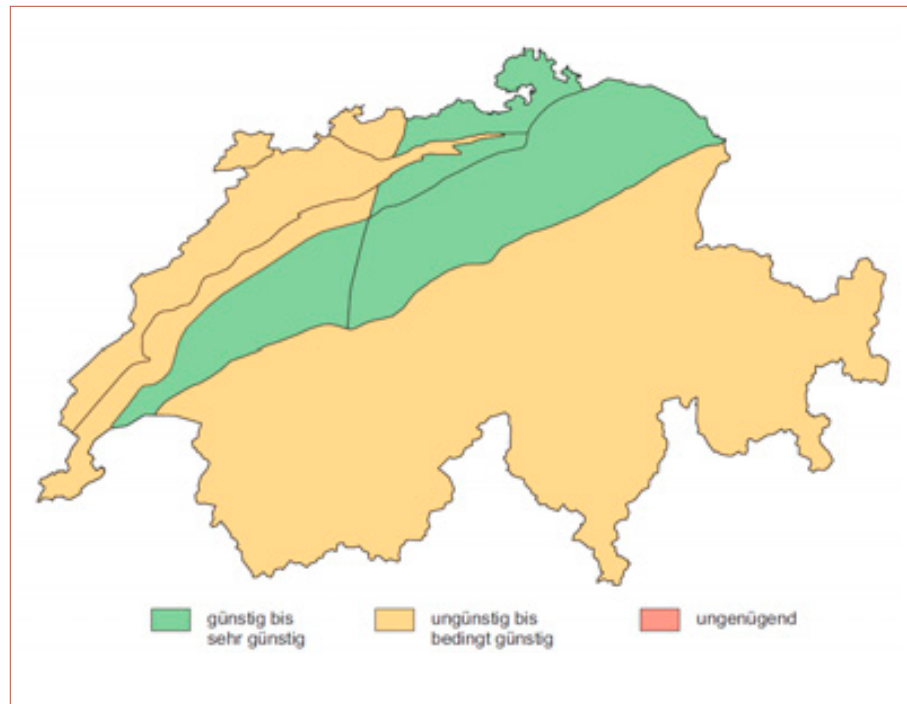
4.2 Geologisch-tektonische Grossräume für das SMA-Lager

Angaben der Nagra

Für ein SMA-Lager sind mit einem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren an die Langzeitstabilität geringere Anforderungen zu stellen als für ein HAA-Lager. Die Nagra nimmt an, dass die Geländeformen der Gegenwart in Grundzügen erhalten bleiben und die Erosionsraten ungefähr den Hebungsraten entsprechen werden, wobei in Gebieten mit ausgeprägter Topografie zusätzlich auch das Potenzial für lokale Erosion berücksichtigt wird. Daraus ergibt sich in den Alpen eine grossräumige Erosion von maximal 100 bis 200 m, in den anderen Gebieten deutlich weniger. Gemäss Indikator 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' wären alle Grossräume der Schweiz als genügend zu betrachten. Das gilt entsprechend auch für Indikator 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik'.

Bezüglich geologisch-tektonischer Komplexität (räumliche Verhältnisse und ihre Explorierbarkeit) und den daraus resultierenden Möglichkeiten für geeignete Konfigurationen für die Anordnung von Lagerkammern eines geologischen Tiefenlagers sind die Grossräume Alpen, Faltenjura, westlicher Tafeljura sowie die westliche und in etwas reduzierterem Umfang auch die östliche Subjurassische Zone weniger geeignet, da sie engräumig zergliedert bzw. deformiert sind (NTB 08-04). In Ausnahmefällen besteht in den Alpen durch tektonische Anhäufung gering durchläss-

Figur 4.2-1: Karte der für SMA-Lager genügenden geologisch-tektonische Grossräume (NTB 08-03, Fig. 3.5-1)



siger Gesteine (Wellenberg) die Möglichkeit, dass in einem grundsätzlich ungünstigen bis bedingt günstigen Grossraum lokal eine günstige Situation besteht. Trotz der Nachteile starker Zergliederung sind, aufgrund der Flexibilität der räumlichen Anordnung, die Mindestanforderungen an die geologisch-tektonischen Grossräume in der Schweiz für SMA-Lager überall erfüllt. Als günstig bis sehr günstig werden der östliche Tafeljura, die östliche Subjurassische Zone und das gesamte Molassebecken bewertet (Figur 4.2-1).

Beurteilung des ENSI

Die Darstellung der geologisch-tektonischen Komplexität der Grossräume und der Regionen ist von der Nagra detailliert dokumentiert worden. Regionen mit bekannt oder potenziell erhöhter tektonischer Zergliederung sind, von den Alpen und dem Molassebecken abgesehen, genügend differenziert bewertet worden.

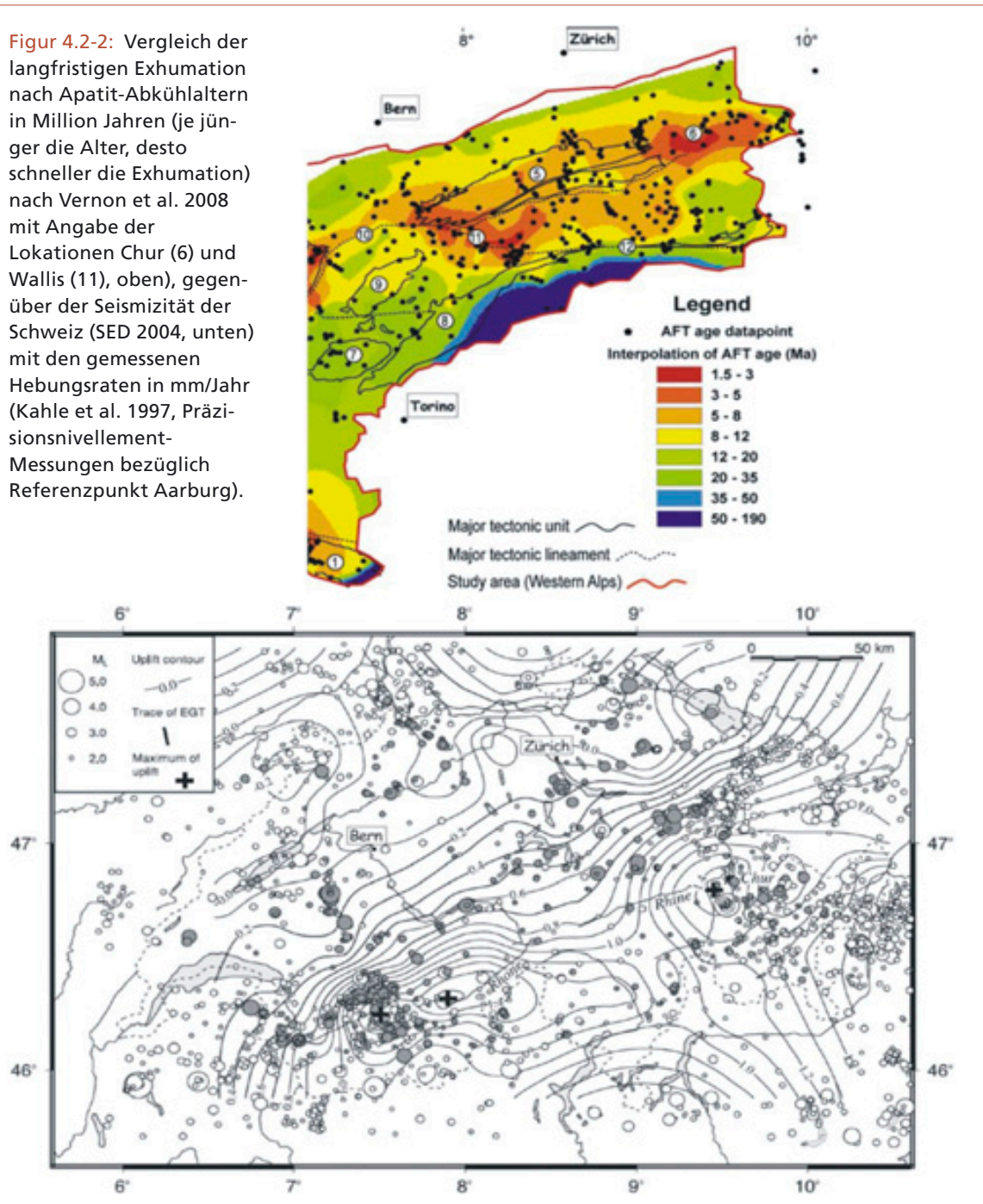
Das ENSI sieht die Langzeitstabilität über 100'000 Jahre hinsichtlich des Indikators 'Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum' (< 2 mm pro Jahr) für den grössten Teil der Schweiz grundsätzlich als genügend an. Ein genereller Erhalt der Geländeformen der Gegenwart kann in den Alpen angesichts des Potenzials für Bergstürze nicht zwingend vorausgesetzt werden.

Die Bewertung der Nagra in NTB 08-03 (S. 106, Tab. 3.5-1) kann nicht in jedem Detail nachvollzogen werden. Die Bewertung eines Grossteils der Schweiz durch die Nagra als ungünstig bis bedingt günstig ist sehr weit gefasst und nach Ansicht des ENSI für die bezüglich Hebung und Seismizität tektonisch besonders aktiven Bereiche der Alpen zu wenig differenziert dargestellt. Die Ausführungen der Nagra lassen für Schritt 5 (Identifikation geeigneter Konfigurationen) keinerlei Rückschlüsse zu, welcher Teil des Grossraumes «Alpen» für das SMA-Lager als ungünstig und welcher als bedingt günstig eingestuft wird.

Das ENSI kommt bezüglich der Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik' und 'Seismizität' zu einer differenzierteren Bewertung. Diese betrifft die Hebungs-
zentren im Wallis, bei Chur und im Lepontin, wo Hebungsraten > 1 mm pro Jahr beobachtet
werden und die sich durch erhöhte Seismizität auszeichnen (Figur 4.2-2). Diese Gebiete werden
seitens ENSI als ungünstig angesehen und sollten daher nicht für die Platzierung des SMA-Lagers
in Betracht gezogen werden.

Diese Hebungscentren spiegeln sich auch in Karten von Apatit-Abkühlaltern wider (Vernon et
al. 2008), was auf längerfristig andauernde Hebungs- und Exhumationsprozesse in den letzten

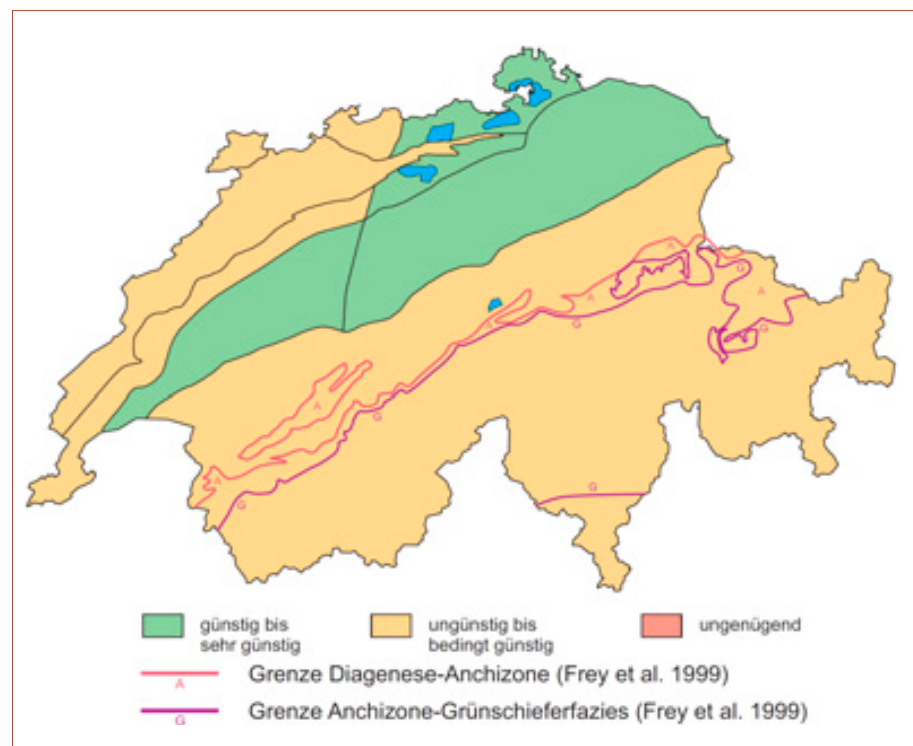
Figur 4.2-2: Vergleich der langfristigen Exhumation nach Apatit-Abkühlaltern in Million Jahren (je jünger die Alter, desto schneller die Exhumation) nach Vernon et al. 2008 mit Angabe der Lokationen Chur (6) und Wallis (11), oben), gegenüber der Seismizität der Schweiz (SED 2004, unten) mit den gemessenen Hebungsraten in mm/Jahr (Kahle et al. 1997, Präzisionsnivelement-Messungen bezüglich Referenzpunkt Aarburg).



3 bis 5 Millionen Jahren hindeutet. Zudem gibt es in diesen Gebieten mit starken Gradienten der Hebungsraten Hinweise auf Neotektonik, insbesondere Versätze spätglazialer Moränen, z. B. an der Simplonstörung (Ustaszewski und Pfiffner 2008) und im Gebiet von Chur (Persaud und Pfiffner 2004). Das Gebiet starker Hebungsgradienten fällt im Unterwallis zwischen Visp und Rawilpass mit einer Zone häufiger Mikrobeben zusammen, deren Herdflächenlösungen auf eine aktive dextrale Scherung entlang der Rhône-Simplon-Linie hinweisen (Maurer et al. 1997; Wagner et al. 2000). Eine ähnliche Anhäufung seismischer Aktivitäten findet sich räumlich passend zu starken Gradienten in den Hebungsraten im St. Galler Rheintal. Das ENSI kommt deshalb zum Schluss, dass in tektonisch aktiven Gebieten starker Hebungsgradienten und erhöhter Seismizität die Langzeitstabilität für ein SMA-Lager in Frage gestellt ist und diese Gebiete für die geologische Tiefenlagerung als ungünstig zu betrachten sind.

Ein weiterer Aspekt betrifft den Metamorphosegrad in den Alpen und speziell den Erhalt quellfähiger Tonminerale. Seitens Nagra werden diese Aspekte im Schritt 4 SGT abgeklärt. Das ENSI ist der Ansicht, dass für tonreiche Gesteine die Metamorphosezonierung der Alpen mit Blick auf den Erhalt der Tonminerale als grossräumiger Aspekt bereits in Schritt 3 des SGT diskutiert werden kann (Figur 4.2-3). Dies betrifft den potenziellen Erhalt von Tonmineralen bei ansteigendem Metamorphosegrad mit beginnender Umwandlung quellfähiger Tonminerale im Bereich Diagenese-Anchizone und der vollständigen Umwandlung aller illitischen Tonminerale in Glimmer in der Grünschieferfazies (Frey et al. 1999). Bereits zu Beginn der Anchizone ist mit einem Verlust des Selbstabdichtungsvermögens tonführender Gesteine zu rechnen. Innerhalb der Zone der Grünschieferfazies kann die Mindestanforderung an den Gehalt an Tonmineralen nicht eingehalten werden.

Figur 4.2-3:
Karte analog zu Figur 4.2-1 mit differenzierter Betrachtung der Alpen im Hinblick auf die metamorphe Umwandlung insbesondere quellfähiger Tonminerale (Frey et al. 1999) und Lokalisierung der in Kapitel 5 ausgewiesenen SMA-Standortgebiete (blau, zur Orientierung).



Über die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' hinaus verweist die Nagra auf Probleme für potenziell geeignete Wirtgesteinskonfigurationen in tektonisch stark beanspruchten Regionen. Dem Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' zugeordnete Indikatoren werden von der Nagra in Schritt 5 regional im Detail abgehandelt, fliessen aber in die Bewertung der geologisch-tektonischen Grossräume ein. Deutlich weniger beanspruchte Grossräume werden in Figur 4.2-3 als günstig bis sehr günstig gekennzeichnet und umfassen, mit Ausnahme der latent tektonisch aktiven, stark zergliederten Zone des Faltenjuras bis zum östlichen Ende der Lägeren, die gesamte Nordostschweiz nördlich der Alpen und das Molassebecken der Westschweiz (grün). Die schmale Triangelzone des Molassebeckens entlang des Alpenrands sollte als bedingt günstig angesehen werden, aber eine entsprechende Darstellung setzt die Abtrennung eines weiteren geologisch-tektonischen Grossraums in Figur 4.1-1 voraus. Das Molassebecken scheidet als Grossraum allerdings wegen bautechnisch zu anspruchsvoller Tiefenlage der in Frage kommenden mesozoischen Wirtgesteine und zu hoher Gebirgstemperatur der Wirtgesteine im nächstfolgenden Schritt (Kapitel 5) aus (NTB 08-03, S. 178, Fig. 3.5-2).

Zusammenfassend kommt das ENSI zu dem Schluss, dass die geologisch-tektonischen Grossräume der Schweiz in Bezug auf ihre Eignung für das SMA-Lager, mit Ausnahme tektonisch besonders aktiver Bereiche und metamorph überprägter Anteile der Alpen und der Triangelzone des Molassebeckens, durch die Nagra sinnvoll dargestellt und bewertet sind. Die differenziertere Betrachtung des ENSI hat keinen Einfluss auf die in Schritt 5 vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete.

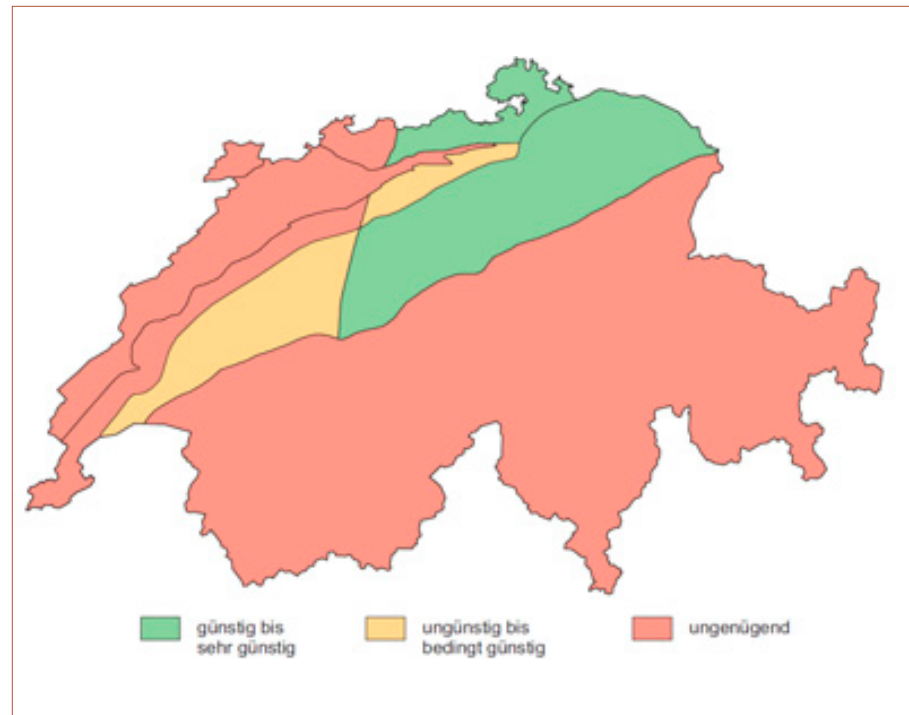
4.3 Geologisch-tektonische Grossräume für das HAA-Lager

Angaben der Nagra

Die Identifizierung geeigneter Grossräume für HAA-Lager erfordert angesichts des zehnmal längeren Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren für die Langzeitstabilität höhere Ansprüche als für SMA-Lager. Die Alpen werden aufgrund von Hebungs- und Erosionsraten von über 0.4 mm pro Jahr und weiteren nicht erfüllten Mindestanforderungen ausgeschlossen. Aufgrund geodynamischer Modellvorstellungen können lokale Veränderungen der Hebungs- und Erosionsraten im Faltenjura, in der Subjurasischen Zone und im westlichen Molassebecken, die aktuell den Mindestanforderungen genügen, nicht ausgeschlossen werden. In diesen Gebieten ist lokal erhöhte seismische Aktivität zu beobachten, und ein Wiederaufleben des alpinen Fernschubs könnte die alpinen Deformationsstrukturen reaktivieren. Eine differenzierte Bewertung befindet sich in NTB 08-03 (Tab. 3.5-2). Der östliche Tafeljura und das östliche Molassebecken sind vom alpinen Fernschub, von West nach Ost, deutlich weniger oder gar nicht beeinflusst. In der Klassifizierung der Grossräume wird bewusst vereinfacht und auf eine differenzierte Darstellung jeweils sehr günstiger und günstiger Grossräume in Schritt 3 verzichtet, bzw. in den Schritt 5 verlagert.

Aufgrund der aus der geologisch-tektonischen Komplexität resultierenden beschränkten räumlichen Verhältnisse und der meist schwierigen Explorierbarkeit werden die Alpen, der Faltenjura, der westliche Tafeljura (inkl. Oberrheingraben) und die westliche Subjurasische Zone für das HAA-Lager als ungenügend bewertet und ausgeschlossen (NTB 08-04, S. 84). Dadurch fallen

Figur 4.3-1: Karte der für HAA-Lager genügenden geologisch-tektonische Grossräume (NTB 08-03, Fig. 3.5-2)



auch die Gebiete mit der höchsten rezenten Seismizität weg. Das westliche Molassebecken ist, im Unterschied zum östlichen (und zentralen) Molassebecken, stärker durch rheinische Störungen zergliedert (NTB 08-03, S.97). Die Subjurasische Zone des östlichen Molassebeckens ist von alpinem Fernschub beeinflusst und weist lokal eine Kippung von über 10° auf, die für HAA-Lager ungünstig ist. Das zentrale und östliche Molassebecken und der östliche Tafeljura wurden als günstig bis sehr günstig bewertet (Figur 4.3-1).

Beurteilung des ENSI

Durch den Ausschluss stärker tektonisch zergliederter Grossräume können für HAA-Lager in diesem Bewertungsschritt auch nach Einschätzung des ENSI nur der östliche Tafeljura (inklusive Vorfaltenzone) und das zentrale und östliche Molassebecken als günstig bis sehr günstig bewertet werden (NTB 08-03, Fig. 3.5-2). Das Molassebecken scheidet als Grossraum allerdings wegen bautechnisch zu anspruchsvoller Tiefenlage und zu hoher Gebirgstemperatur in den bevorzugten Wirtgesteinen im nächstfolgenden Schritt aus (NTB 08-03, S. 180 – 181).

Wie bei SMA sollte die schmale Triangelzone des Molassebeckens als bedingt günstig angesehen werden. Der bedingt günstig bis ungünstigen Bewertung des westlichen Molassebeckens und der Subjurasischen Zone der Ostschweiz wird zugestimmt. Insbesondere die Zergliederung durch rheinische Störungen, die lokale Seismizität und die Verkippung der Schichten im westlichen Molassebecken rechtfertigen nach Ansicht des ENSI eine ungünstige Bewertung. In der Subjurasischen Zone des westlichen Molassebeckens und im Faltenjura sind diese Nachteile noch ausgeprägter; der Grossraum wird nach Ansicht des ENSI zu Recht als ungenügend klassifiziert. Dem Ausschluss der Region Basel mit dem westlichen Tafeljura kann das ENSI aufgrund der Zergliederung, der ausgeprägten Seismizität und der unsicheren Langzeitstabilität folgen.

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass die Identifikation und Bewertung geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume nach SGT vorgenommen wurde und dieser Bewertung generell gefolgt werden kann.

4.4 Zusammenfassende Bewertung

Zur Einengung der für geologische Tiefenlager potenziell geeigneten geologisch-tektonischen Grossräume folgt die Nagra den Vorgaben aus Schritt 3 Etappe 1 SGT und präsentiert umfangreiche Literatur zu den geologischen Grundlagen und aktuelle eigene Studien.

Das ENSI hat angesichts zum Teil widersprüchlicher Publikationen der letzten Jahre zu grossräumiger Erosion und Modellvorstellungen zur Geodynamik der Alpen und ihres Vorlandes eigene Untersuchungen vorgenommen und gemeinsam mit der KNE auf zwei Symposien den aktuellsten Stand des Wissens zu glazialer Tiefenerosion und Seismizität evaluiert. Es ergeben sich daraus keine grundsätzlichen Abweichungen von dem seitens der Nagra dargelegten Wissensstand. Der Gliederung, Darstellung und Bewertung der geologisch-tektonischen Grossräume kann daher im Allgemeinen gefolgt werden.

Das ENSI teilt im Allgemeinen die Ansicht der Nagra, dass die Mindestanforderungen für SMA-Lager an die geologisch-tektonischen Grossräume in der Schweiz grundsätzlich überall erfüllt sind. In den Alpen könnten aber die Mindestanforderungen lokal nicht erfüllt sein, so dass seitens des ENSI Teile der Alpen mit erhöhten Hebungsraten und/oder seismisch erhöhter Aktivität höchstens als ungünstig, lokal aber auch als ungenügend anzusehen ist. Die Nordwestschweiz und der nördliche Teil der Alpen (nördlich der Anchizone, Figur 4.2-3) sind aufgrund der Zergliederung generell als bedingt günstig anzusehen. Der günstigen bis sehr günstigen Bewertung des östlichen Tafeljuras, der östlichen Subjurassischen Zone und des Molassebeckens kann das ENSI unter dem Vorbehalt folgen, dass potenzielle Wirtgesteine (Kapitel 5) in bautechnisch machbarer Tiefe (Felstemperatur unter 55° C, NTB 93-01) vorhanden sein müssen.

Durch den Ausschluss stärker tektonisch zergliederter Grossräume und solchen mit Erosionsraten über 0.4 mm pro Jahr sind nur der östliche Tafeljura (inklusive Vorfaltenzone) und das zentrale und östliche Molassebecken als günstig bis sehr günstig für HAA-Lager zu bewerten. Das Molassebecken kommt allerdings aufgrund der Tiefenlage der bevorzugten Wirtgesteine (Schritt 4) nicht in Betracht. Insbesondere die Zergliederung durch rheinische Störungen, die lokale Seismizität und die Verkipfung der Schichten im westlichen Molassebecken rechtfertigen nach Ansicht des ENSI eine ungünstige Bewertung, während für die östliche Subjurassische Zone eine bedingt günstige Bewertung passend erscheint. Die Subjurassische Zone des westlichen Molassebeckens, der Faltenjura und die Region Basel mit dem westlichen Tafeljuras werden nach Ansicht des ENSI zu Recht als ungenügend klassifiziert.

5 Identifikation der Wirtgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche

Zur Identifikation von Wirtgesteinen bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichen innerhalb der geeigneten Grossräume, die sich zur Aufnahme eines Tiefenlagers eignen könnten, sind die folgenden Kriterien und Aspekte zu berücksichtigen und zu bewerten (BFE 2008, S. 58):

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

Das ENSI geht in seiner Beurteilung zunächst auf das Vorgehen der Nagra und deren Grundlagen zur Identifikation der Wirtgesteine ein und beurteilt Vorgehen und Grundlagen bezüglich deren Konformität mit den Vorgaben des SGT (Kapitel 5.1). Darauf aufbauend werden die Wirtgesteinsvorschläge der Nagra für ein SMA-Lager betrachtet und beurteilt (Kapitel 5.2). Anschließend werden vom ENSI die Wirtgesteinsvorschläge der Nagra für ein HAA-Lager beurteilt (Kapitel 5.3). Die für die Beurteilung der Wirtgesteine wichtige Frage des Gastransportes (als Teil von Kriterium 2.3) ist vom ENSI bereits in Kapitel 3.3.4 dieses Gutachtens dargelegt worden. Die Beurteilungsergebnisse des ENSI werden in Kapitel 5.4 zusammengefasst.

5.1 Vorgehen und Grundlagen

Angaben der Nagra

Die Evaluation der Wirtgesteine wird seitens der Nagra in drei Teilschritte unterteilt (NTB 08-03, S. 113):

- In Teilschritt 1 werden die detaillierter zu evaluierenden Gesteinseinheiten identifiziert (gemeinsam für das SMA- und das HAA-Lager). Dazu wird von den für die Sicherheit und die technische Machbarkeit zentralen Merkmalen ausgegangen, d. h. der Mächtigkeit und der hydraulischen Durchlässigkeit. Die Mindestanforderungen bezüglich der Indikatoren 'Mächtigkeit' und 'Hydraulische Durchlässigkeit' bzw. 'Tongehalt' werden für eine Vorprüfung verwendet. Teilschritt 1 führt zu einer ersten signifikanten Reduktion der Möglich-

keiten: Alle Karbonatgesteine und Sandsteine sowie alle geringdurchlässigen Gesteine mit ungenügender Mächtigkeit werden ausgeschlossen.

- In Teilschritt 2 werden für die Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine die Mindestanforderungen der Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade', 'Laterale Ausdehnung', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' und 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' detaillierter evaluiert, um die in Teilschritt 1 identifizierten Gesteinseinheiten weiter einzuengen. Gesteine, die die Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden ausgeschlossen.
- In Teilschritt 3 kommen verschärfte Anforderungen zur Anwendung, die zur Auswahl bevorzugter Wirtgesteine für das SMA- und das HAA-Lager führen. Diese betreffen die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' sowie für das HAA-Lager zusätzlich den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus'. Gesteine, die den verschärften Anforderungen nicht genügen, werden von der Nagra zurückgestellt.

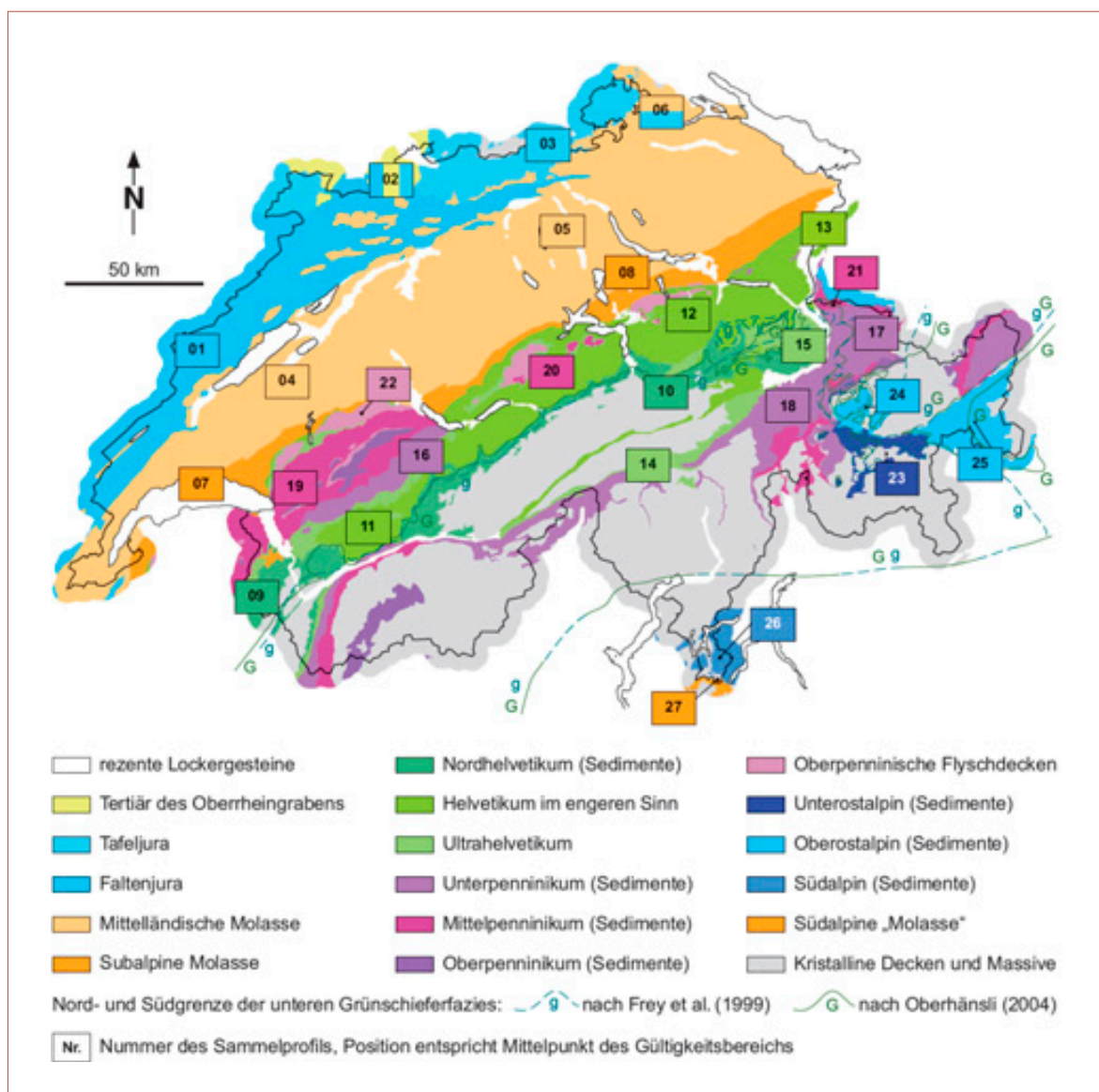
Die Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche beschränkt sich auf die weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume gemäss Schritt 3. Bei der Evaluation der Wirtgesteine werden gemäss SGT die Kriterien 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 2.1, 2.3, 3.1, 3.2 und 4.1 (vgl. Tabelle 1.4-1) berücksichtigt. Zusätzlich zu den Vorgaben im SGT werden seitens der Nagra auch die Kriterien 2.4 ('Nutzungskonflikte') und 3.3 ('Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen') verwendet (NTB 08-03, S. 119).

Im Hinblick auf die Identifikation der detaillierter zu evaluierenden Gesteinseinheiten werden die in der Schweiz vorkommenden Gesteine in zwei Gruppen eingeteilt (Kristallingesteine, Sedimentgesteine) und ihre wichtigsten Merkmale diskutiert. Kristallingesteine umfassen magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine, d. h. auch Sedimentgesteine, die mindestens untere Grün- oder Blauschieferfazies erlebt haben. Ab diesem Grad der Metamorphose verlieren die ursprünglich tonhaltigen Gesteine wegen der Umwandlung der quellfähigen Tonminerale in glimmerartige Minerale ihre Fähigkeit zur Selbstabdichtung von Klüften durch Quellen (NTB 08-03, S. 114).

Als Grundlage für die Identifikation der für beide Lagertypen detaillierter zu evaluierenden sedimentären Gesteinsabfolgen (und deren kristallinem Untergrund) wird die Schweiz in Areale aufgeteilt, deren geologischer Aufbau durch repräsentative Gesteinsabfolgen charakterisiert ist und in stratigraphischen Sammelprofilen dargestellt werden kann (NTB 08-03, S. 118). Diese Sammelprofile stellen eine Kompilation von stratigraphischen Informationen verschiedenen Ursprungs (Bohrungen, Oberflächenaufschlüsse) dar (Figur 5.1-1, ausführliche Beschreibungen in NAB 07-35). Potenziell mögliche Wirtgesteine können dabei in diversen Sammelprofilen vorkommen (allenfalls unter verschiedenen Namen) und werden zur anschliessenden Betrachtung zusammengefasst. Die stratigraphischen Sammelprofile des Alpenraums enthalten teilweise auch metamorph überprägte Sedimentgesteine, für die geprüft wird, ob die betreffenden Tonschiefer- und Mergel-Formationen aufgrund ihres Metamorphosegrads bereits zu den kristallinen Gesteinen gerechnet werden müssen, weil sie keine quellfähigen Tonminerale mehr enthalten.

Bei Kristallingesteinen kommen wegen des praktisch fehlenden Selbstabdichtungsvermögens für die Platzierung eines Lagers nur wenig deformierte Gesteinsblöcke in Frage; bei Sedimentgesteinen mit signifikantem Selbstabdichtungsvermögen kann eine gewisse Deformation in Kauf genommen werden.

Die in drei Teilschritten identifizierten bevorzugten Wirtgesteine werden charakterisiert und auf der Hierarchiestufe der Indikatoren bewertet. Basierend auf einer 5-stufigen Bewertung der Indikatoren wird eine 3-stufige Bewertung auf den Hierarchiestufen der Kriterien und Kriteriengruppen vorgenommen. Für die bevorzugten Wirtgesteine werden schliesslich auch die Verbreitungsräume der bevorzugten Wirtgesteine in der betrachteten Tiefe je für das SMA- und das HAA-Lager dargestellt (NTB 08-03, Fig. 4.7-1 und 4.7-2).



Figur 5.1-1: Geologisch-tektonischer Aufbau der Schweiz (auf Grundlage der Tektonischen Karte der Schweiz 1:500'000, swisstopo) und daraus hergeleitete stratigraphische Sammelprofile (NTB 08-03, Fig. 4.1-2). Die Position der Sammelprofilnummern 1 – 27 gibt in etwa das Zentrum des jeweiligen Gültigkeitsgebietes an. Ausserdem eingezeichnet sind die publizierten Grenzen zur Grünschieferfazies («g» gemäss Frey et al. 1999 bzw. «G» gemäss Oberhänsli 2004).

Beurteilung des ENSI

Das von der Nagra gewählte Vorgehen in drei Teilschritten wird als zweckmässig und sicherheitsgerichtet angesehen. Die dazu gewählten sicherheitstechnischen Kriterien (dargestellt durch die zugeordneten Indikatoren) entsprechen den Vorgaben im Konzeptteil zum Sachplan (BFE 2008). Die Vorgaben sind mit den zusätzlich verwendeten Kriterien 2.4 und 3.3 bzw. den Indikatoren 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins' und 'Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation' aus Sicht des ENSI sinnvoll ergänzt worden.

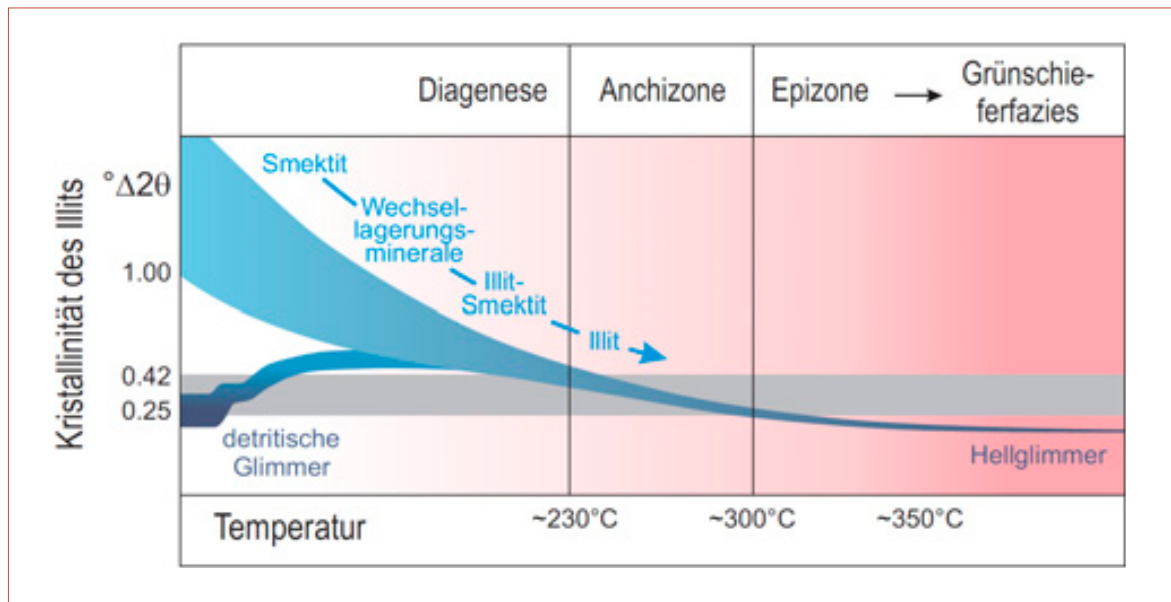
Die von der Nagra in Teilschritt 3 vorgenommene weitere Einengung von potenziell geeigneten auf bevorzugte Wirtgesteine auf der Basis von verschärften Anforderungen wird im Sachplan in dieser Art nicht gefordert. Der Einsatz eines schrittweisen Verfahrens und die Verschärfung der Anforderungen (bezüglich der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' und, nur für HAA, 'Homogenität der Gesteinseigenschaften') sind jedoch aus Sicht des ENSI sicherheitsgerichtet und daher zu begrüssen.

Die Trennung zwischen metamorph überprägten Sedimentgesteinen und Kristallingesteinen anhand von einer Überprägung von grün- (300° C) oder blauschieferfaziellem (250°C, 0.8 GPa) Grad ist nachvollziehbar. Aus Sicht des ENSI sind in tonreichen Gesteinen jedoch bereits zu Beginn der Anchizone kaum mehr quellbare Tonminerale (Smektite) vorhanden (Tabelle 5.1-1, Figur 5.1-2, vgl. auch swisstopo 2010). Damit wird das Selbstabdichtungsvermögen des Gesteins reduziert. Das ENSI sieht daher bei seiner Beurteilung den Übergang zwischen tonreichen Gesteinen und deren metamorphen Äquivalenten (die als Kristallingesteine zu betrachten sind) als den Beginn der Anchizone an (vgl. Diagenese-Anchizonengrenze in Figur 4.2-3). Dies bedeutet, dass der geologisch-tektonische Grossraum Alpen seitens ENSI differenzierter betrachtet wird und für tonreiche Gesteine damit gewisse Gebiete nicht betrachtet werden, da die dortigen tonreichen Gesteine keine quellbaren Anteile mehr hätten (vgl. Kapitel 4.2).

Das ENSI hat das Ergebnis der Nagra aus der Evaluation der sedimentären Gesteinseinheiten anhand von 27 Sammelprofilen (NAB 07-35) durch swisstopo überprüfen lassen (swisstopo 2010). Die detaillierte Prüfung der Datenbasis zu den von der Nagra verwendeten Sammelprofilen hat keine substantiellen Lücken in der verwendeten Literaturkompilation bzw. den darin dargestellten Profilen und Gesteinen (NAB 07-35) ergeben. swisstopo kommt zum Schluss (swisstopo 2010), dass die Sammelprofile und die darin dargestellten Gesteine vollständig sind und die daraus von der Nagra abgeleitete Auswahl potenzieller Wirtgesteine korrekt ist. In der Zusammenstellung der potenziellen Wirtgesteine wurde seitens swisstopo das Fehlen einer detaillierten Diskussion der in den Préalpes vorkommenden tonigen Gesteine der Staldengraben-Formation Einheit A bemängelt, wohingegen die in den Kartenblättern oft als «calcaréo-siliceuse» (Weidmann 1993) bezeichnete Einheit D diskutiert wird (NAB 07-35). Die Nagra hat die entsprechende Zusammenstellung zur Staldengraben-Formation Einheit A nachgeliefert (NAB 09-29). Auch für diese Gesteinseinheit lässt sich aufgrund der lateralen Ausdehnung keine genügend grosse Akkumulation in geeigneter Tiefenlage nachweisen. Damit ist die Zusammenstellung der zu überprüfenden Gesteinseinheiten der Nagra aus Sicht von swisstopo und ENSI vollständig.

Tabelle 5.1-1: Mineralspezifische Parameter diverser Tonminerale bezüglich ihrer Barrierenwirkung (Sorptions- und Abdichtungseigenschaften). x = strukturelle negative Ladung pro halbe Elementarzelle. Daten aus (a) Rowe et al. 1995, (b) Grim 1968 und (c) Sparks 1995.

Mineral	x^a	CEC [meq/kg] ^b	Spezifische Oberfläche [m ² /g]	Hydraulische Durchlässigkeit [m/s] ^a	Quellbarkeit/Schrumpfen ^a
Kaolinit	0 – 0.015	30 – 150	15 ^a , 7 – 30 ^c	$> 10^{-8}$	kein Quellen
Illit	0.6 – 1.0	100 – 400	80 ^a	$10^{-9} – 10^{-11}$	kein Quellen
Chlorit	0.6 – 1.0	100 – 400	80 ^a , 25 – 150 ^c		kein Quellen
Vermikulit	0.6 – 0.9	1'000 – 1'500	250 ^a , 50 – 800 ^c		mässig
Smektit	0.2 – 0.6	800 – 1'500	800 ^a , 600 – 800 ^c	$10^{-11} – 10^{-15}$	stark



Figur 5.1-2: Tonmineralogische Entwicklung (anhand des Parameters der Illit-Kristallinität) in tonreichen Gesteinen mit steigender thermischer Überprägung (nach Kübler et al. 1979). In der Diagenese liegen gleichwertig eingeschwemmte (detritische) und neugebildete Tonminerale vor. Diese «reifen» mit zunehmender Temperatur, wobei die quellbaren Tonminerale (Smektite) zusehends durch nicht-quellbare (Illite) ersetzt werden. Zu Beginn der Anchizone (bei einer Illit-Kristallinität von 0.42 °Δ2θ) sind kaum noch quellbare Anteile vorhanden. Der Temperaturwert zum Übergang Diagenese-Anchizone wurde aus Mullis et al. 2002) übernommen.

Eine grosse Anzahl toniger und tonhaltiger Gesteinseinheiten wird von der Nagra aufgrund ungenügender Mächtigkeit, ungenügender lateraler Ausdehnung oder ungenügender Tiefenlage (Kriterium 1.1) ausgeschlossen. Dazu hat swisstopo im Detail geprüft, ob sich in geeigneter Tiefenlage neben den von der Nagra beurteilten Gesteinseinheiten (NAB 07-35; NAB 08-03) weitere Einheiten bzw. tonige Akkumulationen mit geeigneter Mächtigkeit, geeigneter lateraler Ausdehnung und geeigneter Tiefenlage finden. Diese Prüfung hat keine weiteren Einheiten bzw. Standorte ergeben. Das ENSI ist sich bewusst, dass diese Suche auf dem heutigen Kenntnisstand beruht. Aufgrund der von der Nagra vorgelegten umfangreichen Dokumentation (NAB 08-03) ist es wenig wahrscheinlich, dass in den Alpen weitere, grosse Akkumulationen in geeigneter Tiefenlage vorhanden sind. Aus Sicht des ENSI ist die Anwendung der Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Laterale Ausdehnung' und 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit' (letzterer gemäss Definition der Nagra, vgl. Kapitel 3.4) nachvollziehbar. Eine Diskrepanz in der angewendeten maximalen Tiefenlage zwischen NTB 08-03 (900 m für Sedimentge-

Metamorphose von Tongesteinen

Gesteine, die durch geologische Prozesse in grössere Tiefen versenkt werden, gelangen unter erhöhte Druck- und Temperaturbedingungen. So nimmt im Durchschnitt in der Erdkruste der Druck um etwa 3 MPa und 3° C pro 100 m Tiefe zu. Für Sedimentgesteine, die an der Oberfläche entstanden sind, bedeuten die zunehmenden Druck- und Temperaturbedingungen, dass sich das Gestein den neuen Bedingungen anpasst: Es wird zusammengepresst, das vorhandene Porenwasser ausgepresst und das Gestein von einem Locker- zu einem Festgestein konsolidiert. Ein an der Oberfläche (oder im Meer) entstandener knetbarer Ton wird zu einem Tongestein, die zunehmende Kompaktierung führt dazu, dass die vornehmlich blättrigen Tonminerale sich flächenhaft einregeln und das Gestein eine feinschichtige Textur erhält.

In Tiefen mit Temperaturen bis 200-230° C finden sich in Tongesteinen noch immer Tonminerale, die quellfähig sind, d. h. deren Kristallstruktur Wasser aufnehmen und dadurch einen Quelldruck ausüben und eine Selbstabdichtung der Tongesteine bewirken können.

Jedoch werden diese quellbaren Tonminerale bei noch höheren Temperaturen und Drücken zusehends in nicht-quellbare Minerale umgewandelt und das Gestein verliert dann seine selbstabdichtenden Eigenschaften. Die feinen Tonpartikel im Gestein wachsen dabei und bilden oberhalb von etwa 300° C zusehends von Auge sichtbare grössere Glimmerplättchen aus. Das ehemalige feinstkörnige Tongestein wird so zu einem grobkörnigen Glimmerschiefer. Die Glimmer sind dabei ähnlich aufgebaut wie die früheren Tonminerale und haben immer noch wenige Prozente von im Kristallgitter eingebautem Wasser. Dieses wird erst bei sehr viel höheren Temperaturen vollständig abgegeben, wenn sich die blättrigen Glimmer in andere, wasserfreie Minerale umwandeln.

Als Wirtgestein für ein geologisches Tiefenlager sind Tongesteine nur solange interessant, als sie dank der quellbaren Anteile ein ausgeprägtes Selbstabdichtungsvermögen haben. Ausserdem haben die quellbaren Tonminerale bessere Eigenschaften, radioaktive Elemente an sich zu binden als die nicht-quellbaren Tonminerale.



steine für ein HAA-Lager) und NAB 07-35 (800 m für alle Sedimentgesteine) hat nach Auskunft Nagra (NAB 09-29) und Überprüfung durch das ENSI keinen Einfluss auf die ausgewählten Gesteine.

Die Anwendung des Indikators 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)' (Kriterium 2.1) ist für die Effinger Schichten aufgrund des Karbonatgehaltes von spezieller Bedeutung. Mit steigendem Gehalt an Calcit und sinkendem Gehalt an anderen Mineralen ergibt sich ein zunehmendes Verkarstungspotenzial. Dabei sind die umgebenden Gesteine mit zu betrachten. Wie die Nagra aufzeigt (NAB 07-28), können direkt an der Oberfläche gemachte Beobachtungen zum Verkarstungspotenzial eines Gesteins nur beschränkt auf die Verhältnisse in grösserer Tiefe übertragen werden. In grösserer Tiefe ist das Verkarstungspotenzial grundsätzlich nicht nur vom Karbonatgehalt des Gesteins abhängig, sondern auch von der lokalen hydrogeologischen und tektonischen Situation und den darüber liegenden Gesteinen und deren Verkarstungspotenzial. Aus Sicht des ENSI ist in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht und standortspezifisch zu berücksichtigen, inwiefern eine initiale Klüftung im Wirtgestein vorhanden ist und sich über den Betrachtungszeitraum hinweg Wasserwegsamkeiten bilden könnten.

Die Anwendung des Indikators 'Tongehalt' zeigt, dass für viele tonhaltige Gesteine auf Feldbeschreibungen zurückgegriffen werden muss (NAB 07-35), die vom subjektiven Feldbefund des kartierenden Geologen abhängen. Das Erfüllen der Mindestanforderung von ≥ 25 % Tonmineralen muss damit oft aus Begriffen wie «toniger Mergel», «kalkiger Mergel», «mergeliger Kalk» abgeschätzt werden, ohne dass gemessene Daten zum Tonmineralgehalt vorliegen. Das ENSI ist sich bewusst, dass der Bestimmung des Indikators 'Tongehalt' (stellvertretend zu einer Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit) eine grosse Ungewissheit eingeräumt werden muss. Nur eine geringe Anzahl der detaillierter zu evaluierenden Gesteinseinheiten ist jedoch aufgrund ihres Tongehaltes bzw. ihrer hydraulischen Durchlässigkeit ausgeschlossen worden (NTB 08-03, Tab. 4.2-1). Die Vollständigkeit der von der Nagra evaluierten Gesteinseinheiten ist durch swisstopo geprüft worden. Dabei haben sich keine Gesteinseinheiten ergeben, deren Eignung aufgrund des Tongehalts anders eingeschätzt worden ist oder die zusätzlich zu den betrachteten Einheiten zu berücksichtigen wären.

Aufgrund der oben genannten Überlegungen zum Übergang zwischen unmetamorphen Sedimenten und deren metamorphen Äquivalenten sind diverse von der Nagra diskutierte Einheiten (Verrucano-Schiefer, diverse Akkumulationen von Aalénien-Schiefern, die Bündnerschiefer und diverse Flysch-Einheiten) auch aus Sicht des ENSI nicht weiter zu betrachten, da diese nur in metamorpher Überprägung vorliegen (vgl. Kapitel 5.2).

Das ENSI stellt fest, dass die Nagra den Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' nur für HAA-Wirtgesteine anwendet. Dort führt die Berücksichtigung dieses Indikators zum Ausscheiden des «Braunen Doggers» und der Effinger Schichten, während diese beiden Gesteine als bevorzugte SMA-Wirtgesteine in Schritt 5 aufgenommen werden. Die Nagra argumentiert damit, dass eine beschränkte Heterogenität in der Geologie durch die flexible Auslegung des Lagers aufgefangen werden kann (Kapitel 3.4, Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus'). Aus Sicht des ENSI ist die Begründung zu diesem Vorgehen nachvollziehbar, da dadurch für SMA nicht allzu früh potenziell geeignete Wirtgesteine ausgeschieden werden.

Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass das ENSI mit dem Vorgehen und den für die Evaluation herangezogenen Grundlagen der Nagra (Sammelprofile) einverstanden ist.

5.2 Wirtgesteine für SMA-Lager

Angaben der Nagra

Die Analyse der 27 stratigraphischen Sammelprofile mit Sedimentgesteinen bzw. -gesteinsabfolgen bezüglich kritischer Gesteinsmerkmale führt im ersten Teilschritt zu 24 weiter zu betrachtenden Sedimentgesteinseinheiten und zwei Kristallineinheiten (NTB 08-03, S. 121). Im zweiten Teilschritt werden die 26 Wirtgesteine mittels Literaturdaten bezüglich der Mindestanforderungen für die Wirtgesteine detaillierter evaluiert (NTB 08-03, S. 121– 128). Daraus werden die folgenden acht 'potenziell möglichen Wirtgesteine' identifiziert (NTB 08-03, S. 129 und Tabelle 4.2-1):

- der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen,
- die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen,
- die Effinger Schichten,
- die Mergel-Formationen des Helvetikums,
- die tonreichen Gesteine der Unteren Süßwassermolasse USM (Marnes Bariolées s.str.),
- die tonreichen Gesteine der Oberen Süßwassermolasse OSM (Basiszone, Bodensee-Schüttung),
- die Kristallingesteine der Nordschweiz (wenig deformierte Blöcke),
- die Kristallingesteine der Alpen (wenig deformierte Blöcke).

Die Verwendung von verschärften Anforderungen für die Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' führt im dritten Teilschritt zur Einschränkung auf die folgenden vier bevorzugten Wirtgesteine (NTB 08-03, S. 132):

- der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen,
- die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen,
- die Effinger Schichten,
- die Mergel-Formationen des Helvetikums.

Die tonreichen Gesteine der USM und OSM erfüllen wegen der erhöhten horizontalen Durchlässigkeit der Sandsteinrinnen die verschärften Anforderungen an die horizontale Durchlässigkeit (Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit') nicht, da diesen Rinnen mit den Lagerkammern eines SMA-Lagers kaum vollständig ausgewichen werden könnte. Weiter wird auch die Explorierbarkeit dieser Sandsteinrinnen (Lokalisierung, Charakterisierung) als sehr schwierig beurteilt (Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit'). Für die USM (Marnes Bariolées s.str.) kommen noch erschwerend die tektonischen Verhältnisse im westlichen Molassebecken mit der erhöhten tektonischen Zergliederung dazu. Eine potenzielle Möglichkeit für ein sicheres SMA-Lager in den tonreichen Gesteinen der USM und der OSM würde darin bestehen, verstärkte technische Barrieren zu benutzen, welche die Radionuklidrückhaltung mehrheitlich gewährleisten müssten; dies steht aber im Widerspruch zum von der Nagra gewählten Sicherheitskonzept. Aus diesen Gründen werden die tonreichen Gesteine der USM und OSM zurückgestellt (NTB 08-03, S. 132).

Die als potenziell möglich identifizierten Kristallingesteine der Alpen und der Nordschweiz sind kleinräumig zergliedert, und es werden sehr eingeeengte Raumverhältnisse erwartet (Indikator 'Laterale Ausdehnung'). Weiter sind die Kristallingesteine wegen ihrer tektonischen Überprägung sehr heterogen (Klüftung, Scher- und Störungszonen inkl. Channeling) und ihre Explorierbarkeit (Identifikation höher durchlässiger präferenzierter Fließpfade (Channels)) sowie Charakterisierung sind schlecht. Die Kristallingesteine der Alpen und der Nordschweiz erfüllen die verschärften Anforderungen bezüglich des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' nicht und werden deshalb zurückgestellt (NTB 08-03, S. 132).









Die bevorzugten Wirtgesteine inklusive deren Rahmengesteine (wo vorhanden) für das SMA-Lager verteilen sich auf Vorkommen in den Grossräumen Alpen (Mergel-Formationen des Helvetikums), östliche Subjurassische Zone und östlicher Tafeljura. Der Opalinuston, die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger', und die Effinger Schichten befinden sich mehrheitlich noch im ursprünglichen Schichtverband, d. h. sie bilden eine praktisch nahtlose stratigraphische Schichtabfolge. Dies führt dazu, dass bei der Beschreibung der Wirtgesteine und ihrer Rahmengesteine die «Rollen» abwechslungsweise getauscht werden: Das Rahmengestein des Einen wird zum Wirtgestein – und umgekehrt. Die Mergel des Helvetikums haben ausschliesslich in tektonischen Akkumulationen das Raum-Potenzial für ein mögliches Wirtgestein; die Beiträge allenfalls vorhandener Rahmengesteine müssen standortspezifisch beurteilt werden (NTB 08-04, S. 175).

Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die von der Nagra angewendete Evaluation im Detail geprüft. Tabelle 5.2 1 listet die in Teilschritt 2 von der Nagra evaluierten Gesteine auf und stellt die Argumentation der Nagra derjenigen des ENSI gegenüber.

Tabelle 5.2-1: Zusammenstellung der Beurteilung des ENSI und der Nagra der 26 potenziell möglichen Wirtgesteine für das SMA-Lager. Ergänzende Kommentare sind einzeln nummeriert und unter der Tabelle erläutert. Die Nagra hat wirtgesteinsspezifisch auf eine weitere Beurteilung teilweise verzichtet, wenn mindestens für einen Indikator die Mindestanforderungen nicht erfüllt wurden.

Gestein	Mindestanforderungen									Verschärfte Anforderungen	
	Hydraulische Durchlässigkeit	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	Mächtigkeit	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Laterale Ausdehnung	Hydraulische Durchlässigkeit	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit
Verrucano, Karbon-Schiefer	1	gK							gK		
Playa-Serie									2, zT		
Trias-Evaporite (TJ, SJZ)			3			gK			zT	zT	
Trias-Evaporite (Alpen)						zT					
Kössen-Allgäu-Formation					zT						
Lias (indifférent)									zT		
Opalinuston (westl. TJ, FJ, SJZ)				4							
Opalinuston (östl. TJ, SJZ)				4							
Aalénien-Tonschiefer	gK								gK, 5		
Staldengraben-Formation				6, zT	6, zT				6, zT		
«Brauner Dogger»				4							
Effinger Schichten (FJ, westl. SJZ)	zT	zT	zT								
Effinger Schichten (östl. TJ, SJZ)											
Renggeri-Ton, Terrain à Chailles			zT	zT							
Bündnerschiefer	1										
Scaglia											
Mergel-Formationen d. Helvetikums											
Flysch-Formationen	1, zT								zT		
USM (Marnes Bariolées s. str.)											
Meletta-Schichten											
Formazione di Chiasso				7							
Brendenbach-Mergel-Formation											
OSM (Basiszone, Bodensee-Schüttung)											
Quartäre Seeablagerungen					8						
Kristallingesteine (Nordschweiz)									9, zT	9	
Kristallingesteine (Alpen)									9, zT	9	

- | | | | | | |
|---|--|---|--|---|--|
|  | Anforderungen gemäss Nagra (NTB 08-03, Tab. 4.2-1) und ENSI nicht erfüllt. |  | Anforderungen gemäss ENSI nicht erfüllt. | FJ, TJ | Falten-/Tafeljura |
| | | | | SJZ | Subjurassische Zone |
|  | potenziell mögliches Wirtgestein gemäss Nagra (erfüllt Mindestanforderungen) |  | bevorzugtes Wirtgestein gemäss Nagra (erfüllt verschärfte Anforderungen) |  | Anforderungen gemäss Nagra und ENSI erfüllt. |
|  | zT zum Teil nicht erfüllt |  | gK gekoppelte Eigenschaft |  | Wirtgestein wird nicht weiter betrachtet. |

Erläuterungen des ENSI zu Tabelle 5.2-1:

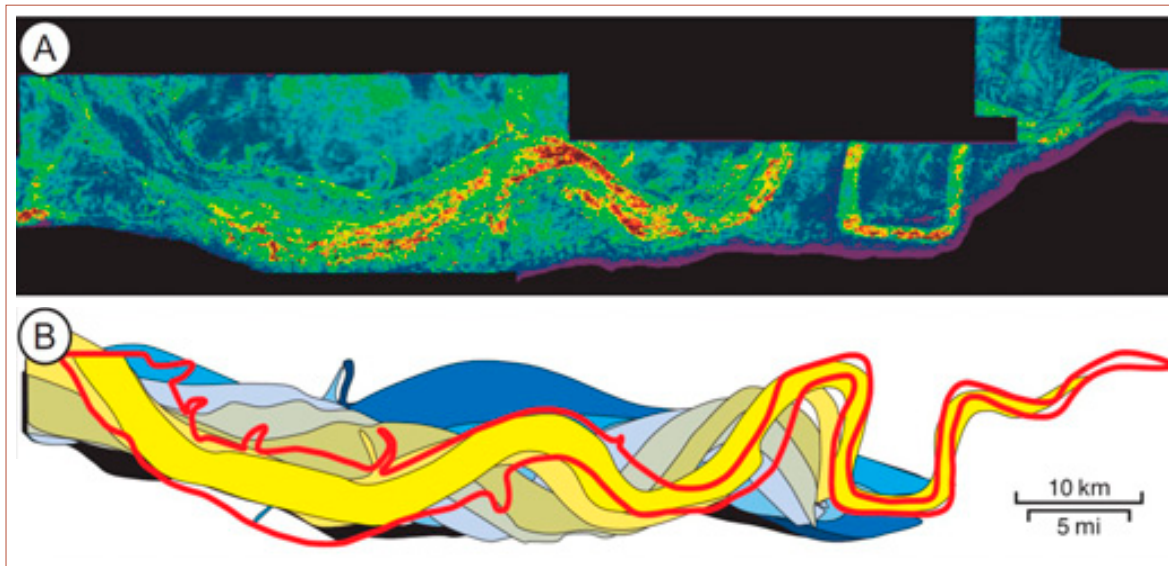
- 1 Die Gesteine, die mindestens anchizonal sind, erfüllen die Mindestanforderungen an den Tongehalt von 25 % nicht. Damit ist in diesen Gesteinen mit schlechten Selbstabdichtungseigenschaften und bei tektonischer Beanspruchung mit sprödem Verhalten zu rechnen. Dies betrifft alle Vorkommen von Verrucano (vgl. NTB 08-03, S. 121), Karbon-Schiefern, Bündnerschiefern und diverse Flysch-Formationen.
- 2 Gemäss Aussage Nagra (NTB 08-03, S. 122) liegt die Playa-Serie in der Ajoie zu tief. Das ENSI ist mit dieser Einschätzung einverstanden.
- 3 Das ENSI nimmt grundsätzlich für alle Evaporitgesteine ein hohes Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) an.
- 4 Als stratigraphisches Schichtglied isoliert betrachtet, entspricht der Opalinuston zum Teil den Mindestanforderungen an die Mächtigkeit nicht (vgl. NTB 08-03, Fig. 5.2-1). Erst in Kombination mit den darunter- und darüberliegenden tonigen Gesteinen kann in den betrachteten Grossräumen über weite Flächen eine genügende Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches angenommen werden (vgl. NTB 08-03, S. 123). Dieselbe Aussage gilt für den «Braunen Dogger», der die Mindestanforderungen bezüglich Mächtigkeit nur unter Berücksichtigung seiner tonreichen Rahmengesteine erfüllt (vgl. NTB 08-03, S. 124).
- 5 Das ENSI teilt die Meinung der Nagra, dass das Aalénien gewöhnlich in zu geringer Mächtigkeit vorliegt. Eine geringe Anzahl von Akkumulationen (z. B. bei Chamoson, VS) könnte hingegen die Mindestanforderungen an die Platzverhältnisse erfüllen. Aufgrund des zu hohen Metamorphosegrades sind jedoch keine Aalénien-Akkumulationen weiter zu betrachten.
- 6 In Übereinstimmung mit den Aussagen der Nagra zur Staldengraben-Formation Einheit A (NAB 09-29) beurteilt das ENSI die Mächtigkeit über mehrere geologische Kartenblätter als deutlich oberhalb der Mindestanforderungen. Bezüglich Tiefenlage finden sich entlang der bekannten Profile jedoch nur relativ seichte oder bautechnisch zu tiefe Vorkommen mit deutlicher tektonischer Überprägung.
- 7 Das ENSI stimmt der Aussage der Nagra (NTB 08-03, S. 127) zu, dass die Mergel der Formation di Chiasso auf Schweizer Gebiet weniger als 100 m mächtig und deutlich verkippt sind.
- 8 Aus den glazial übertieften Rinnentälern sind nur wenige Stellen bekannt, an denen die quartäre Gesamtmächtigkeit mehr als 300 m beträgt. Die Talgeometrien sind nur teilweise durch Bohrungen erfasst, so dass hier aufwändige Bohrkampagnen notwendig wären, um einen Standort in seiner Geometrie zu erfassen.
- 9 Das ENSI ist der Ansicht, dass die von der Nagra betrachteten wenig deformierten Blöcke kristallinen Gesteins mit genügend geringer hydraulischer Durchlässigkeit in ihrer lateraler Ausdehnung zu klein sind, um ein SMA-Lager aufzunehmen. Insbesondere im alpinen Raum sind aufgrund der spröde-tektonischen Durchbewegung während der alpinen Gebirgsbildung vermutlich keine undeformierten Blöcke in genügender Grösse vorhanden. Erfahrungen aus den Arbeiten der Nagra zum Kristallin in der Nordschweiz (NTB 93-01) lassen vermuten, dass die räumliche Häufigkeit bedeutender vertikaler Kluftsysteme zu gross ist, als dass ein SMA-Lager dazwischen platziert werden könnte. Das ENSI ist daher der Meinung, dass die Kristallingesteine bezüglich Indikator 'Lateraler Ausdehnung' die Mindestanforderungen höchstens in knapp bemessenen isolierten Blöcken, die verschärften Anforderungen hingegen nicht erfüllen.

Die von der Nagra im dritten Teilschritt vorgenommene Anwendung der verschärften Anforderungen zu den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' führt zur Zurückstellung der Lithologien der USM und OSM, nachdem diese Gesteine nur unter Vorbehalt weiter betrachtet wurden (NTB 08-03, S. 126). Die für diese Gesteine beobachtete Variabilität der Gesteinseigenschaften erfüllt bezüglich sedimentären Aufbaus und Faziesverteilung auch aus Sicht des ENSI die verschärften Anforderungen nicht. Die fazielle Variabilität geht einher mit deutlichen Unterschieden in der hydraulischen Durchlässigkeit (siehe Figur 5.3-3) sowie bezüglich vorhandener Klüfte. Für die unterschiedlichen Fazies in den Molassesandsteinen lassen sich Durchlässigkeitswerte über mehr als acht Grössenordnungen nachweisen und die hydraulisch durchlässigen Sandsteinrinnen sind seismisch nicht erfassbar (NAB 07-04). Das ENSI ist daher damit einverstanden, dass die Nagra die Gesteine der USM und OSM für SMA-Lager nicht weiter betrachtet.

Auch für kristalline Gesteine führt die Nagra aus, dass die Anforderungen an den Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' nicht erfüllt sind, nachdem auch die Kristallingesteine nur unter «Vorbehalt» und der Annahme des Vorhandenseins von wenig deformierten Blöcken die Mindestanforderungen erfüllen (NTB 08-03, S. 128). Aus Sicht des ENSI sind die vorhandenen «wenig deformierten Blöcke» aus Kristallingestein kaum geeignet, den Mindestanforderungen bezüglich lateraler Ausdehnung zu genügen. Insbesondere im Grossraum Alpen liegen die von der Nagra herangezogenen wenig deformierten Kristallinblöcke kaum in genügender Ausdehnung bzw. bei der notwendigen Ausdehnung in genügender hydraulischer Durchlässigkeit vor, da die entsprechenden Gesteine fast ausnahmslos prä-alpin sind und im Verlauf der alpinen Gebirgsbildung spröde-tektonisch überprägt wurden. Über die Vorbehalte der Nagra hinaus ist das ENSI daher der Meinung, dass Kristallingesteine auch bezüglich des Indikators 'Hydraulische Durchlässigkeit' die verschärften Anforderungen nicht erfüllen. Das ENSI ist grundsätzlich damit einverstanden, dass die Kristallingesteine nicht weiter betrachtet werden.

Die in den Alpen vorkommenden tonreichen Abfolgen in den Bündnerschiefern und Flyschabfolgen weisen zum Teil ein bedeutendes Volumen auf. In Ergänzung zur Nagra schliesst das ENSI aufgrund einer differenzierten Betrachtung des geologisch-tektonischen Grossraumes der Alpen (vgl. Kapitel 4.2 und 5.1) die Mehrheit dieser Vorkommen aufgrund des zu hohen Metamorphosegrades aus (darunter z. B. die Valzeina-Formation der Bündnerschiefer im Prättigau, einen grossen Teil der nordhelvetischen Flyschvorkommen (swisstopo 2010, NAB 09-29), die tonreiche Basis des Niesenflysches), da in der Anchizone zunächst die Quelfähigkeit und damit die Selbstabdichtung der tonreichen Gesteine nachlässt und in der Grünschieferfazies durch die Bildung von Glimmern die Tonminerale vollständig umgewandelt werden.

Das ENSI ist der Meinung, dass Flysche aufgrund ihrer Ablagerungsgeschichte stets Inhomogenitäten aufweisen, die in etwas grösserem Massstab denjenigen der USM oder OSM gleichen. So lassen sich z. B. auch in distal abgelagerten Flyschvorkommen mit hochauflösender Seismik mäandrierende Schüttungsrinnen nachweisen, die über den Ablagerungszeitraum nicht ortsfest waren (Figur 5.2-1). Derartige Schüttungsrinnen enthalten gut sortierte, hydraulisch durchlässige Sande, die zum Teil Öl und Gas führen (Speichergesteine). In derartigen tiefen Meeresbecken bewirken zudem Strömungen in verschiedenen Tiefen (Konturite) kaum vorhersagbare Ausspü-



Figur 5.2-1: Beispiel einer faziellen Variation in einem alpinen, nicht tektonisierten Flysch mit hochauflösender Seismik (De Ruig und Hubbard 2006): (A) Hochauflösende seismische Signale innerhalb eines mäandrierenden Schüttungskanal in distalen Flyschablagerungen der Puchkirchen-Formation, Österreich. (B) Zusammenfassung der seismischen Signale aus mehreren vertikaler Ebenen als Entwicklung einer lateralen Wanderung eines grossen Schüttungskanal im Verlauf der Zeit. Der rote Umriss entspricht dem jüngsten, in (A) sichtbaren Verlauf des Kanals. Man beachte die 5- bis 10-fach grösseren Raumskalen im Vergleich zu den lateralen Fazieswechseln in der USM (Hölker 2006).

lungen von Tonen und Anreicherungen von Sanden. Daraus ergibt sich eine komplexe räumliche Verteilung dichter toniger Abschnitte und deutlich durchlässigerer sandiger Abschnitte.

Die Flyschvorkommen sind in den Schweizer Alpen zudem infolge tektonischer Überprägung stets zerschert, verschuppt oder stark verfaultet. Dabei verhalten sich die tonreicheren Flyschpakete duktiler, so dass die Sandsteinabfolgen als zerbrochene Härtlinge in dieser tonreicheren Matrix schwimmen (tektonische Mélange). Damit werden die räumlichen Verhältnisse tonreicher Partien zusätzlich schwierig prognostizierbar.

Die am Ende des dritten Teilschrittes verbleibenden vier bevorzugten Wirtgesteine werden von der Nagra in NTB 08-03 (S. 141 – 173) bzw. NTB 08-04 (S. 123 – 187) bezüglich der im Sachplan formulierten 13 sicherheitstechnischen Kriterien beschrieben und bewertet. Dabei ist, wie von der Nagra festgehalten wurde, grundsätzlich zu beachten, dass die Wirtgesteine Opalinuston und «Brauner Dogger» neben dem eigentlichen Wirtgestein von günstigen Rahmengesteinen umgeben sind. Diese fehlen bei den Effinger Schichten und sind bei den helvetischen Mergeln nur standortspezifisch vorhanden (NTB 08-03, S. 139).

Die folgende Tabelle fasst die Beurteilungen des ENSI bezüglich der gemäss SGT vorgegebenen Kriterien zusammen und vergleicht die Einschätzung mit derjenigen der Nagra (NTB 08-03, Tab. 4.7-1). Daran anschliessend werden die Differenzen in der Beurteilung erläutert. Tabelle 5.2-2 zeigt, dass zwischen der Bewertung der Nagra und der Beurteilung des ENSI in den meisten Fällen Übereinstimmung herrscht. Die Tabelle zeigt auch, dass das ENSI gegenüber den vorgeschlagenen bevorzugten Wirtgesteinen kein Kriterium evaluiert hat, das als ungenügend zu

Tabelle 5.2-2: Vergleich der Bewertung der bevorzugten SMA-Wirtgesteine durch die Nagra (gemäss NTB 08-03, Tab. 4.7-1) und das ENSI bezüglich der durch den SGT vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien. Die Differenzen in der Bewertung sind felderspezifisch nummeriert (1 – 5) und werden im folgenden Text erläutert. Das ENSI stützt sich bei seiner Bewertung teilweise auf alternative Bewertungsskalen.

Kriterium (für Schritt 4 gemäss SGT)	Opalinuston		«Brauner Dogger»		Effinger Schichten		Helvetische Mergel	
	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung								
1.3 Geochemische Bedingungen								
1.4 Freisetzungspfade								
2.1 Beständigkeit der Gesteinseigenschaften								
2.3 Lagerbedingte Einflüsse		1		1		1		1
2.4 Nutzungskonflikte								
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine								2
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse				3		3		
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen								4
4.1 Felsmechanische Eigen- schaften und Bedingungen		5		5		5		5



Bewertung günstig
bis sehr günstig



Bewertung ungünstig
bis bedingt günstig

bewerten wäre und damit zu einer klaren Differenz zur Nagra führen würde. Dennoch finden sich in der Einschätzung des ENSI einige Nuancen zur Bewertung der Nagra (die folgenden Nummern beziehen sich auf die in Tabelle 5.2-2 nummerierten Felder):

- Das ENSI sieht die lagerbedingten Einflüsse (Bildung von Auflockerungszonen, limitierte pH-Fahne, Gasentwicklung) grundsätzlich kritischer als die Nagra (vgl. auch Kapitel 3.4). Die bevorzugten Wirtgesteine sind alle tonreich und bilden daher bei der Erstellung der SMA-Lagerkavernen für die Langzeitentwicklung relevante Auflockerungszonen aus. Insbesondere im Falle der grossen SMA-Lagerkavernen ist durch deren Ausbruch mit signifikanten Auflockerungszonen zu rechnen. Für diese kann in günstigen Fällen davon ausgegangen werden, dass Tongesteine die Auflockerungszonen unter Aufsättigung wieder abdichten. Deren Sicherung muss jedoch unmittelbar beim Ausbruch erfolgen. Die Tonminerale gehen bei den hohen pH-Werten, wie sie im Zementnahfeld herrschen, Mineralumwandlungen ein. Die dadurch allenfalls entstehende geringere Durchlässigkeit der Gesteine kann zur Akkumulation von Korrosions- und Degradationsgasen und kritischen Gasdrücken führen, sofern diese nicht durch Massnahmen im Lagerdesign abgeführt werden können. Das ENSI ist bezüglich dieser Prozesse wie die Nagra der Ansicht, dass die lagerbedingten Einflüsse ausreichend bekannt sind und die Langzeitsicherheit eines Lagers trotz dieser Einflüsse gewährleistet

werden kann, weil die Lagerauslegung zurzeit noch genügend flexibel ist. Die Gesteine können aber bezüglich oben genannter Prozesse aus Sicht des ENSI nicht grundsätzlich als günstig bezeichnet werden, da der angestrebte hohe Tongehalt hier auch diverse Nachteile aufweist (hohe Dichtigkeit, geringe thermische Leitfähigkeit, grössere Auflockerungszonen, chemische Instabilität der Tonminerale bei hohem pH). Da das ENSI bezüglich lagerbedingter Einflüsse alle Gesteine in gleichem Masse ungünstiger einstuft, hat dies auf die weitere Evaluation keinen Einfluss.

- 2 Die helvetischen Mergel stellen komplex tektonisch verfaltete tonreiche Gesteine dar. Das Vorkommen eingeschuppter grösserer Fremdgesteinsschollen kann nicht ausgeschlossen werden. Eine detaillierte Erfassung der relevanten Parameter ist oft nur summarisch möglich. Das ENSI stuft daher die Charakterisierbarkeit der helvetischen Mergel um eine Stufe schlechter als die Nagra ein.
- 3 Die für die Beurteilung der Eignung der marinen Ablagerungen «Brauner Dogger» und Effinger Schichten wichtigen sandreichen Kalksteinlagen («Brauner Dogger») bzw. Kalkbankabfolgen (Effinger Schichten) sind mit seismischen Mitteln schwierig zu erfassen. Deren laterale Variabilität ist aufgrund des marinen Charakters beschränkt (im Vergleich zu den terrestrischen Ablagerungen von USM oder OSM). Hingegen haben auch Daten aus Bohrungen nur beschränkte laterale Aussagekraft. Das ENSI erachtet daher die Explorierbarkeit dieser beiden Wirtgesteine nur als bedingt günstig.
- 4 Im Unterschied zu den Wirtgesteinen mit Vorkommen im Alpenvorland sind die alpinen helvetischen Mergel durch die Ungewissheiten der Langzeitprognose besonders betroffen, da Änderungen in der alpinen Tektonik hier im besonderen Masse die Hebungs- und Dekompaktionsdynamik eines Standorts beeinflussen würden. Änderungen in der Klimaentwicklung hätten aufgrund des erhöhten Reliefs im alpinen Grossraum in besonderem Masse einen Einfluss auf die Erosion und die Ausbildung der mächtigen Dekompaktionszonen. Nur in seltenen Fällen sind die Vorkommen der Akkumulationen gross genug, dass man den Prozessen von Erosion und Dekompaktion durch ein Ausweichen in grössere Tiefe ausweichen kann. Das ENSI bewertet daher die Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen in den helvetischen Mergeln nur als bedingt günstig.
- 5 Für alle vorgeschlagenen tonreichen Wirtgesteine muss generell mit bedingt günstigen bautechnischen Eigenschaften gerechnet werden. Die bautechnischen Anforderungen sind grundsätzlich handhabbar, aber sie sind im Vergleich zu anderen Gesteinen (z. B. Kristallin) deutlich anspruchsvoller. Das ENSI bewertet die vier bevorzugten Wirtgesteine daher als bedingt günstig. Dies gilt momentan gleichermassen auch für die Gesteine des «Braunen Doggers» und der Effinger Schichten. Deren Bewertung kann möglicherweise durch die Erhebung bautechnischer Kennwerte wieder ändern. Für die helvetischen Mergel kann in Anspruch genommen werden, dass diese Gesteine deutlich stärker verfestigt sind. Ihre tektonische Beanspruchung und Heterogenität können jedoch bautechnische Nachteile mit sich bringen.

Die insgesamt strengere Bewertung durch das ENSI hat keinen Einfluss auf die von der Nagra getroffene Auswahl der Wirtgesteine. Das ENSI stellt bei den vorgeschlagenen bevorzugten Wirtgesteinen keine unüberwindbaren Schwierigkeiten (d. h. ungenügende Bewertungen) fest, weist aber auf die bestehenden Ungewissheiten hin, die insbesondere für den «Braunen Dogger» und die Effinger Schichten auf einem beschränkten Kenntnisstand beruhen. So sind durch die Nagra

insbesondere die Aspekte der bautechnischen Machbarkeit und der Gasentwicklung für diese Gesteine unter Verwendung des Opalinustons als Referenz betrachtet worden. Dabei wurde von der Nagra die Annahme getroffen, dass im «Braunen Dogger» und in den Effinger Schichten gleiche bis eher günstigere Verhältnisse anzutreffen sind. Diese Annahme ist in den weiteren Schritten zur Lagerrealisierung stufengerecht zu überprüfen bzw. die Lagerkonzepte entsprechend anzupassen (vgl. auch swisstopo 2010).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das ENSI mit der von der Nagra getroffenen Auswahl potenziell möglicher Wirtgesteine einverstanden ist. Aufgrund der von der Nagra formulierten Mindest- und verschärften Anforderungen, die seitens ENSI akzeptiert werden, kann die Anzahl potenziell möglicher Wirtgesteine auf vier bevorzugte Wirtgesteine reduziert werden. Unter Berücksichtigung der sicherheitsgerichteten verschärften Anforderungen werden die tertiären Gesteine des Molassebeckens (USM, OSM) und die Kristallingesteine als bevorzugte Wirtgesteine richtigerweise nicht weiter betrachtet.

Die verbleibenden vier bevorzugten Wirtgesteine werden im Folgenden detaillierter betrachtet und beurteilt:

Opalinuston

Der Opalinuston stellt eine ca. 175 Millionen Jahre alte marine Ablagerung dar, die unter Einbezug der unmittelbar überlagernden tonreichen Gesteinsschichten (Murchisonae-Schichten) eine Mächtigkeit von 90 bis 120 m erreicht. Der Ablagerungsraum der homogen tonreichen Opalinustonschicht umfasst die gesamte Nordschweiz und das Molassebecken und reicht weit in den süddeutschen Raum hinein (BGR 2007). Für das westliche Molassebecken konnte die Nagra einschränkend zeigen (NAB 09-29), dass kein Opalinuston in bautechnisch geeigneter Tiefe oder notwendiger lateraler Ausdehnung vorliegt.

Im Aufschluss wird generell zwischen tonigen und siltigen bis feinsandigen Lagen unterschieden, welche sich im mm- bis cm-Bereich abwechseln. Bei erhöhtem Auftreten siltig bis feinsandiger Lagen wird auch von «sandiger» Fazies gesprochen (im Gegensatz zur tonigen Fazies). Beide sind jedoch grundsätzlich als tonreiche Gesteine anzusehen (vgl. NTB 08-04, Fig. 4.4-1). Beide Fazies sind im Felslabor Mont Terri anstehend (Bossart und Thury 2008) und unterscheiden sich deutlich in ihren gesteinspezifischen (z. B. bautechnischen) Eigenschaften.

Der Opalinuston ist vom ENSI in seinem Gutachten zum Entsorgungsnachweis (HSK 35/99) für HAA-Lager im Detail beurteilt worden. Im Folgenden sollen nur diejenigen Aspekte angesprochen werden, die speziell für ein SMA-Lager zutreffen. Eine detaillierte Betrachtung der lagerinduzierten Einflüsse durch ein SMA-Lager findet sich in Kapitel 3.3. Ergänzend zu diesen Ausführungen ist festzuhalten, dass das Auffahren der grossen Lagerkavernen zur Ausbildung von ausgedehnten Auflockerungszonen führen wird. Das ENSI ist einverstanden, dass dies zu der von der Nagra vorgeschlagenen maximalen Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit von 800 m führt. Beim Auffahren der Lagerkavernen ist eine sicherheitsgerichtete, d. h. schonende Ausbruchstechnik zu wählen bzw. die Kavernenwände möglichst rasch nach Ausbruch mit geeigneten Stützmitteln zu sichern (vgl. Kapitel 3.4, Indikator 'Felsmechanische

Eigenschaften und Bedingungen'). Dazu sind wirtgesteinsspezifisch (sowohl für sandige als auch tonige Fazies) die entsprechenden bautechnischen Parameter zu erheben. Dazu ist in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht und standortspezifisch die Trennflächendichte und die Gebirgsspannungen zu ermitteln.

Das ENSI ist mit der Wahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein durch die Nagra einverstanden.

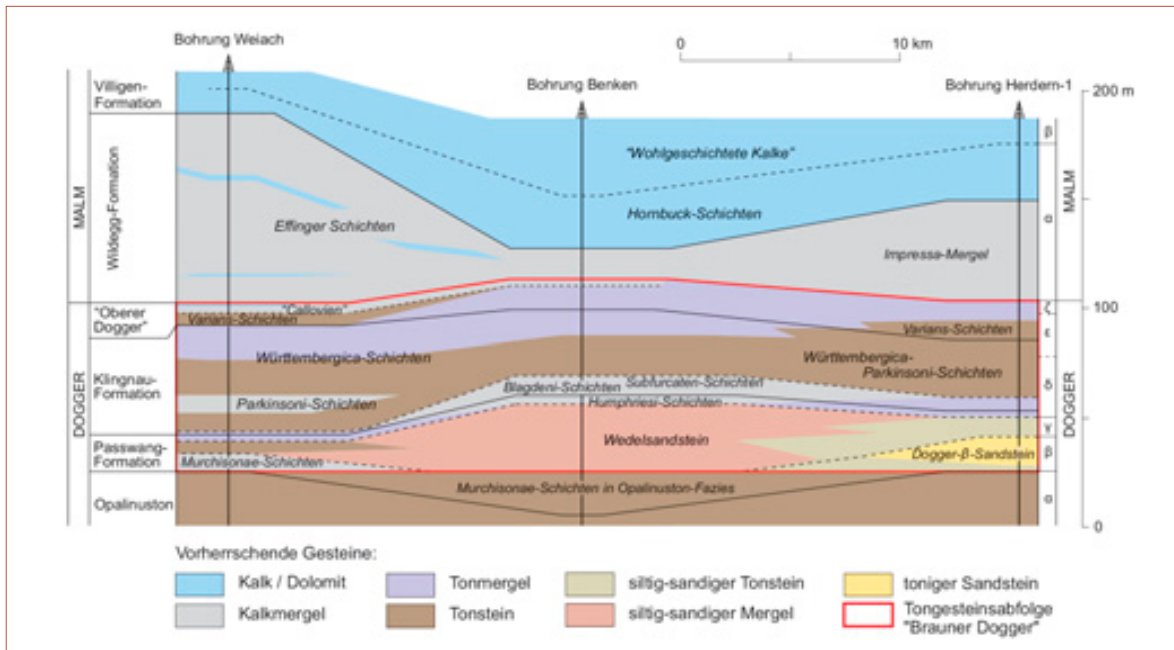
«Brauner Dogger»

Stratigraphisch nach oben an den Opalinuston anschliessend findet sich bis zur Basis des Malms (Ablagerungszeitraum ca. 175 – 160 Millionen Jahre) eine Abfolge von Ton-Mergelgesteinen mit Abschnitten von Silt- und Sandsteinen, sandigen Kalksteinen und Eisenoolithen (wichtige Leithorizonte, NTB 08-04, S. 277). Die Gesteinsabfolge spiegelt eine zyklische, gemischte siliziklastisch-karbonatische Sedimentation in einem Epikontinentalmeer (untiefe Beckenablagerungen in vorwiegend toniger Schwäbischer Fazies) wider, die den Karbonatplattform-Ablagerungen der kalkigen keltischen Fazies des Schweizer Juras westlich der Aare gegenübersteht (Bläsi 1987; Nagra 1994; NTB 08-04, Fig. 4.3-11). Gemäss Lusser (1980) ist der Dogger oberhalb des Opalinustons im Gebiet des Falten- und Tafeljuras westlich der Aare, d. h. bis Klingnau, sehr heterogen und durch diverse Kalkbänke gekennzeichnet. Zwischen den beiden Faziesräumen besteht eine Übergangsfazies, die eine klare Abgrenzung zusätzlich erschwert.

Die Abfolge tonreicher Gesteine des «Braunen Doggers» ist im Gebiet um das Zürcher Weinland und Nördlich Lägeren aus drei Bohrungen bekannt (Figur 5.2-2). Die ausgeprägte vertikale und laterale Heterogenität durch kleinräumige Faziesverzahnung macht eine flächendeckende untertägige Charakterisierung des «Braunen Doggers» aus Sicht des ENSI anspruchsvoll. Eine Korrelation oder Extrapolation der einzelnen Schichtglieder über grössere Distanzen ist auf der Basis mehrerer eisenoolithischer Horizonte möglich. Zwischen diesen Horizonten können jedoch merkliche Fazieswechsel auftreten. So sind beispielsweise die dem Dogger γ entsprechenden Schichten in der Bohrung Weiach sehr geringmächtig (1.5 m), in der Bohrung Benken aber als 32 m mächtige Wedelsandstein-Formation entwickelt.

Unsicher sind die Verhältnisse gegen Westen im Gebiet Nördlich Lägeren (Figur 5.2-2). Zwischen den letzten Oberflächenaufschlüssen bei Klingnau und der lithologischen Abfolge der Bohrung Weiach existieren nur weiter im Norden (auf deutscher Seite) bzw. im Süden (an der Lägeren) beschränkte Informationen zur lateralen Faziesentwicklung. Das Auslaufen insbesondere der kalkigen Lagen gegen Osten ist ungewiss, in der Bohrung Weiach fehlen sie.

Für die Beurteilung der hydraulischen Durchlässigkeit kann sich die Nagra einzig auf die hydraulischen Testergebnisse der Bohrung Benken abstützen, wo die gesamte Gesteinsabfolge des «Braunen Doggers» lückenlos getestet wurde. Hydraulische Daten aus dem «Braunen Dogger» der Bohrungen Weiach und Herdern sind hingegen nur aus den untersten Abschnitten vorhanden. Wegen der unterschiedlichen Mächtigkeiten und Faziesausbildungen (Figur 5.2-2) sind die aus der Bohrung Benken vorhandenen Werte zur hydraulischen Durchlässigkeit nur beschränkt auf andere Bohrungen übertragbar. Aufgrund unabhängiger Evidenzen in der Bohrung Benken (diffusives



Figur 5.2-2: Vergleich und Korrelation der Tongesteine des «Braunen Doggers» aus den Bohrungen Weiach, Benken und Herdern (NTB 08-04, Fig. 4.3-8). Die Abfolge wird hier schematisch dargestellt, wobei der Übergang des Opalinustons (inklusive Murchisonae-Schichten in Opalinuston-Fazies) als Referenzhorizont verwendet wird (untere rote Linie).

Verteilungsprofil natürlicher Tracerstoffe, NTB 08-04, Fig. 4.3-4) hält die Nagra die Erfüllung der verschärften Anforderungen an den Indikator 'Hydraulische Durchlässigkeit' für möglich (NTB 08-03, S. 164). Das ENSI ist mit dieser Einschätzung grundsätzlich einverstanden. Offene Fragen ergeben sich aus der geringen Datenbasis dieser Gesteinsabfolge zur Durchlässigkeit der Wedelsandstein-Formation, deren Kalksandlagen möglicherweise als Kluftwasserleiter wirksam sein können (vgl. auch swisstopo 2010). In der Bohrung Benken wurden zwar keine Klüfte angetroffen, eine weitständige vertikale Klüftung ist durch vertikale Bohrungen aber kaum erfassbar.

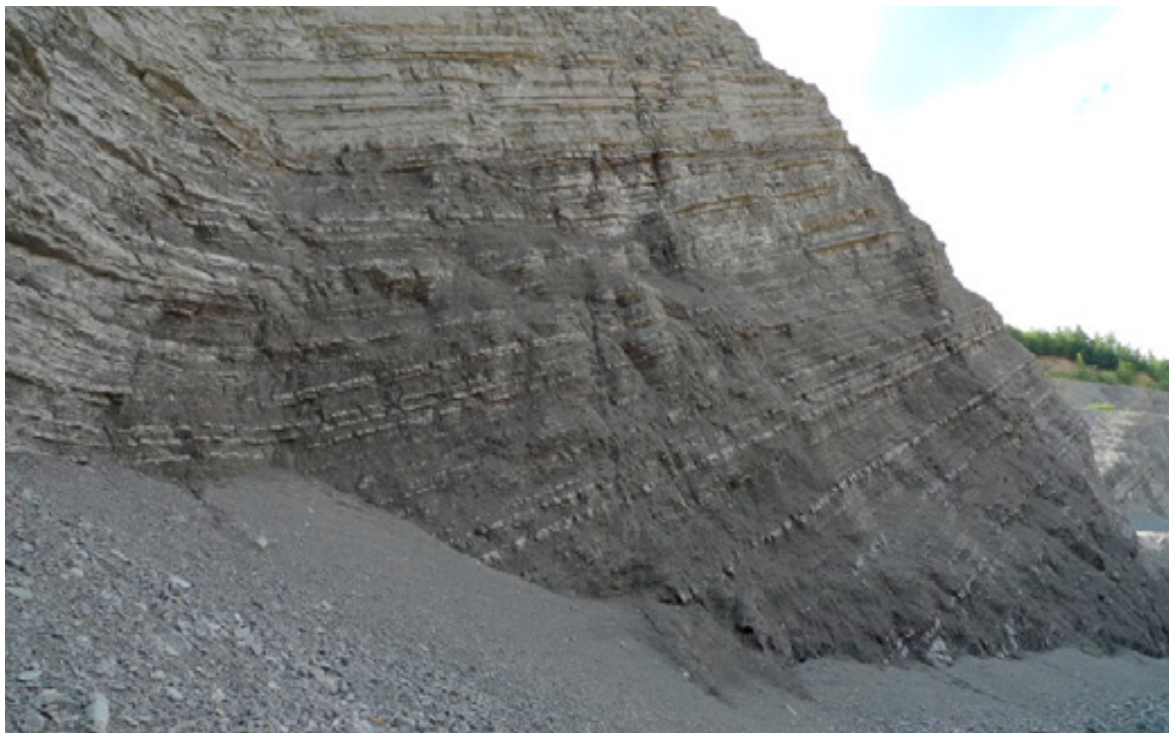
Das ENSI erachtet daher den «Braunen Dogger» als anspruchsvoll bezüglich Prognostizierbarkeit der einzelnen Schichtglieder und deren Mächtigkeit. Die interne Heterogenität stellt an eine standortspezifische Sicherheitsanalyse grosse Anforderungen. Die effektiv vorhandene Geologie kann in ein realistisches standortspezifisches Modell eingearbeitet werden und zu diesem Modell können realistische Ungewissheiten abgeschätzt werden. Dass dieses Gestein als potenzielles Wirtgestein für ein SMA-Lager vorgeschlagen wird, ist trotz der oben genannten Bedenken aus Sicht des ENSI richtig. Durch die Einbettung in die darunter und darüber liegenden tonigen oder tonreichen Formationen von Opalinuston und Effinger Schichten erfüllt der «Braune Dogger» die Anforderungen an die Mächtigkeit. Nachteilig ist zurzeit die Tatsache, dass zur bautechnischen Eignung nur Analogien zum Opalinuston vorliegen. Hingegen sind weder spezifische Daten noch felsmechanische Konzeptmodelle vorhanden, welche den Einfluss von Heterogenitäten und Trennflächen berücksichtigen. Ferner liegen noch keine Daten zu Gaseintrittsdrücken in die Gesteine des «Braunen Doggers» vor.

Mit Blick auf die Gesamtbewertung unterstützt das ENSI die Wahl des «Braunen Doggers» als bevorzugtes Wirtgestein für SMA-Lager.

Effinger Schichten

Die Nagra fasst unter dieser Bezeichnung die marinen mergelig-kalkigen Gesteinsabfolgen der «Effingen-Member» und «Gerstenhübel Beds» der Wildegg-Formation zusammen, die vom mittleren bis späten Oxfordien abgelagert wurden (vor ca. 157 bis 155 Millionen Jahren (Gygi 2000, 2003; Allenbach 2001; NTB 08-04, Fig. 4.3-17). Hydraulische Tests aus Bohrungen (Benken, Oftringen, Küttigen und Gösigen) und Befunde aus Tunnelbauwerken im Faltenjura zeigen, dass die mergelig-tonigen Bereiche dieser Gesteinsabfolge in grösserer Tiefe (> 200 m) sehr gering durchlässig sind und die verschärften Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit erfüllen (NAB 08-15; NTB 08-04). In Kalkbänken und Kalkbankabfolgen tritt wegen des Sprödverhaltens bei tektonischer Beanspruchung oft eine zur Schichtung senkrecht stehende Klüftung auf, was die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen kann. So wurden die höchsten Wasserwegsamkeiten in den kalkreichen «Gerstenhübel Beds» beobachtet (Transmissivitäten von $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$), die an Scher- und Klüftzonen gebunden war (NAB 08-12).

Die wechsellagernden Mergel- und Kalkbänke (Figur 5.2-3) lassen sich aufgrund der marinen Bildung der Gesteine lateral zumindest über etliche hundert Meter verfolgen, was etwa der Dimension eines SMA-Lagers entspricht (NTB 08-05, S. A2-8). Die vorhandenen Konzentrationen von Kalkbänken darin (darunter am prominentesten die oben genannten «Gerstenhübel Beds») sind in ihrer Ausdehnung nur grob bekannt. Der Grad der Klüftung der Kalkbänke muss zurzeit auf der Basis von vier Bohrungen (Pfaffnau, Oftringen, Schafisheim, Küttigen) abgeleitet werden. Östlich der Lägern sind die Effinger Schichten zu geringmächtig, als dass sie als Wirtgestein vorgeschlagen werden können (NTB 08-03, Fig. 5.2-13). Westlich des Aaretals zwischen Brugg und Koblenz werden die Effinger Schichten gegen oben und unten durch regionale Aquifere eingefasst, d. h. sie besitzen keine geeigneten Rahmengesteine.



Figur 5.2-3: Wechsellagerung von Mergel- und Kalkbänken in den Effinger Schichten des Steinbruchs Jakobsberg (AG). Photo: Prof. Simon Löw (ETH Zürich).

Im westlichen Molassebecken (vgl. Figur 4.1-1) ist auf nicht publizierten seismischen Profilen der Erdölindustrie ein deutlich stärkeres Auftreten von tektonischen Elementen im mesozoischen Untergrund feststellbar. Das ENSI hat die diesbezüglichen Daten überprüft und ist mit der Einschätzung der Nagra einverstanden, dass die Wirtgesteine Opalinuston und Effinger Schichten aufgrund der tektonischen Beanspruchung im westlichen Molassebecken (vgl. Figur 4.1-1) nicht weiter betrachtet werden.

Das ENSI beurteilt die Effinger Schichten auf der Basis oben genannter hydraulischer Durchlässigkeitswerte und Transmissivitäten als geeignet. Die vorliegenden Befunde aus der Bohrung Oftringen zeigen für die Effinger Schichten keine Verkarstungsanzeichen in Tiefen > 200 m, d. h. es kann zurzeit davon ausgegangen werden, dass die Verkarstung der Effinger Schichten erst einsetzt, wenn die Effinger Schichten innerhalb der Dekompaktionszone liegen (vgl. Mindestanforderungen an den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion'). Die Mächtigkeit der Effinger Schichten (inklusive darunter liegender geringmächtiger Birmenstorfer Schichten) beträgt entlang des Jura-Südfusses bis ca. Baden 200 m (NTB 08-04, Fig. 5.2-7) und übertrifft damit die Mindestanforderungen für Schritt 4 deutlich. Die Anforderungen an die Tiefenlage der Gesteine bezüglich Erosion und bautechnischer Machbarkeit sind im Bereich der östlichen Subjurrassischen Zone erfüllt. Allerdings muss in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht das spezifische Wissen zu den bautechnischen Parametern (z. B. NAB 08-25) vertieft werden. Sowohl Effinger Schichten als auch Opalinuston sind gegen Westen und Süden im Molassebecken zu tief, um dort als Wirtgesteine in Frage zu kommen. Bezüglich des Abbaus der Effinger Schichten zur Zementherstellung bestehen für die tiefen Vorkommen zurzeit keine Nutzungskonflikte. Die Gesteine sind aus Sicht des ENSI genügend konsolidiert, dass die bautechnische Machbarkeit gegeben ist. Die laterale Ausdehnung der Schichten ist grossräumig gegeben, die laterale Variabilität der Gesteine kann unter Verweis auf die Grösse eines SMA-Lagers und der räumlichen Flexibilität des Lagerkonzepts akzeptiert werden.

In der Gesamtbetrachtung ist das ENSI mit der Wahl der Effinger Schichten als bevorzugtes Wirtgestein durch die Nagra einverstanden.

Mergel-Formationen des Helvetikums

Die Mergel-Formationen des Helvetikums (insbesondere die Palfris-Formation, die Vitznau-Mergel, die Amden-Formation sowie verschiedene tertiäre Mergel) umfassen mehrere tonreiche Abfolgen in der marinen Stratigraphie des Helvetikums, die während der alpinen Gebirgsbildung bevorzugt als tektonische Bewegungsbahnen gedient haben. Dabei haben sich teilweise basale Mergellagen von Deckeneinheiten mit ebenso tonreichen tertiären Mergeln am oberen Ende der Deckenstratigraphie vermischt. Aufgrund der tektonischen Beanspruchung sind die Mächtigkeiten der mergeligen Abfolgen sowohl ausgedünnt als auch verdickt worden. Zudem sind teilweise Fremdgesteinseinschlüsse in die Mergel eingespiesst worden, was nur mit grossem Aufwand eine räumliche Prognose der Platzverhältnisse zulässt.

An die Mergel-Formationen des Helvetikums werden von der Nagra bezüglich einzelner Indikatoren gesonderte Anforderungen gestellt. So sind die Anforderungen an die räumliche Ausdehnung nicht an eine stratigraphische Mächtigkeit gebunden, sondern an die durch die Tektonik

entstandene räumliche Geometrie der Mergelgesteine. Lagerprojekte können in den helvetischen Mergeln bei genügender vertikaler Ausdehnung abweichend von den in den anderen Wirtgesteinen vorgeschlagenen Lagerauslegungen (NTB 08-03, S. 20) auch doppelstöckig arrangiert werden (NTB 08-04, S. 177). Der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' ist nicht anwendbar (NTB 08-03, S. 219), da die Mergelakkumulation selbst auf einer diffus gestörten Zone beruht. Damit sind auch entsprechende gesteinspezifische Parameter und präzise mineralogische und strukturelle Beschreibungen nur summarisch (d. h. als Mittelwert und Bandbreiten) erfassbar. Das ENSI beurteilt das modifizierte Vorgehen der Nagra als nachvollziehbar und plausibel.

Die Erfahrungen am Oberbauenstock und am Wellenberg haben gezeigt, dass die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins und an die Transmissivität vorhandener Kluftwege in den helvetischen Mergeln trotz der vorhandenen Inhomogenitäten erfüllt wird (NTB 08-04, S. 177). Das Potenzial zur Bildung neuer Wegsamkeiten muss aufgrund von kalkigen Fremdeinschlüssen (und der Möglichkeit, solche mittels Extrapolation zu erfassen) standortspezifisch betrachtet werden. Ebenso sind Mächtigkeit und Tiefenlage im Rahmen der standortspezifischen Beurteilung zu betrachten. Bezüglich Rohstoffen sind in den helvetischen Mergeln wenige Gasvorkommen dokumentiert worden (Greber et al. 2004), wirklich nutzbare Gasvorkommen sind jedoch aufgrund der geringen Porosität und Durchlässigkeit der Gesteine kaum zu erwarten. Die Gesteinsfestigkeiten werden vom ENSI aufgrund diverser Tunnelbauten (z. B. Seelisbergtunnel) in diesen Gesteinen als bautechnisch machbar beurteilt.

Die Erfassung der geometrischen Verhältnisse und damit der lateralen Ausdehnung der geeigneten Gesteinskörper wird vom ENSI als anspruchsvoll, aber machbar angesehen. Die Charakterisier- und Explorierbarkeit des Gesteins ist aufgrund der in den Alpen vorhandenen komplexen Tektonik und den häufigen quartären Lockergesteinbedeckungen eingeschränkt. Hingegen bietet die ausgeprägte Topographie ein besseres Erfassen von 3D-Strukturen und eine gute Kartierbarkeit. Die Erkundung der Mergelkörper muss sich neben Oberflächenaufschlüssen vor allem auf Sondierbohrungen, später auch auf Sondierstollen abstützen. Wie am Wellenberg standortspezifisch durchgeführt (NTB 94-06), wäre die Erfassung der geologischen Situation, inklusive bautechnischer Parameter, in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht weiter zu führen.

Das ENSI ist mit der Wahl der helvetischen Mergel als bevorzugtes Wirtgestein durch die Nagra einverstanden. Die Auswahl der Standorte durch die Nagra, die zur Fokussierung auf den Wellenberg geführt hat, wird in Kapitel 6.2.4 beurteilt.

5.3 Wirtgesteine für HAA-Lager

Angaben der Nagra

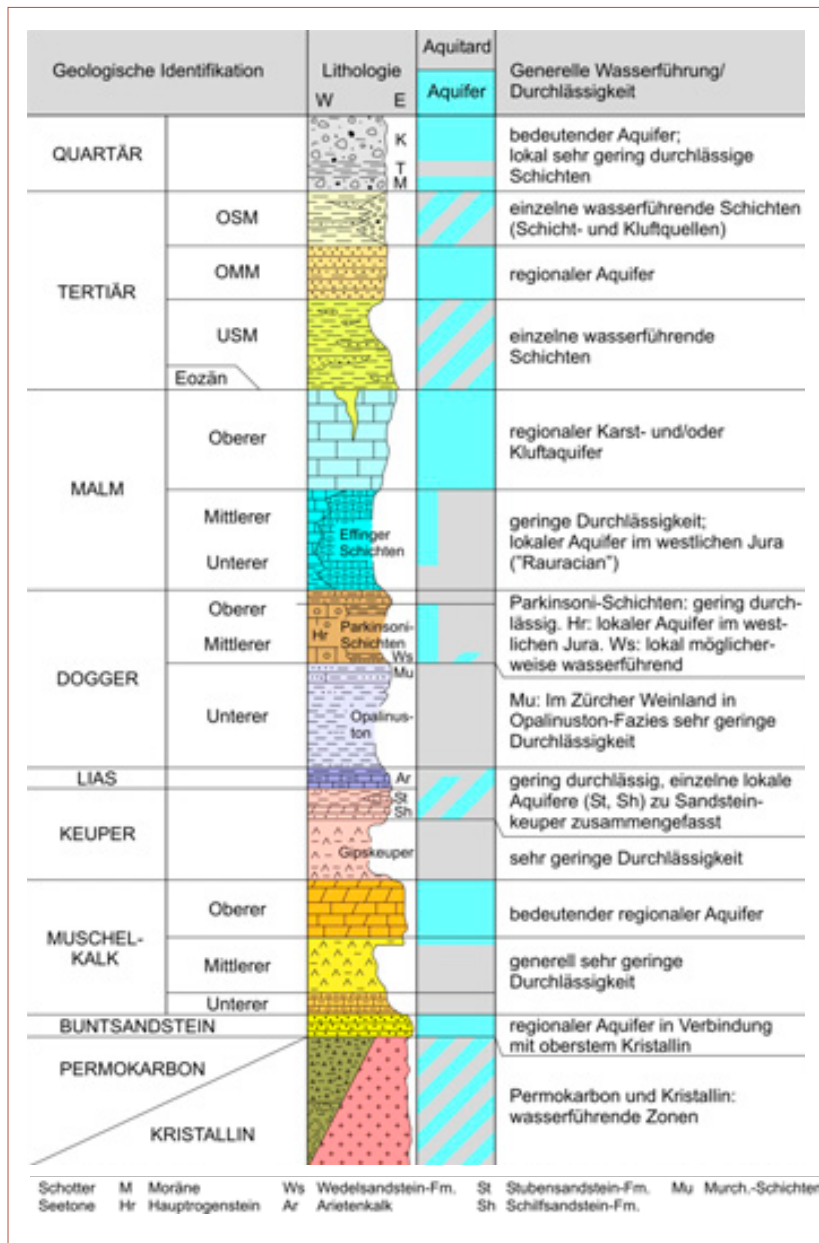
Ausgehend von den für ein HAA-Lager als geeignet identifizierten geologisch-tektonischen Grossräumen (gesamtes Molassebecken, östliche Subjurassische Zone, östlicher Tafeljura) teilt die Nagra ihre Evaluation potenziell möglicher Wirtgesteine in drei Teilschritte auf (NTB 08-03, S. 113, vgl. Vorgehen bei den SMA-Wirtgesteinen):

1. In einem ersten Teilschritt werden potenziell mögliche Wirtgesteine aufgrund der für die Sicherheit zentralen Merkmale der Barrierenwirkung und räumlichen Ausdehnung des Wirtgesteins und den hierzu definierten Mindestanforderungen bezüglich der Indikatoren 'Mächtigkeit' (≥ 100 m), 'Hydraulische Durchlässigkeit' ($K_v \leq 10^{-10}$ m/s) bzw. 'Tongehalt' (≥ 25 %) unter Berücksichtigung des damit verknüpften Indikators 'Selbstabdichtungsvermögen' identifiziert. Alle Gesteine, die diese Mindestanforderungen nicht erfüllen, scheidet aus.
2. Anschliessend wird bei jeder verbleibenden Gesteinseinheit geprüft, ob die Mindestanforderungen bezüglich weiterer Indikatoren erfüllt sind, um die im ersten Teilschritt identifizierten Gesteinseinheiten weiter einzugrenzen. Es sind dies die Indikatoren 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade' ($T \leq 10^{-9}$ m²/s), 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)', 'Laterale Ausdehnung' (≥ 4 km² bei einer nutzbaren Mindestbreite von 1.5 km), 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion' (≥ 400 m u. T.), 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' (≤ 900 m für Sedimentgesteine bzw. $\leq 1'200$ m u. T. für Kristallingesteine) sowie 'Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins'.
3. Im letzten Teilschritt kommen für die Evaluation bevorzugter Wirtgesteine verschärfte Anforderungen bezüglich der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' ($K_h \leq 10^{-10}$ m/s), 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' zur Anwendung. Das Ergebnis führt zur Auswahl bevorzugter Wirtgesteine.

Für Teilschritt 1 unterteilt die Nagra die in den geologisch-tektonischen Grossräumen für HAA-Lager vorkommenden Gesteine in zwei Gruppen auf (Sedimentgesteine und Kristallingesteine). Als Grundlage für die Identifikation potenziell geeigneter Sedimentgesteine dient eine systematische Analyse des sedimentären Gesteinsinventars der Schweiz, welches in Form von 27 repräsentativen lithologisch-stratigraphischen Sammelprofilen dokumentiert ist (NAB 07-35). Vier Sammelprofile liegen dabei in den für HAA-Lager geeigneten geologisch-tektonischen Grossräumen (Profile 3 bis 6, NAB 07-35) und liefern die Grundlagen zur Identifikation geeigneter Sedimentgesteine für HAA.

Da Kristallingesteine in geeigneter Tiefenlage nur im Grossraum Tafeljura vorkommen, beschränkt sich für diese Gesteine die Betrachtung auf diesen einzigen Grossraum.

Figur 5.3-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick über die in den geologisch-tektonischen Grossräumen für HAA-Lager vorkommenden Gesteinsformationen.



Figur 5.3-1:
Zusammenfassendes litho-
stratigraphisches Profil der
in den geologisch-tektoni-
schen Grossräumen für
HAA-Lager vorkommenden
Gesteinsformationen
(aus NTB 02-03).

In NTB 08-04 legt die Nagra die geologischen Beurteilungsgrundlagen für diese Gesteinsformationen dar und charakterisiert die für HAA-Lager in Betracht gezogenen Wirtgesteine bezüglich der im SGT vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien. Die detaillierten Ausführungen der Nagra zu den evaluierten Gesteinen sind im vorangehenden Kapitel 5.2 zusammengefasst.

Die Nagra fasst anschliessend ihre Evaluationsergebnisse in Tabellen für die Erfüllung der Mindestanforderungen und für die Erfüllung der verschärften Anforderungen zusammen (NTB 08-03, Tab. 4.3-1 und 4.3-2). Abschliessend legt die Nagra eine Gesamtbewertung des bevorzugten Wirtgesteins für HAA-Lager in Form einer Bewertungsmatrix auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppe vor (NTB 08-03, Tab. C.3-2).

Als Ergebnis des ersten Teilschritts identifiziert die Nagra für HAA-Lager zehn potenziell mögliche Wirtgesteine (NTB 08-03, S. 134), von denen im zweiten Teilschritt sechs die Mindestanforderungen erfüllen (im Folgenden fett markiert):

- Opalinuston
- Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' mit ihren Rahmengesteinen
- Effinger Schichten
- Untere Süsswassermolasse USM (Marnes Bariolées s.str.)
- Obere Süsswassermolasse OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)
- Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)
- Kalksteinformationen verschiedenen Alters
- Sandsteinformationen verschiedenen Alters
- Evaporitabfolgen der Trias
- Quartäre Seeablagerungen (Pleistozän)

Kalkstein- und Sandsteinformationen erfüllen die gestellten Mindestanforderungen an das Wirtgestein bezüglich hydraulischer Barrierenwirkung (Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' und 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade') und wegen des Verkarstungspotenzials nicht und werden deshalb von der Nagra nicht weiter verfolgt (NTB 08-04, S. 134).

Die Evaporitabfolgen der Trias scheiden aufgrund der zu geringen räumlichen Ausdehnung (Mächtigkeit und laterale Ausdehnung), aufgrund des Rohstoffvorkommens innerhalb des Wirtgesteins (Salz) sowie der zu grossen Tiefenlage von > 900 m (Subjurassische Zone, Molassebecken) aus. Hinzu kommt, dass aus bautechnischer Sicht die Evaporitabfolgen der Trias mit ihren Zwischenlagen von Tongesteinen wegen komplexer Ton-Sulfat-Quellprozesse und der damit verbundenen Volumenvergrösserung und Gebirgsdrücke seitens der Nagra als problematisch bewertet werden.

Quartäre Seeablagerungen (Pleistozän) erfüllen wegen ihrer zu geringen Gesteinsfestigkeiten und geringen Kohäsion als Lockergesteine die Mindestanforderung an die bautechnische Machbarkeit nicht und werden deshalb ausgeschlossen.

Im dritten Teilschritt scheiden die Wirtgesteinsoptionen 'Brauner Dogger', Effinger Schichten, USM, OSM und Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke) aus, da diese Gesteine eine oder mehrere verschärfte Anforderungen nicht erfüllen (siehe Tabelle 5.3-1). Es sind dies die Anforderungen zu den Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit', die von den evaluierten Molassegesteinen (USM und OSM) mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt werden. Beim 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten geht die Nagra aufgrund der heutigen Datenlage davon aus, dass bei günstiger Anordnung der Lagerkammern zwar die verschärfte Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit erfüllt sind, sofern den sandkalkigen Einschaltungen im 'Braunen Dogger' und den Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten mit den Lagerkammern ausgewichen werden kann. Die verschärfte Anforderungen bezüglich Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' können durch diese Gesteine jedoch nicht erfüllt werden (NTB 08-03, S. 136). Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz, das bei den Kristallingesteinen als einzige Option verbleibt, ist im Allgemeinen stark tektonisiert und in eher kleinere, wenig deformierte Gesteinsblöcke gegliedert. Da diese Blöcke schlecht explorierbar und aufgrund kleinerer Störungen und Klüften in ihrer Barrierenwirkung beeinträchtigt sein können, erfüllt das

Figur 5.3-1: Wahl des bevorzugten Wirtgesteins für HAA-Lager aufgrund der verschärften Anforderungen (NTB 08-03, Tab. 4.3-2)

Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren		
		Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit
Opalinuston	östlicher Tafeljura / östliche Subjurassische Zone			
Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'	östlicher Tafeljura		●	
Effinger Schichten	östlicher Tafeljura / östliche Subjurassische Zone		●	
USM (Marnes Bariolées s. str.)	westliches Molassebecken	●	●	●
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken	●	●	●
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz			●

Legende

bevorzugtes Wirtgestein
 potenziell mögliches Wirtgestein
 verschärfte Anforderung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt

kristalline Grundgebirge die verschärften Anforderungen bezüglich des Indikators 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' nicht.

Zusammenfassend kommt die Nagra aufgrund der durchgeführten Evaluationsschritte zum Schluss, dass nur der Opalinuston alle verschärften Anforderungen erfüllt und deshalb als bevorzugtes Wirtgestein für HAA-Lager vorgeschlagen wird. Die Gesamtbewertung des Opalinustons, die gemäss SGT in einer Bewertungsmatrix alle 13 Kriterien und verwendeten Indikatoren umfasst, fällt für alle vier Kriteriengruppen günstig bis sehr günstig aus (NTB 08-03, Tab. C.3-2).

Beurteilung des ENSI

Bei der Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine für HAA-Lager folgt die Nagra den Vorgaben des Schritts 4 Etappe 1 SGT und den darin definierten sicherheitstechnischen Kriterien sowie den für die Wirtgesteinevaluation relevanten Indikatoren (BFE 2008, S. 60). Zusätzlich bewertet die Nagra bereits in diesem Schritt 4 auch die Kriterien 'Nutzungskonflikte' und 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen', wogegen das ENSI keine Einwände hat. Für den Evaluationsprozess gliedert die Nagra ihr Vorgehen in drei Teilschritte, welche über die Prüfstufen *Erfüllung von Mindestanforderungen*, *Erfüllung verschärfter Anforderungen* und *Bewertung der potenziell möglichen Wirtgesteine zur Wahl bevorzugter Wirtgesteine* für HAA-Lager führt. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als nachvollziehbar, sicherheitsorientiert und sachplankonform.

Beurteilung der Erfüllung der Mindestanforderungen (erster und zweiter Teilschritt)

Für die im geologisch-tektonischen Grossraum für HAA-Lager bis in eine Tiefe von 900 m (Sedimentgesteine) bzw. 1'200 m (Kristallingesteine) vorkommenden Gesteine identifiziert die Nagra aufgrund einer systematischen Analyse aller vorliegenden Sedimentgesteine und einer Bestandaufnahme der Verhältnisse im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz sechs poten-

ziell mögliche Wirtgesteine bzw. einschlusswirksame Gebirgsbereiche, welche die im ersten und zweiten Teilschritt geprüften Mindestanforderungen erfüllen. Die Evaluation dieser potenziell möglichen Wirtgesteine Opalinuston, «Brauner Dogger», Effinger Schichten, USM, OSM und wenig deformierte Blöcke von Kristallingesteinen und die Zurückstellung von vier Gesteinen ist für das ENSI nachvollziehbar.

Der Ausschluss reiner Kalk- und Sandsteine ist nach Ansicht des ENSI gerechtfertigt, da die hydraulische Barrierenwirkung dieser Gesteine aufgrund ihres Sprödverhaltens und der damit verknüpften Klüftigkeit nicht gegeben ist. Die Evaporitabfolgen der Trias können zwar die erforderliche geringe Durchlässigkeit aufweisen, scheiden aber aufgrund der zu geringen Mächtigkeit bzw. zu starken Mächtigkeitsschwankungen (syn- und post-triassische Tektonik), des Nutzungskonflikts (Salz), der Problematik der Lösungsvorgänge (Verkarstung) und der Vorbehalte bezüglich Langzeitprognostizierbarkeit solcher Prozesse aus. Quartäre Seeablagerungen werden wegen ihrer zu geringen Gesteinsfestigkeit (fehlende Kohäsion) und der zu geringen lateralen Ausdehnung zu Recht nicht berücksichtigt. In Ergänzung zur Einschätzung der Nagra erfüllen nach Ansicht des ENSI die quartären Seeablagerungen auch die Mindestanforderungen an die erforderliche Mächtigkeit und Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Erosion mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht.

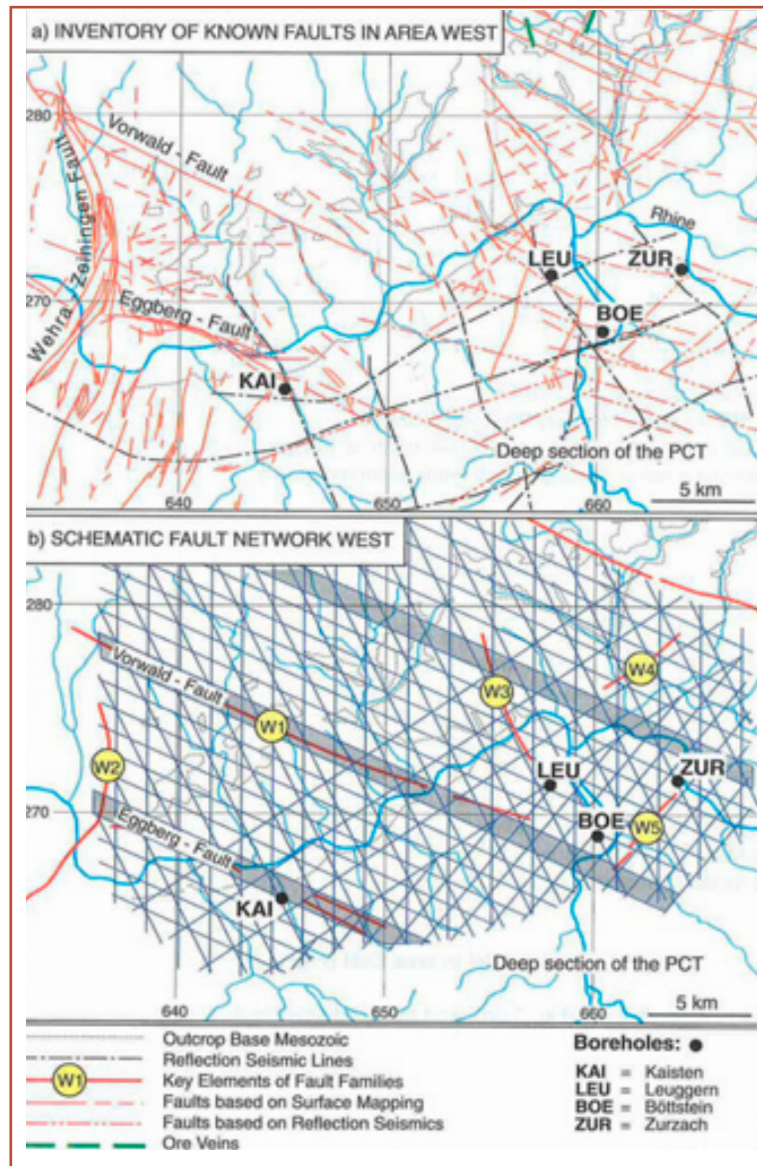
Bezüglich der Beurteilung der Kristallingesteine der Nordschweiz ist das ENSI der Ansicht, dass die beschränkte Betrachtung von *wenig deformierten Blöcken von Kristallingesteinen* in Anbetracht der für ein HAA-Lager erforderlichen lateralen Ausdehnung (Mindestanforderung $\geq 4 \text{ km}^2$) der Evaluation geeigneter geologischer Standortgebiete nicht gerecht wird. In Ergänzung zur Nagra beurteilt das ENSI deshalb neben den kleinräumigen Blöcken auch die grossräumigen tektonischen Verhältnisse im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz (Figur 5.3-2), wie sie sich aus den Befunden der Nagra-Tiefbohrungen und aus den Kartierungen im Südschwarzwald ableiten lassen. Aufgrund dieser Daten kommt das ENSI zum Schluss, dass wegen der starken tektonischen Zergliederung des Grundgebirges in der Nordschweiz (Grabenrand des mehrere Kilometer tiefen Permokarbondrogens) wenig deformierte Blöcke in der erforderlichen Grösse mit den erforderlichen grossräumigen geringen hydraulischen Durchlässigkeiten kaum vorhanden sein dürften. Da die Wasserführung im Kristallin der Nordschweiz komplex verteilt ist und neben strukturgeologischen (Klüfte, Störungen) auch stark von lithologischen Aspekten (Verteilung von so genannten Härtlingen wie Ganggesteinen, quarzitischen Zonen, Mineraladern und Mineralerzgängen, etc.) bestimmt wird, beurteilt das ENSI die Erfüllung der Mindestanforderung an die erforderliche laterale Ausdehnung geringdurchlässiger Blöcke im Kristallin als fraglich (siehe ausführliche Begründung in früheren HSK-Stellungnahmen (HSK 23/73; HSK 35/108).

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass das Gesamtergebnis dieser Teilschritte, mit Ausnahme der abweichenden Ansicht des ENSI zum Kristallin, insgesamt nachvollziehbar ist.

Beurteilung der Erfüllung der verschärften Anforderungen (dritter Teilschritt)

Für die Auswahl bevorzugter Wirtgesteine wendet die Nagra im dritten Teilschritt verschärfte Anforderungen für die drei Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit' ($K_h \leq 10^{-10} \text{ m/s}$), 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' an.

Figur 5.3-2: Vergleich (a) des Inventars an beobachteten tektonischen Störungen im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz mit (b) dem konzeptuell erstellten schematischen Störungsnetz des Grundgebirges (NTB 93-01). Das schematische Störungsmuster ist zu engständig, um ein HAA-Lager mit einer Fläche von $\geq 4 \text{ km}^2$ zu platzieren.











Mit den verschärften Anforderungen stellt die Nagra sicher, dass keine Wirtgesteine vorgeschlagen werden, deren Barrierenwirkung durch bevorzugte Fließpfade mit ungünstigen Radionuklid-Rückhalteigenschaften beeinträchtigt sein könnte und die schwierig zu charakterisieren und zu explorieren sind. Dieses Vorgehen führt zu Wirtgesteinen, deren Aufbau möglichst homogen ist und die keine präferenziellen Fließpfade mit reduzierten Barriereigenschaften aufweisen. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als sicherheitsorientiert.

Mit der Anwendung der verschärften Anforderungen reduziert sich die Auswahl bevorzugter Wirtgesteine auf ein einziges Gestein, den Opalinuston. Die restlichen fünf Wirtgesteine werden wegen Nicht-Erfüllung der verschärften Anforderungen zurückgestellt. Das ENSI erläutert im Folgenden die Überprüfung des dritten Teilschrittes für jedes der betrachteten Wirtgesteine im Detail, wobei sich die Prüfung an den drei oben genannten verschärften Anforderungen orientiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3-2 zusammengestellt.

Tabelle 5.3-2: Zusammenstellung der Beurteilung des ENSI und der Nagra der acht potenziell möglichen Wirtgesteine für das HAA-Lager. Ergänzende Kommentare sind einzeln nummeriert und unter der Tabelle erläutert. Die Nagra hat wirtgesteinspezifisch auf eine weitere Beurteilung teilweise verzichtet, wenn mindestens für einen Indikator die Mindestanforderungen nicht erfüllt wurden.

Gestein	Mindestanforderungen								Verschärfte Anforderungen			
	Hydraulische Durchlässigkeit	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	Mächtigkeit	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Laterale Ausdehnung	Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit
Trias-Evaporite (östl. TJ, östl. SJZ)			1	gK		gK		zT	zT			
Opalinuston (östl. TJ, östl. SJZ)				2								
«Brauner Dogger» (östl. TJ)				2								3
Effinger Schichten (östl. TJ, östl. SJZ)												3
USM (Marnes Bariolées s. str.)	2	2										
OSM (Basiszone, Bodensee-Schüttung)	2	2										
Quartäre Seeablagerungen					4				zT			
Kristallingesteine (Nordschweiz)									5, zT	5	5	

	Anforderungen gemäss Nagra (NTB 08-03, Tab. 4.3-1 bzw. 4.3-2) und ENSI nicht erfüllt		Anforderungen gemäss ENSI nicht erfüllt.	TJ	Tafeljura
	Potenziell mögliches Wirtgestein gemäss Nagra (erfüllt Mindestanforderungen)		bevorzugtes Wirtgestein gemäss Nagra (erfüllt verschärfte Anforderungen)	SJZ	Subjurasische Zone
	zum Teil nicht erfüllt		gekoppelte Eigenschaft		Anforderungen gemäss Nagra und ENSI erfüllt.
					Wirtgestein wird nicht weiter betrachtet.

Erläuterungen des ENSI zu Tabelle 5.3 2:

- Das ENSI nimmt aufgrund der Ergebnisse der Nagra-Bohrungen in der Nordschweiz grundsätzlich für alle Evaporitgesteine ein hohes Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) an.
- Das ENSI merkt an, dass der Opalinuston – isoliert betrachtet – zum Teil den Mindestanforderungen an die Mächtigkeit nicht genügt (vgl. NTB 08-03, Fig. 5.2-1). Erst in Kombination mit den darunter- und darüberliegenden tonigen Gesteinen kann in den betrachteten Grossräumen über weite Flächen eine genügende Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs angenommen werden (vgl. NTB 08-03, S. 123). Dieselbe Aussage gilt für den «Braunen Dogger», der ohne tonreiche Rahmengesteine die Mindestanforderungen an die Mächtigkeit nicht erfüllt, aber von einer gesamthaft günstigen Stratigraphie mit genügend mächtigen Rahmengesteinen profitiert (vgl. NTB 08-03, S. 124).

- 3 «Brauner Dogger» und Effinger Schichten: Das ENSI beurteilt die Charakterisierbarkeit des «Braunen Doggers» wegen der ausgeprägten Faziesverzahnung und der daraus resultierenden vertikalen wie lateralen Heterogenität sowie die Charakterisierbarkeit der Effinger Schichten wegen des Auftretens von Kalkbankabfolgen als bedingt günstig bis ungünstig und die verschärften Anforderungen damit als nicht erfüllt.
- 4 In den glazial übertieften Rinnentälern existieren ausserhalb des Alpenraumes im Molassebecken vermutlich keine Stellen, an denen die quartäre Gesamtmächtigkeit 500 m erreicht. Nur die quartären Rinnen von Rhein und Rhône umfassen solche Mächtigkeiten; diese Gebiete liegen jedoch innerhalb des Grossraumes Alpen.
- 5 Das ENSI ist der Meinung, dass die von der Nagra hier betrachteten wenig deformierten Blöcke kristallinen Gesteins der Nordschweiz (mit genügend geringer grossräumiger hydraulischer Durchlässigkeit) in für ein HAA-Lager benötigter Grösse (Mindestanforderung $\geq 4 \text{ km}^2$ bzw. verschärfte Anforderung $\geq 6 \text{ km}^2$) wegen der starken tektonischen Zergliederung des Grundgebirges (Grabenrand des mehrere Kilometer tiefen Permokarbondtroges) kaum vorhanden sein dürften. Wenn grössere intakte Teilblöcke existieren, wäre eine Exploration mit seismischen Methoden wegen der geringen Impedanzkontraste im Kristallin nicht möglich. Ein Explorationskonzept mit vielen Bohrungen wäre nicht zielführend, da Bohrungen unerwünschte, für die Sicherheit abträgliche Perforationen des Wirtgesteins mit sich bringen (Verletzung der Barrierenwirkung des Kristallins).

Zu den einzelnen Wirtgesteinen fasst das ENSI seine Beurteilung wie folgt zusammen:

«Brauner Dogger»

Die detaillierte Gesteinsbeschreibung findet sich in Kapitel 5.2. Prüft man die Gesteinsabfolge des «Braunen Doggers» anhand der verschärften Anforderungen bezüglich Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus', so ist diese Anforderung wegen der kleinräumigen Faziesverzahnung innerhalb dieser Gesteinsabfolge nicht erfüllt. Das ENSI teilt damit die Bewertung der Nagra, diese Gesteinsabfolge als Wirtgestein für ein HAA-Lager nicht weiter zu berücksichtigen. In Abweichung zur Nagra beurteilt das ENSI die verschärfte Anforderung bezüglich Indikator 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' beim «Braunen Dogger» wegen der starken vertikalen wie lateralen Heterogenität und der fehlenden Kontinuität der Schichtglieder als zusätzlich nicht erfüllt.

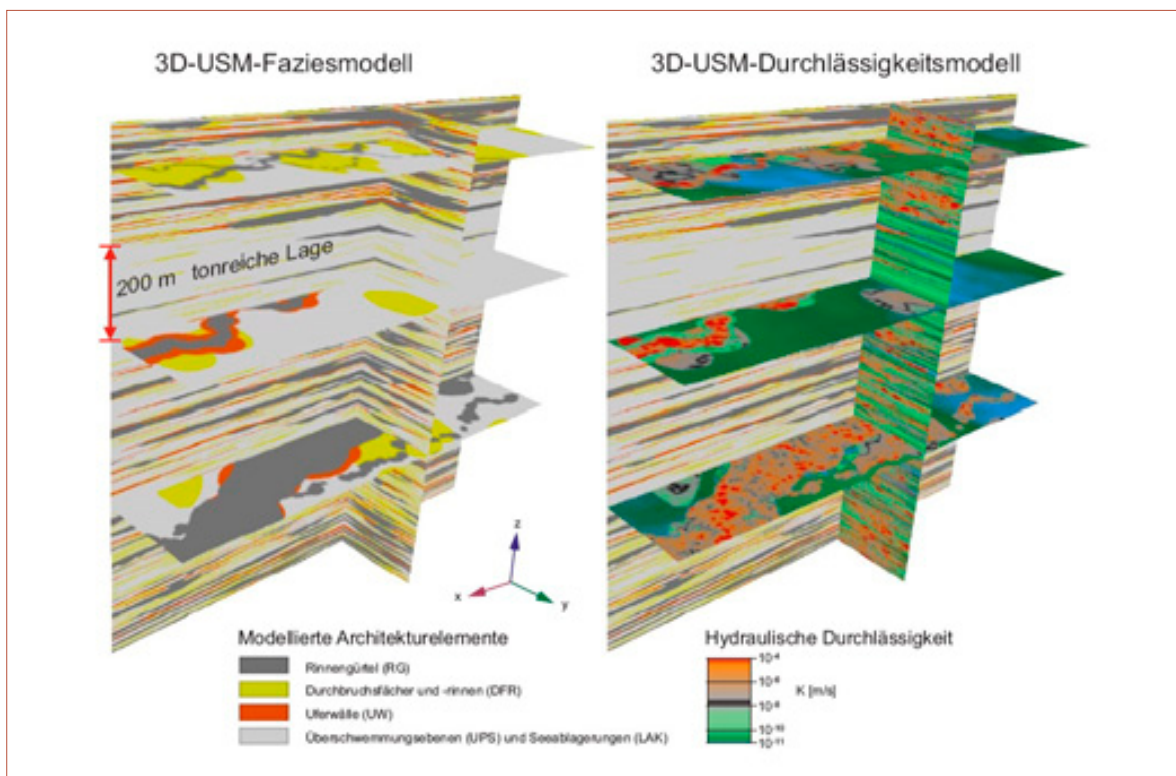
Effinger Schichten

Unter dieser Bezeichnung werden die marinen mergelig-kalkigen Gesteinsabfolgen der Effingen-Member und Gerstenhübel Beds der Wildegg-Formation zusammengefasst, die vom mittleren bis späten Oxfordien abgelagert wurden. Die detaillierte Charakterisierung der Gesteinsbeschaffenheit findet sich in Kapitel 5.2. Wegen der Heterogenität (vertikal) und der eher schwierigen Erfassung geklüfteter kalkreicher Bereiche kommt das ENSI wie die Nagra zum Schluss, dass die Effinger Schichten die verschärfte Anforderung bezüglich 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' nicht erfüllen. Ausserdem sieht das ENSI die verschärfte Anforderung an die 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' als nicht erfüllt an.

USM (Marnes Bariolées) und OSM (Basiszone, Bodensee-Schüttung)

Diese im Zusammenhang mit alluvialen Schuttfächern und grossen Schwemmebenen stehenden oligozänen bzw. miozänen fluviatil-lakustrischen Ablagerungen im Alpenvorland (Molassebecken) wurden von der Erdölindustrie, von Hochschulen und von der Nagra im Detail untersucht (Bitterli 2007). Entsprechend liegt ein beachtlicher Datensatz über deren Beschaffenheit und Eigenschaften vor. Im alpenfernen, so genannten distalen Bereich, herrschen zunehmend feinkörnige Sedimente vor, die über ein System von mäandrierenden Flüssen und grossen Seen in einer breiten Schwemmebene abgelagert wurden.

Der heterogene Aufbau der USM mit Wechsellagerungen mergelig-toniger und sandiger Abschnitte kann modellhaft mit unterschiedlichen Architekturelementen beschrieben werden (Rinnengürtel, Durchbruchsfächer und -rinnen, Uferwälle und Überschwemmungssande, Überschwemmungsebenen mit vorwiegend mergeligen Ablagerungen und Seeablagerungen, vgl. NTB 08-04; NTB 90-41). Die hydraulischen Durchlässigkeiten in der USM schwanken aufgrund der grossen lithologischen Unterschiede je nach Architekturelement stark (K -Werte von 10^{-11} m/s bei Tongesteinen bis 10^{-4} m/s bei schlecht zementierten Sandsteinen). Die grossen Durchlässigkeitskontraste zwischen ton- und sandsteinreichen Gesteinsbereichen führen zu einem entlang der Sandsteinabfolgen kanalisiertem Porenwasserfluss. Ähnliche Überlegungen gelten auch für die Gesteine der OSM, deren Architekturelemente vergleichbar zur USM sind.



Figur 5.3-3: Schnitte durch einen 3D-Modellblock (1 x 5 x 1 km) der USM-Westschweiz (Marnes Bariolées) mit stochastischer Modellierung der Faziesverhältnisse und der hydraulischen Durchlässigkeitsverteilung. Die Figur ist vertikal 10-fach überhöht (HSK 35/108). Die Figur illustriert deutlich die starke Anisotropie der Wasserwegsamkeiten, die in horizontaler Richtung besonders an die Rinnensandsteingürtel (RG) und die Durchbruchsfächer (DFR) gebunden ist. Für die 200 m mächtige tonreichste Lage der Marnes Bariolées wurden die zu erwartenden Wasserflussmengen durch ein hypothetisches Tiefenlager mittels eines hydrogeologischen Modells untersucht (Fidelibus und Löw 2007).

Für den Grössenbereich eines geologischen Tiefenlagers ist eine Abschätzung der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit nur mittels Modellbetrachtungen möglich. Die Erfüllung der verschärften Anforderung an die horizontale hydraulische Durchlässigkeit ($K_h < 10^{-10}$ m/s NTB 08-03) beurteilt das ENSI aufgrund des heterogenen Aufbaus (Fidelibus und Löw 2007; Hölker 2006; HSK 35/108) der distalen USM sowie der Ergebnisse eigener hydrogeologischer Modellierungen für diese Gesteinsformation als nicht erbracht (Figur 5.3-3). Bezüglich 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' beurteilt das ENSI die USM und OSM aufgrund der oben beschriebenen Charakteristika als zu heterogen, um die verschärften Anforderungen an diese beiden Indikatoren erfüllen zu können. Das ENSI teilt deshalb die Einschätzung der Nagra, diese Gesteine für ein HAA-Lager nicht vorzuschlagen.

Kristallines Grundgebirge der Nordschweiz

Die sicherheitstechnische Beurteilung des kristallinen Grundgebirges stützt sich auf eine breite Datengrundlage jahrzehntelanger Untersuchungen der Nagra (Kristallinprogramm Nordschweiz, NTB 93-01) und auf eine umfangreiche Literatur (siehe NTB 93-12) ab. Die räumliche Verbreitung des kristallinen Grundgebirges in geeigneter Tiefe beschränkt sich wegen des Nordschweizer Permokarbondrogens auf zwei kleine Restgebiete zwischen Laufenburg und dem Randen (NTB 08-03, Fig. 4.3-50). Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz ist heterogen aufgebaut und wegen der unmittelbaren Lage am Nordrand des Permokarbondrogens tektonisch stark zergliedert und zerklüftet. Intensiv zerrüttete Gesteinsabschnitte wechseln mit kompakteren Gesteinsbereichen ab.

Die in den Nagra-Bohrungen gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten variieren über viele Grössenordnungen (K -Werte von 10^{-13} bis 10^{-4} m/s) und sind Ausdruck einer komplexen und selbst mit vielen Erkundungen vor Ort schlecht erfassbaren heterogenen Verteilung der wasserführenden Fließsysteme (NTB 93-01). Die durch Bohrungen punktuell gewonnenen Daten sind nur begrenzt extrapolierbar, so dass die Charakterisierung und Abgrenzung eines für die geologische Tiefenlagerung geeigneten intakten geringdurchlässigen Gesteinsbereichs selbst mit weiteren zusätzlichen Bohrungen als kaum möglich beurteilt wird. Bereiche mit der erforderlichen geringen Durchlässigkeit haben sich als selten und auf der für ein geologisches Tiefenlager massgebenden Betrachtungsgrösse als kaum nachweisbar erwiesen (HSK 23/73). Die vorgegebene verschärfte Anforderung an die grossräumige horizontale Gesteinsdurchlässigkeit von kleiner als 10^{-10} m/s kann das kristalline Grundgebirge in lateral genügender Ausdehnung aus Sicht des ENSI nicht erfüllen.

Das ENSI kommt zum Schluss, dass das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz stark tektonisiert ist und wegen der beschränkten Ausdehnung wenig deformierter Gesteinsblöcke die verschärften Anforderungen bezüglich der Indikatoren 'Hydraulische Durchlässigkeit', 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und 'Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit' nicht erfüllt. Diese Einschätzung deckt sich mit der bereits 2004 abgegebenen Stellungnahme der HSK zum Kristallin Nordschweiz (HSK 23/73), welche im Detail die mit diesem Wirtgestein verbundenen Schwierigkeiten aufgezeigt hat.

Wahl des bevorzugten Wirtgesteins Opalinuston für ein HAA-Lager

Zusammenfassend stellt das ENSI fest, dass aufgrund der dargelegten Sachverhalte die Wahl des Opalinustons als einziges bevorzugtes Wirtgestein für HAA-Lager nachvollziehbar und plau-

sibel ist. Der Opalinuston ist das einzige der betrachteten Wirtgesteine, welches alle verschärften Anforderungen erfüllt. Der im Betrachtungsmassstab des geologischen Tiefenlagers homogen ausgebildete, äusserst feinkörnige Opalinuston mit seinem hohen Tonmineralgehalt weist eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit und damit verknüpft ein sehr hohes Einschluss- und Selbstabdichtungsvermögen auf, was die Wahl dieser Gesteinsformation als bevorzugtes Wirtgestein rechtfertigt. Eine detaillierte Beurteilung der Eigenschaften dieses Gesteins findet sich im HSK-Gutachten zum Entsorgungsnachweis für ein HAA-Lager im Opalinuston (HSK 35/99).

5.4 Zusammenfassende Bewertung zur Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine

Die von der Nagra auf der Basis von drei Teilschritten und 27 Sammelprofilen schweizweit vorgenommene Analyse der Sedimentgesteine bzw. der darunter liegenden Kristallineinheiten stellt aus Sicht des ENSI eine gute Basis für die Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine dar. Das von der Nagra vorgenommene Auswahlverfahren in Teilschritten ist transparent und nachvollziehbar. Eine einzige Lücke in der Betrachtung der Nagra (Staldengraben-Formation Einheit A) wurde seitens der Nagra bereits nachdokumentiert, führt aber zu keiner Änderung in den vorgeschlagenen Wirtgesteinen.

Das ENSI ist mit den von der Nagra vorgeschlagenen bevorzugten Wirtgesteinen für ein SMA-Lager einverstanden. Die Wirtgesteine Opalinuston, «Brauner Dogger», Effinger Schichten und helvetische Mergel erfüllen aufgrund der Prüfung durch das ENSI (und seine Experten) alle Mindest- und verschärften Anforderungen. Diverse sehr tonreiche und mächtige Gesteine wie die Bündnerschiefer (zu hoch metamorph, zu stark tektonisch überprägt), die Flysche (oft zu hoch metamorph, zu stark tektonisch überprägt, zu starke laterale Fazieswechsel oder zu sandig) oder die tonreichen Gesteine der Molasseablagerungen (USM/OSM, zu schlecht prognostizierbar, zu durchlässig) können die Mindest- oder verschärften Anforderungen aus Sicht von Nagra und ENSI nicht erfüllen. Auch nicht-tonreiche Gesteine wie die Evaporite und das Kristallin erfüllen die Mindest- oder verschärften Anforderungen nicht. Aus den Teilschritten verbleiben für das SMA-Lager aus Sicht des ENSI, in Übereinstimmung mit der Nagra, die bevorzugten Wirtgesteine Opalinuston, «Brauner Dogger», Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums im Alpenraum.

Die Wahl des Opalinustons als einziges bevorzugtes Wirtgestein für HAA-Lager ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und sicherheitsgerichtet. Der Opalinuston ist auch aus Sicht des ENSI das einzige Wirtgestein, welches alle verschärften Anforderungen erfüllt, wohingegen die Gesteine des Kristallins der Nordschweiz, der USM und OSM, der Effinger Schichten und des «Braunen Doggers» entweder zu stark durchlässig sind oder aufgrund ihrer Inhomogenität und internen Variabilität ausscheiden. Der im Betrachtungsmassstab des geologischen Tiefenlagers homogen ausgebildete, äusserst feinkörnige Opalinuston mit seinem hohen Tonmineralgehalt weist sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und damit verknüpft sehr hohes Einschluss- und Selbstabdichtungsvermögen auf, was die Wahl dieser Gesteinsformation als bevorzugtes HAA-Wirtgestein aus Sicht des ENSI rechtfertigt.

6 Identifikation geeigneter Konfigurationen und Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete

Gemäss den Vorgaben des SGT haben die Entsorgungspflichtigen in Etappe 1 in Schritt 5 des Auswahlverfahrens innerhalb der bezeichneten geologisch-tektonischen Grossräume geeignete Konfigurationen (unter anderem Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, Tiefenlage, Abstand zu regionalen Störungszonen) für die bevorzugten Wirtgesteine zu identifizieren und Vorschläge für geologische Standortgebiete für HAA- und SMA-Lager auszuarbeiten. Die durch die Entsorgungspflichtigen vorzunehmenden Beurteilungen haben sich dabei an den im Sachplan festgelegten sicherheitstechnischen Kriterien, zu beurteilenden Aspekten und für die Umsetzung relevanten Indikatoren zu orientieren (BFE 2008, S. 59 – 62).

Das ENSI geht zunächst auf das Vorgehen der Nagra und deren Grundlagen ein und beurteilt anhand der sicherheitstechnischen Vorgaben des SGT den eigentlichen Einengungsprozess, der zur Abgrenzung bevorzugter Bereiche führt (Kapitel 6.1). Danach aufbauend werden die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für SMA-Lager (Kapitel 6.2) und für HAA-Lager (Kapitel 6.3) dargelegt und beurteilt und in Kapitel 6.4 die Prüfergebnisse zusammengefasst.

6.1 Vorgehen und Grundlagen

Angaben der Nagra

Bei der Evaluation potenziell möglicher Konfigurationen unterscheidet die Nagra entsprechend den geologisch-tektonischen Rahmenbedingungen zwischen Grossräumen mit flächenhafter Verbreitung bevorzugter Wirtgesteine (östlicher Tafeljura, Molassebecken, östliche Subjurassische Zone) und anderen Grossräumen, bei denen in der Regel die Sedimentgesteine durch tektonische Faltenbildung und Überschiebungen kleinräumig zergliedert, verformt, akkumuliert oder ausgedünnt sind (westlicher Tafeljura, westliche Subjurassische Zone, Faltenjura, Alpen). Im letzten Fall handelt es sich um Wirtgesteinsvorkommen mit komplexer Geometrie, wo eine lokale Beurteilung erforderlich ist, d. h. jedes lokale Vorkommen muss einzeln aufgrund lokaler Detailinformationen identifiziert, charakterisiert und bewertet werden (NTB 08-03, S. 49).

Für flächenhaft verbreitete Wirtgesteine unterteilt die Nagra den mit Hilfe eines Geografischen Informationssystems (GIS) durchgeführten Einengungsprozess und schliesslich die Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete in zwei Teile (NTB 08-03, S. 50):

Im ersten Teil werden zuerst aufgrund von Mindestanforderungen die potenziell möglichen, und dann aufgrund verschärfter Anforderungen die bevorzugten Bereiche identifiziert, charakterisiert und bewertet.

Im zweiten Teil werden die bevorzugten Bereiche anhand der im Sachplan vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien und Indikatoren einer vergleichenden Bewertung unterzogen, prioritäre Bereiche bezeichnet und schliesslich Vorschläge von geologischen Standortgebieten je für das HAA- und das SMA-Lager festgelegt.

Für lokale Vorkommen bevorzugter Wirtgesteine (Mergel-Formationen im Helvetikum), die durch tektonische Faltenbildung und Überschiebungen kleinräumig zergliedert und akkumuliert sind, und für welche die Anwendung eines GIS nicht möglich ist, beschränkt sich die Einengungsprozedur auf eine Beurteilung der Indikatoren bezüglich Mindestanforderungen und verschärfter Anforderungen sowie auf eine Bewertung.

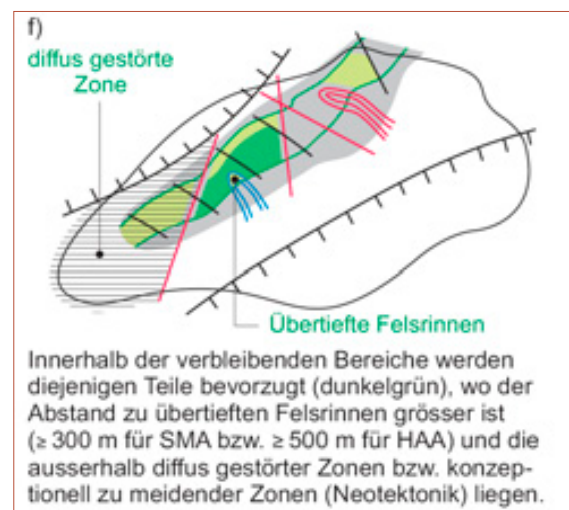
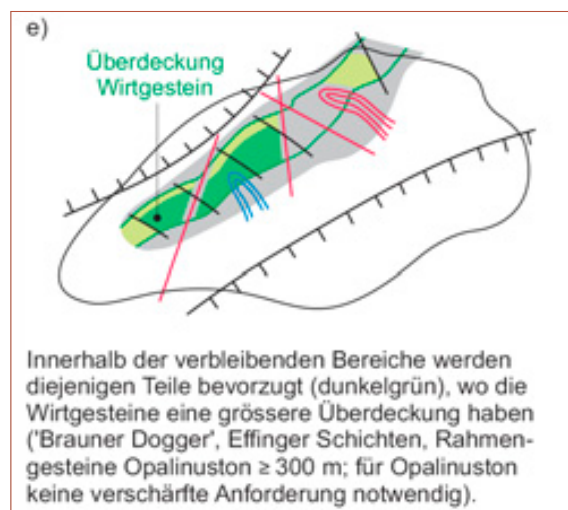
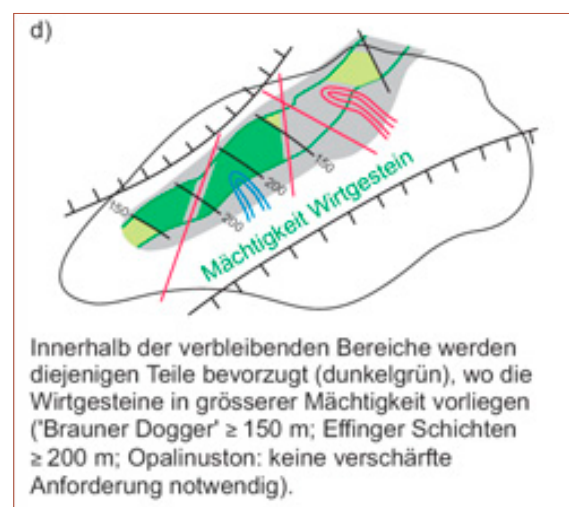
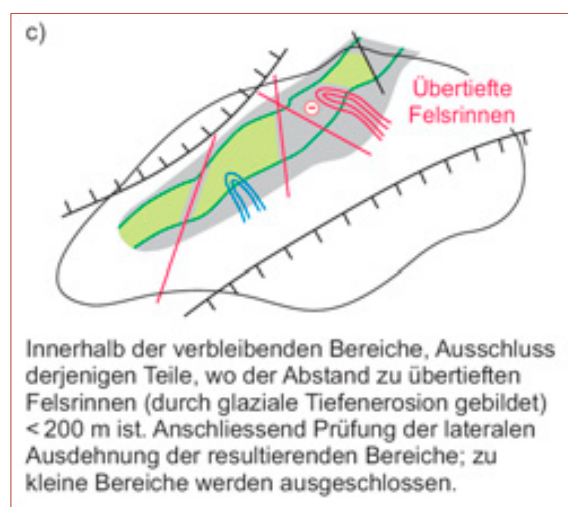
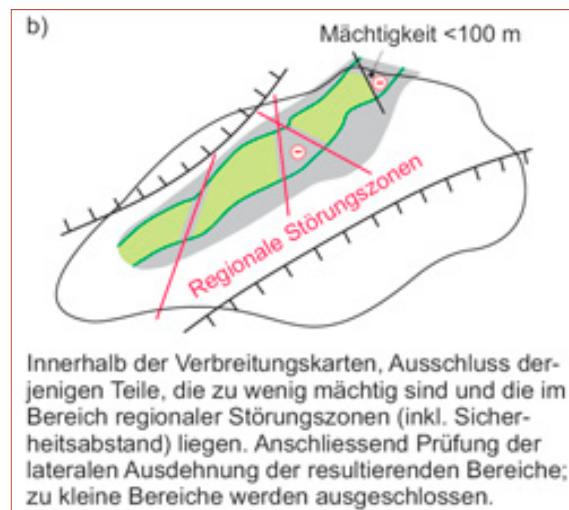
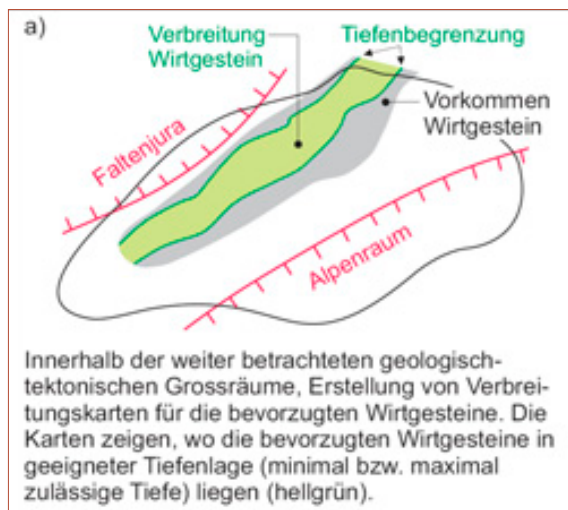
Bei der Festlegung der Aussengrenzen der geologischen Standortgebiete werden die Unge-
wissheiten in den bereichsbegrenzenden Daten (minimale bzw. maximale Tiefenlage Wirtgestein, Ausdehnung Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung, Indikator 'Diffus gestörte Zonen') berücksichtigt. Durch die resultierende Vergrösserung der geologischen Standortgebiete soll verhindert werden, dass fälschlicherweise Teile von Gebieten ausgeschlossen werden, die sich bei einer späteren Exploration als durchaus geeignet erweisen könnten und die dann für die insgesamt optimierte Anordnung der untertägigen Lagerbauten nicht zur Verfügung stehen würden (NTB 08-03, S. 331 und 428, Fig. D-2; NTB 08-04, S. 359).

Die für das Einengungsverfahren erforderlichen geologischen Grundlagen sind in NTB 08-04 und den darin aufgeführten Hintergrundberichten dokumentiert. Für den Einengungsprozess werden, wo flächenhafte Informationen verfügbar sind, GIS-basierte geologische Grundlagendaten verwendet (unter anderem Digitales Höhenmodell Schweiz DHM25 der swisstopo, digitale Nagra-Datensätze bezüglich Basis Opalinuston, Basis Malm, Basis Tertiär und Top Fels, digitale Mächtigkeitenmodelle für Opalinuston und Wildegg-Formation, digitale Modelle für die Darstellung von Faziesgrenzen, von regionalen Störungszonen und von diffus gestörten Zonen). Zur Kontrolle der GIS-Karten wurden digitalisierte lineare Datensätze (Spuren der Seismiklinien mit Tiefenlage erfassbarer Markerhorizonte) und punktuelle Daten (Bohrungen) herangezogen.

Für den GIS-Einengungsprozess leitet die Nagra aufgrund der für die Indikatoren spezifizierten Anforderungen so genannte GIS-Schneidekriterien ab (Nagra 2009a; NAB 07-43).

Erster Teil: Zur Identifikation potenziell möglicher Bereiche untersucht die Nagra zuerst für jedes bevorzugte Wirtgestein seine Verbreitung in geeigneter Geometrie. Dabei werden die Mindestanforderungen für die folgenden Indikatoren berücksichtigt (Figur 6.1-1; NTB 08-03, S. 50):

- 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion',
- 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion',
- 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit',
- 'Mächtigkeit'.



Figur 6.1-1: Vereinfachte Darstellung des GIS-Vorgehens bei der Identifikation potenziell möglicher Bereiche (a-c) und der Auswahl bevorzugter Bereiche (d-f) für flächenhaft vorkommende Wirtgesteine (NTB 08-03, S. 427).

Das Ergebnis dieser Prüfung wird in Form von Verbreitungskarten der daraus resultierenden Wirtgesteinsbereiche dargestellt. Danach werden diese Wirtgesteinsbereiche hinsichtlich der Erfüllung der Mindestanforderungen der Indikatoren

- 'Abstand zu regionalen Störungszonen' und
- 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion'

geprüft und ihre übrig bleibende Verbreitung mittels der entsprechenden Schnittverfahren aufgezeigt. Mit der Anwendung des Indikators 'Laterale Ausdehnung' wird danach überprüft, ob gewisse Bereiche wegen ungünstiger Geometrie ausscheiden.

Schliesslich erfolgt die Prüfung anhand einer Gruppe weiterer sechs Indikatoren und deren Mindestanforderungen, die zum Zwischenresultat potenziell möglicher Bereiche führt. Es sind dies die Indikatoren

- 'Redox-Bedingungen',
- 'Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)',
- 'Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins',
- 'Mineralquellen und Thermen',
- 'Explorationsbedingungen an Oberfläche',
- 'Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)'.

Durch Anwendung verschärfter Anforderungen werden anschliessend bevorzugte Bereiche evaluiert und mittels entsprechender Schnittprozesse deren räumliche Verbreitung aufgezeigt. Ziel dieses Vorgehens ist, grösseren, für die Sicherheit relevanten Ungewissheiten Rechnung zu tragen und deren Einfluss zu reduzieren. Verschärfte Anforderungen betreffen die Indikatoren 'Mächtigkeit', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', 'Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', 'diffus gestörte Zonen' und 'Tektonisches Regime (konzeptuell zu meidende Zonen)'. Da durch diese Evaluation evtl. weitere Teilbereiche weggeschnitten werden, wird mit dem Indikator 'Laterale Ausdehnung' wiederum geprüft, ob gewisse Bereiche wegen ihrer Grösse bzw. ungünstigen Form auszuschliessen sind.

Zweiter Teil: In diesem Teil erfolgen die Bewertung der bevorzugten Bereiche gemäss den Vorgaben des Sachplanes (Kriterien und Kriteriengruppen), eine Gesamtbewertung und darauf abgestützt die Festlegung der Vorschläge für geologische Standortgebiete für das HAA- und SMA-Lager. Die Bewertung der bevorzugten Bereiche umfasst die geologisch-tektonische Situation, das Wirtgestein sowie weitere die Konfiguration betreffende Indikatoren (NTB 08-03, S. 52 – 54).

Die Nagra führt die Bewertung auf vier hierarchischen Stufen durch: Stufe der Indikatoren, der Kriterien und der Kriteriengruppen (NTB 08-03, S. 392 – 423), sowie eine zusammenfassende Gesamtbewertung. Damit eine Aggregation der Bewertungen vorgenommen werden kann, werden der vierstufigen Bewertungsskala des Sachplanverfahren (sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig) Zahlenwerte von 4 bis 1 zugeordnet. Zuerst werden die bevorzugten Bereiche

anhand der Indikatoren bewertet. Danach erfolgt die Aggregation der Indikatorbewertungen auf der Hierarchiestufe der 13 im Sachplan definierten Kriterien. Als nächstes werden die kriterien-spezifischen Bewertungen zu einer Bewertung der vier Kriteriengruppen zusammengezogen. Zuletzt erfolgt die Gesamtbewertung durch arithmetische Aggregation der Kriteriengruppenbewertungen (NTB 08-03, Anhang C4).

Für die Festlegung der Vorschläge von geologischen Standortgebieten werden von der Nagra pro Wirtgestein Bereiche mit besonders günstigen Eigenschaften bevorzugt (Prioritätensetzung).

Mit der Prioritätensetzung verfolgt die Nagra dabei die folgenden Zielsetzungen:

- *Hohe und vergleichbare Sicherheit:* Die prioritären bevorzugten Bereiche müssen nach Ansicht der Nagra mindestens als geeignet oder besser bewertet sein. Dies stellt eine Verschärfung gegenüber den Vorgaben des Sachplans dar (BFE 2008, S. 62), wo gefordert wird, dass als potenzielle Standortgebiete nur solche in Frage kommen, welche mindestens als bedingt geeignet bewertet wurden.
- *Vielfalt an Wirtgesteinen:* Die Prioritätensetzung erfolgt grundsätzlich pro Wirtgestein. Es sollen dabei pro Wirtgestein diejenigen bevorzugten Bereiche als prioritär ausgewählt werden, die sich insgesamt durch besonders günstige und ausgeglichene Eignungsprofile auszeichnen. Mit der Prioritätensetzung soll sichergestellt werden, dass alle in den bevorzugten Bereichen vorliegenden Wirtgesteine auch in den vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten vertreten sind.
- *Optimale Abgrenzung der geologischen Standortgebiete und Flexibilität bezüglich Wirtgestein:* Die prioritären bevorzugten Bereiche werden anschliessend herangezogen, um geologische Standortgebiete abzugrenzen. Dabei werden bevorzugte, aber nicht prioritäre Bereiche in das geologische Standortgebiet miteinbezogen, falls sie in unmittelbarer Nähe eines prioritären Bereichs liegen oder mit diesem überlappen (NTB 08-03, S. 323). Dies erhöht die Flexibilität bezüglich Anordnung des Lagers bzw. der Wirtgesteinsmöglichkeiten.

Die zusammenfassende Bewertung der geologischen Standortgebiete erfolgt, wie im SGT vorgegeben, vierstufig anhand der Stufen sehr geeignet, geeignet, bedingt geeignet und weniger geeignet.

Beurteilung des ENSI

Für die Identifikation geeigneter Konfigurationen und für die sukzessive Einengung möglicher geologischer Standortgebiete folgt die Nagra den Vorgaben des SGT und den darin für Schritt 5 festgehaltenen sicherheitstechnischen Kriterien und Indikatoren.

Unter Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Situation (unter anderem regionale Störungszonen, Zonen mit Anzeichen kleinräumiger tektonischer Zergliederung, Neotektonik mit konzeptuell zu meidenden Zonen, übertiefte glaziale Felsrinnen) werden schrittweise Bereiche eingegrenzt, innerhalb welcher dann die bevorzugten Bereiche in geeigneter Tiefenlage und mit genügender lateraler Ausdehnung bestimmt werden. Wo die räumlichen Verhältnisse und die geologischen Grundlagendaten dies erlauben (östlicher Tafeljura, östliche Subjurassische Zone, Molassebecken), wendet die Nagra für flächenhaft vorkommende Wirtgesteine im Einengungsprozess ein GIS an, in welchem schrittweise nicht geeignete Bereiche weggeschnitten werden und schliesslich geeignete Restbereiche übrig bleiben. Für diesen Schnittprozess erarbeitete die Nagra die dazu erforderlichen digitalen Datensätze, die zusammen mit dem Digitalen Höhenmodell Schweiz DHM25 der swisstopo für die schrittweise Einengung bevorzugter Gebiete verwendet werden (NAB 07-12; NAB 08-42). Für lokale Wirtgesteinsvorkommen wie die Mergelgesteine des Helvetikums, welche eine komplexere Geometrie aufweisen und für welche der Einsatz eines GIS nicht möglich ist, beschränkt sich der Einengungsprozess auf die Beurteilung der Indikatoren bezüglich Mindestanforderungen und verschärfter Anforderungen sowie auf eine Bewertung. Das ENSI hält dieses Vorgehen für flächenhafte bzw. lokale Wirtgesteinsvorkommen insgesamt für zweckmässig und zielführend.

Für den GIS-Einengungsprozess hat die Nagra so genannte GIS-Schneidekriterien definiert, die sich auf die festgelegten Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen abstützen. Das genaue Vorgehen des komplexen und mehrstufigen Verschnittprozesses ist in NAB 07-43 umfassend und nachvollziehbar beschrieben. Die durch dieses Verfahren eingegrenzten bevorzugten Bereiche wurden anschliessend von der Nagra bewertet und zu geologischen Standortgebieten zusammengefasst. Die Grenzen dieser geologischen Standortgebiete wurden von der Nagra bewusst grosszügiger als die GIS-Abgrenzung der bevorzugten Bereiche gewählt, um möglichen Ungewissheiten Rechnung zu tragen, und um keine Gebiete frühzeitig auszuschliessen, die sich bei einer näheren Betrachtung als geeignet herausstellen könnten. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als nachvollziehbar; es entspricht den Vorgaben des Sachplans. Die für den Einengungsprozess verwendeten geologischen Datengrundlagen sind in NTB 08-04 und den darin referenzierten Hintergrundberichten umfassend dokumentiert.

Das ENSI hat das GIS-Einengungsverfahren und die damit verbundenen Schnittprozesse durch einen externen Experten, Dr. von Moos AG, überprüfen lassen. Die Überprüfung des GIS-Verfahrens und der dazu verwendeten Datensätze erfolgte dabei mit folgenden vier Schwerpunktsetzungen:

- Nachvollziehbarkeit der Eingabedaten (stichprobenartig),
- Plausibilitätsprüfung des Datenmodells (Beurteilung der Dokumentation),
- Nachvollzug der Verschnittprozesse mit eigenen Nachrechnungen,
- Konsistenzprüfung der Datensätze, Fehlerbetrachtungen und Schlussfolgerungen.

Die vom Experten durchgeführte GIS-Überprüfung stützte sich auf über 40 Datensätze ab, die räumliche Angaben über Geländeoberfläche (DHM25 swisstopo), Felsoberfläche mit allen glazial übertieften Rinnen, Tiefenlage und Mächtigkeitsverteilung der bevorzugten Wirtgesteine, Faziesgrenzen, tektonische Störungen, neotektonisch aktive Zonen, diffus gestörte Bereiche, Seismiklinien und Bohrungen in digitaler Form enthalten.

Die GIS-Überprüfung ist in einem Expertenbericht dokumentiert, in welchem das Vorgehen skizziert, die Prüfschritte dargelegt und deren Ergebnisse festgehalten sind (Dr. von Moos AG 2009b). Das ENSI kommt aufgrund der Prüfergebnisse zum Schluss, dass das Vorgehen der Nagra ausführlich dokumentiert und nachvollziehbar ist. Der Verschnittprozess wurde für die verschiedenen möglichen Wirtgesteine und Lagertypen anhand der digitalen Nagra-Datensätze mit unabhängigen eigenen Nachrechnungen geprüft und nachvollzogen. Die aus diesen Verschnittprozessen resultierenden bevorzugten Bereiche geologischer Standortgebiete decken sich gut mit den von der Nagra abgegrenzten Gebieten. Durch den Einsatz der Programme MapInfo und FME2008 Professional als Alternativen zu dem von der Nagra verwendeten ArcView 9.2 kann gezeigt werden, dass der von der Nagra verwendete GIS-Schnittprozess robust ist und auch bei der Verwendung alternativer Rechenprogramme vergleichbare Resultate liefert.

Für jedes vorgeschlagene geologische Standortgebiet wurden die vom Sachplan vorgegebenen Einengungsschritte nachvollzogen und die Tiefenlage des Wirtgesteins unter Terrain bzw. unter Felsoberfläche einzeln berechnet und beurteilt. Aufgezeigt wurde ferner für jedes geologische Standortgebiet auch die maximal mögliche Tiefenlage, die sich aus den Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit ergibt.

Bei der Überprüfung des GIS-Einengungsverfahrens kommt das ENSI zusammenfassend zum Schluss, dass das geologische GIS-Modell Nordschweiz in seiner Struktur zweckmässig ist und alle relevanten geologischen Grundlagen aus Bohrungen, Seismiklinien, Kartierungen und publizierten Isohypsenkarten berücksichtigt. Diese wurden korrekt zur Berechnung bzw. Eichung des GIS-Modells verwendet. Die digitalen Höhen- und Mächtigkeitsmodelle stehen im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeit im Einklang mit den Grundlagendaten. Abweichungen sind dokumentiert bzw. von der Nagra erläutert.

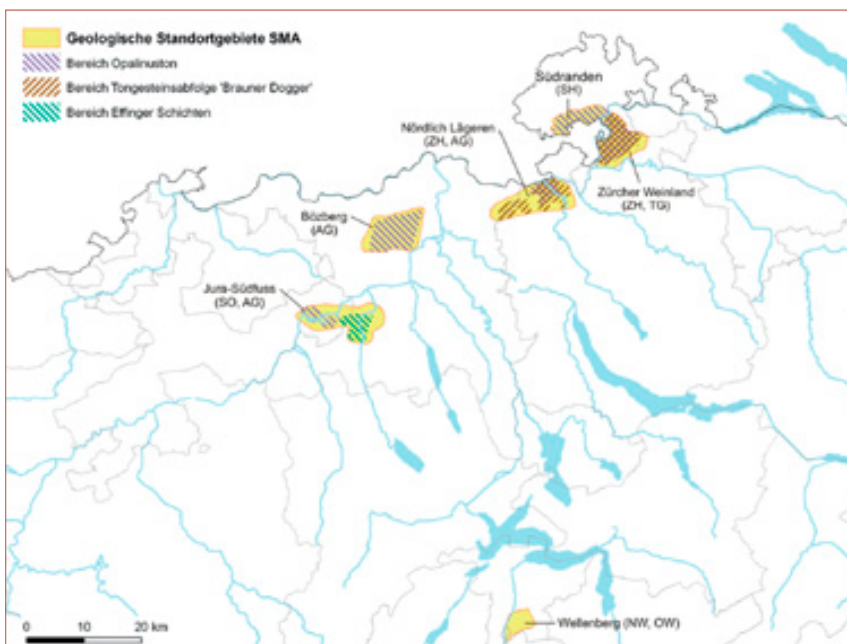
Für die Ausarbeitung und Festlegung der Vorschläge geologischer Standortgebiete fasst die Nagra ihre auf Stufe der Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen durchgeführte Bewertung in Form von Tabellen für alle bevorzugten Bereiche zusammen und ergänzt diese mit einer Prioritätensetzung pro Wirtgestein je für das SMA- und das HAA-Lager (NTB 08-03, S. 323). Zweck und Vorgaben dieser Prioritätensetzung sind für das ENSI aufgrund von Rückfragen und der daraufhin von der Nagra gelieferten Zusatzinformationen nachvollziehbar (NAB 09-29):

- Die Zielsetzung der Nagra, nur geologische Standortgebiete vorzuschlagen, die die Bewertungsstufe geeignet oder sehr geeignet erreicht haben, beurteilt das ENSI aus Sicht der Sicherheit in Hinblick auf den sicherheitstechnischen Vergleich in den späteren Etappen des Sachplanverfahrens als zweckmässig und zielführend.

- Die Vielfalt an Wirtgesteinen bleibt damit erhalten. Dies ist nach Ansicht des ENSI sinnvoll, da eine vertiefte sicherheitstechnische Analyse und damit ein direkter Vergleich der Eignung der Wirtgesteine erst in Etappe 2 erfolgt.
- Die Möglichkeit, an einem geologischen Standortgebiet zwei Wirtgesteine für das SMA-Lager zur Verfügung zu haben, ist nach Ansicht des ENSI vorteilhaft, da die jeweiligen sicherheitstechnischen Vorteile der zur Verfügung stehenden Wirtgesteine miteinander verknüpft werden können.

6.2 Standortgebiete für SMA-Lager

Die Nagra schlägt sechs geologische Standortgebiete für SMA-Lager vor (Figur 6.2-1). Im Folgenden werden die Identifikation und Auswahl bevorzugter Bereiche (Kapitel 6.2.1) und die daraus resultierenden vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete einzeln beurteilt (Kapitel 6.2.2). Anschliessend wird die Möglichkeit der Aufteilung eines SMA-Lagers auf zwei Wirtgesteine (Kapitel 6.2.3) und die Vollständigkeit der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete beurteilt (Kapitel 6.2.4). Schliesslich wird die hydrogeologische Situation der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete miteinander verglichen (6.2.5).



Figur 6.2-1: Übersicht der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für das SMA-Lager mit den bevorzugten Bereichen (modifiziert nach NTB 08-03, Fig. 5.7-1a)

6.2.1 Identifikation und Auswahl bevorzugter Bereiche für das SMA-Lager

Angaben der Nagra

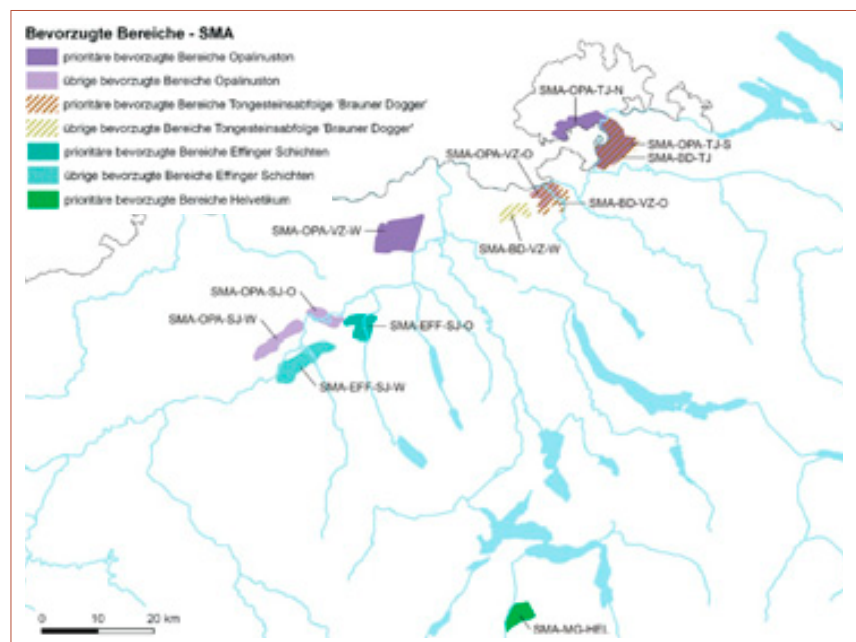
Zur Einengung auf bevorzugte Bereiche für SMA-Lager in den flächenhaft verbreiteten Wirtgesteinen Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten wendet die Nagra ein mehrstufiges GIS-Schnittverfahren an. Je nach Wirtgestein und dessen Lage innerhalb eines geologisch-tektonischen Grossraums kommen dabei unterschiedliche Mindest- und verschärfte Anforderungen zu Anwendung (siehe Kapitel 3.4). Die Nagra dokumentiert die Ergebnisse und die Zwischenresultate in jeweils sechs Verbreitungskarten (NTB 08-03, Fig. 5.2-1 bis 5.2-18).

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums kommt kein GIS-Schnittverfahren zur Anwendung, weil die massgeblichen tektonischen Akkumulationen nur lokal vorkommen. Der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' wird nicht angewendet (NTB 08-03, S. 219). Die Nagra diskutiert früher bekannte (z. B. Oberbauenstock, Wellenberg, Muotathal, Wartau) und neu erschlossene (Sachsels, Giswil, Lungern, Lötschbergtunnel) Vorkommen vor dem Hintergrund der heutigen Anforderungen an SMA-Lager und präsentiert das Ergebnis in einer Verbreitungskarte (NTB 08-03, Fig. 5.2-19).

Als Ergebnis dieser Verfahren resultieren schweizweit zwölf bevorzugte Bereiche für SMA-Lager (Figur 6.2-2). Diese Bereiche werden auf der Hierarchiestufe der Indikatoren, der Kriterien und der Kriteriengruppen einzeln bewertet (NTB 08-03, Kap. 5.4 und Übersicht in Tab. C.4-1 bis C.4-12).

Unter diesen bevorzugten Bereichen wählt die Nagra wirtgesteinspezifisch sieben prioritäre Bereiche aus, welche anschliessend die Grundlage für die Abgrenzung der Standortgebietsvorschläge bilden, wobei die Ungewissheiten in den bereichsbegrenzenden Daten berücksichtigt werden (NTB 08-03, S. 331). Die daraus resultierenden sechs geologischen Standortgebiete sind in Figur 6.2-1 dargestellt.

Figur 6.2-2: Übersicht der 12 bevorzugten Bereiche für das SMA-Lager (NTB 08-03, Fig. 5.6-1)



Beurteilung des ENSI

Das Vorgehen der Nagra bei der Einengung auf bevorzugte Bereiche wurde bereits in Kapitel 6.1 detailliert überprüft und positiv beurteilt. Die Auswahl der bevorzugten Bereiche für SMA-Lager ist für das ENSI nachvollziehbar. Zu einzelnen Teilaspekten bestehen jedoch abweichende Auffassungen. Diese werden für die einzelnen Standortgebietsvorschläge im folgenden Kapitel 6.2.2 beschrieben und beurteilt.

6.2.2 Vorgeschlagene Standortgebiete

Südranden (SH)

Angaben der Nagra

Die Grenzziehung des Gebiets erfolgt im Nordosten durch die Neuhauser Störung (Westgrenze der Grabenrandzone des Hegau-Bodensee-Grabens), im Norden und Westen durch die minimale Tiefenlage und im Süden durch die Landesgrenze.

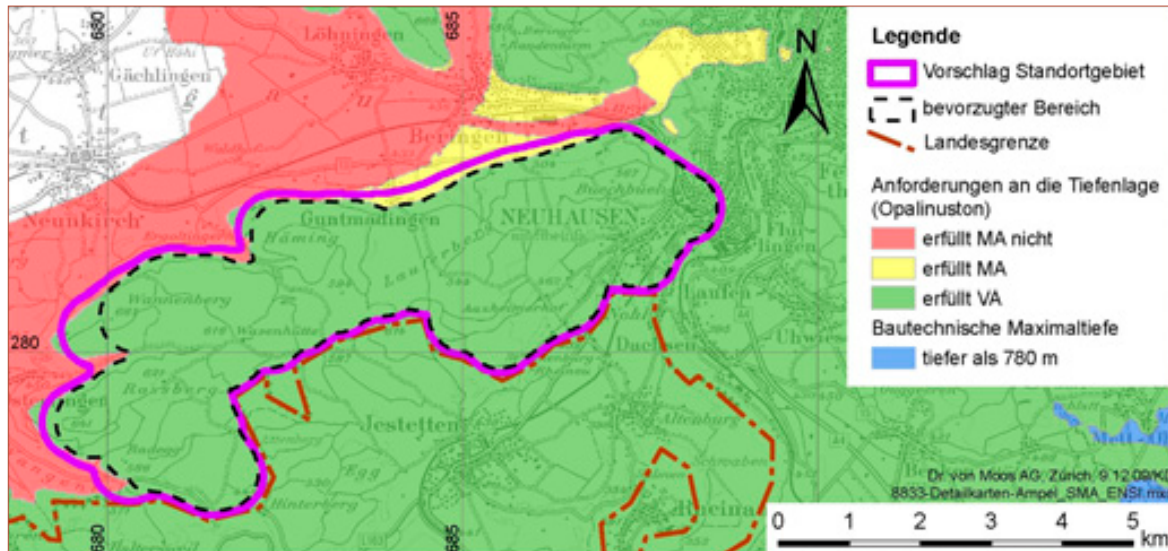
Das geologische Standortgebiet Südranden (SH) hat eine Fläche von 24 km². Das bevorzugte Wirtgestein ist der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen. Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend mit sehr geeignet bewertet.

Der Opalinuston im geologischen Standortgebiet weist eine sehr gute Barrierenwirkung auf. Das eher lang gestreckte geologische Standortgebiet mit einer mittleren Breite von 2 km liegt unter einem Hügelzug (Wannenberg, Lauferberg) im Tafeljura. Es ist tektonisch wenig beansprucht und wird nur im Osten von einer regionalen Störungszone begrenzt, ansonsten liegen keine Anzeichen einer erhöhten tektonischen Zergliederung vor. Generell ist der Opalinuston ruhig gelagert und fällt leicht nach Süden ein, was eine optimale Anordnung der Lagerkammern begünstigt (Orientierung bezüglich Hauptspannungen, horizontale Lagerebene). Im Westen des geologischen Standortgebiets nimmt die Mächtigkeit des Wirtgesteins ab, so dass die Lagerkammern voraussichtlich bevorzugt im mittleren und östlichen Teil platziert würden. Der Opalinuston liegt im ganzen geologischen Standortgebiet mässig tief und ist somit aus bautechnischer Sicht günstig zu bewerten. Generell sind die Raumverhältnisse für die Aufnahme des umhüllenden Abfallinventars geeignet und weisen diesbezüglich Reserven auf; das potenzielle Platzangebot im Opalinuston wird ungefähr auf das Achtfache des umhüllenden Abfallinventars geschätzt (NTB 08-03, S. 334). Die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' wird, ebenso wie die vier untergeordneten Kriterien, jeweils als sehr günstig bewertet.

Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird insgesamt als günstig beurteilt, da trotz des sehr günstigen Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wirtgesteinsbedingt 'Lagerbedingte Einflüsse' (Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' bedingt günstig) sowie 'Erosion' und 'Nutzungskonflikte' (Indikatoren 'Rohstoffvorkommen ober- bzw. unterhalb des Wirtgesteins' bedingt günstig bis günstig) nur als günstig bewertet sind.

Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird als sehr günstig bewertet. Allein der Indikator 'Explorationsverhältnisse an Oberfläche' wird aufgrund des hügeligen Reliefs und der Waldbedeckung nur als bedingt günstig bis günstig bewertet.

Die felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen (Kriterium 4.1) wurden als günstig eingestuft, die untertägige Erschliessung und Wasserhaltung (Kriterium 4.2) als sehr günstig. Deshalb erreicht die Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' knapp eine sehr günstige Bewertung.



Figur 6.2-3: Tiefenlage des Opalinustons im SMA-Standortgebiet Südranden (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis \geq 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis \geq 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder Basis \geq 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

Beurteilung des ENSI

Die nördliche und westliche Grenzziehung aufgrund der minimalen Tiefenlage wurde überprüft und bestätigt (Figur 6.2-3, Dr. von Moos AG 2009b). Das ENSI beurteilt die Grenzziehung und die zugrunde liegenden Daten als nachvollziehbar und korrekt. Durch die geologisch-tektonischen und geografischen Rahmenbedingungen bleibt kein Spielraum für eine andere Grenzziehung.

Die sehr günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist für das ENSI nachvollziehbar. Gemäss den ENSI-Experten (Emch+Berger AG 2010) ist der maximale Querschnitt der Lagerkavernen zu beschränken, wodurch sich das Platzangebot untertags verringern würde. Aufgrund der grosszügigen Platzverhältnisse steht jedoch ein sehr günstiges 'Platzangebot untertags' zur Verfügung.

Hinsichtlich des Indikators 'Langzeitstabilität' gelten generell sehr günstige Bedingungen im geologisch-tektonischen Grossraum des Tafeljuras (Kapitel 4.2). Angesichts der durchschnittlichen Hebung von 70 bis 100 m pro Million Jahre (Figur 4.1-2) und der Erhaltung eines Rests von zementiertem Höheren Deckenschotter, von Altflächen und von Bohnerz-Vorkommen in Karstaschen des Malm (Paläobodenbildung, teilweise bedeckt von Molasseschichten) bestehen aus Sicht des ENSI Evidenzen für minimale flächenhafte Erosion (Denudation durch Lösung), die nur einen Bruchteil der Hebung beträgt und trotz der vergleichsweise geringeren Tiefenlage eine sehr günstige Bewertung des Indikators rechtfertigt. Die nördlich angrenzende geringfügig glazial übertiefte Klettgau-Rinne wurde in der letzten Eiszeit nicht vom Gletschereis erreicht. Einzig die Schmelzwasserrinne des Wangentals an der Westgrenze des geologischen Standortgebiets könnte als Schwächezone für glaziale Tiefenerosion bei einer Vorlandvereisung dienen, die dem

natürlichen Klimazyklus folgend frühestens in 100'000 Jahren zu erwarten ist (Haeberli 2004). Das östliche Ende der Klettgau-Rinne ist bei Neuhausen seit der vorletzten Eiszeit weitgehend blockiert, so dass ein Gletschervorstoss wahrscheinlich dem Hochrhein folgen würde. Daher bewertet das ENSI die Möglichkeit glazialer Tiefenerosion als sehr gering und den entsprechenden Indikator und in der Folge auch das Kriterium 'Erosion' als sehr günstig. 'Lagerbedingte Einflüsse' bewertet das ENSI gemäss Tabelle 5.2 2 nur als bedingt günstig. Nutzungskonflikte bestehen in Hinblick auf Kohlenwasserstoffe unterhalb des Wirtgesteins, während oberhalb desselben keine nutzungswürdigen Rohstoffe vorhanden sind. Das ENSI bewertet daher das Kriterium 'Nutzungskonflikte' analog zur Nagra als günstig und kommt in der Folge für die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' insgesamt zu einer knapp sehr günstigen Bewertung.

Der Indikator 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird auch vom ENSI als sehr günstig beurteilt. Mächtigkeit, fazielle Ausbildung und Tiefenlage des Opalinustons sind in dieser tektonisch ruhigen Lage gut zu prognostizieren, allerdings ist die Zugänglichkeit des Gebiets für seismische Untersuchungen durch die Bewaldung eingeschränkt.

Das ENSI hält die sehr günstige Beurteilung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für gerechtfertigt, da sich der Opalinuston im Südranden in vergleichsweise geringer Tiefenlage befindet, kaum tektonisch zergliedert ist und das Lager zumindest teilweise ohne Durchörterung der Malmkalke, die zum Teil ein erhöhtes Karst- und Wassereinbruchrisiko aufweisen, erschlossen werden kann (Emch+Berger AG 2010).

Der zugrunde liegende Bereich SMA-OPA-TJ-N weist durchweg sehr günstige und günstige sicherheitstechnische Eigenschaften bezüglich aller Kriterien und Kriteriengruppen auf (NTB 08-03, S. 326), was sonst nur noch für den südlich anschliessenden Bereich SMA-OPA-TJ-S im Zürcher Weinland der Fall ist.

Zusammenfassend folgt das ENSI der Gesamtbeurteilung des geologischen Standortgebiets Südranden als sehr geeignet und stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

Zürcher Weinland (ZH, TG)

Angaben der Nagra

Die Grenzziehung des vorgeschlagenen geologischen Standortgebiets Zürcher Weinland erfolgt im Nordosten durch die Neuhauser Störung (Westgrenze der Grabenrandzone des Hegau-Bodensee-Grabens), im Südosten durch die maximale Tiefenlage der beiden Wirtgesteine, im Südwesten durch eine Zone mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung und im Westen entlang der Landesgrenze (Ausnahme: Sporn bei Rheinau).

Das geologische Standortgebiet hat eine Fläche von 49 km². Innerhalb des geologischen Standortgebiets kommen sowohl der 'Braune Dogger' als auch der Opalinuston mit ihren jeweiligen Rahmengesteinen als Wirtgestein in Frage. Dabei ist es offen, ob das ganze SMA-Lager jeweils im 'Braunen Dogger' oder im Opalinuston angeordnet oder ob das SMA-Lager auf beide

Wirtgesteine aufgeteilt würde. Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend mit sehr geeignet bewertet. Diese Bewertung basiert auf der detaillierten Bewertung der zugrunde liegenden prioritären Bereiche SMA-OPA-TJ-S und SMA-BD-TJ.

Die Wirtgesteine im geologischen Standortgebiet weisen günstige ('Brauner Dogger') bis sehr günstige (Opalinuston) Eigenschaften auf. Im 'Braunen Dogger' sind die gesteinspezifischen Indikatoren 'Kolloide' und 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' nur bedingt günstig bis günstig bewertet und bewirken im ersten Fall, dass das Kriterium 'Geochemische Bedingungen' eine sehr günstige Bewertung knapp verfehlt. Falls das geologische Standortgebiet in die engere Wahl für die Realisierung des SMA-Lagers fallen würde, wäre die Bedeutung von allenfalls durchlässigeren Kalk- und Sandsteinlagen innerhalb des 'Braunen Doggers' in Hinblick auf Indikator 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' und auf die Kriterien 'Freisetzungspfade' und 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' stufengerecht in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung detaillierter abzuklären.

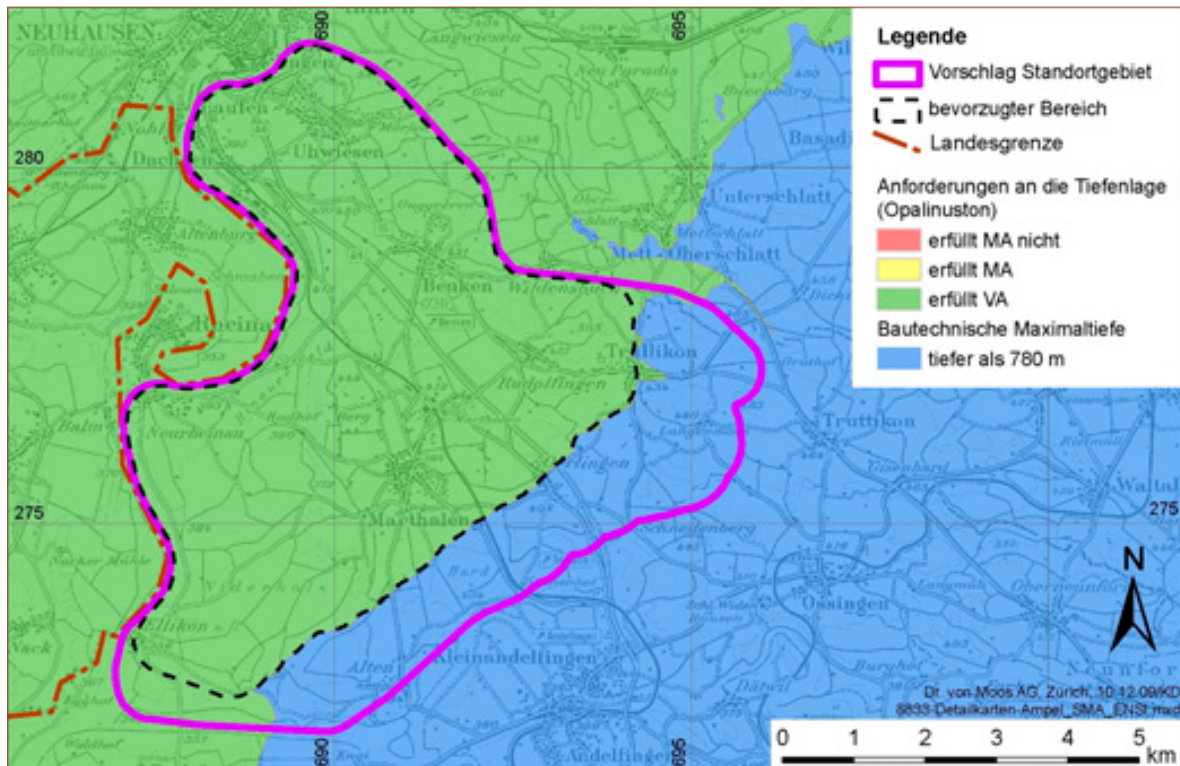
Das geologische Standortgebiet liegt im Tafeljura, ist tektonisch wenig beansprucht und wird nur im Osten von einer regionalen Störungszone begrenzt; ansonsten liegen mit Ausnahme der Wildensbucher Flexur keine Anzeichen einer erhöhten tektonischen Zergliederung vor. Generell sind die Wirtgesteinsschichten ruhig gelagert und fallen leicht nach Südosten ein, was eine optimale Anordnung der Lagerkammern begünstigt (Orientierung bezüglich Hauptspannungen, horizontale Lagerebene, Flexibilität in der Wahl der Tiefenlage der Lagerebene). Die Kriterien-Gruppe 'Langzeitstabilität' wird sehr günstig beurteilt, wobei das Kriterium 'Nutzungskonflikte' (Indikator 'Mineralquellen und Thermen' bedingt günstig bis günstig) für beide Gesteine jeweils günstig bewertet wird. Bezüglich des Kriteriums 'Lagerbedingte Einflüsse' ist der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' für Opalinuston nur bedingt günstig bewertet.

Die Kriterien-Gruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' ist für Opalinuston sehr günstig, für 'Braunen Dogger' nur günstig bewertet, weil das Kriterium 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' des 'Braunen Doggers' nur als bedingt günstig bis günstig bewertet ist.

Vor allem der Opalinuston liegt im südlichen Teil des geologischen Standortgebiets sehr tief und ist somit bautechnisch anspruchsvoll; im übrigen Teil, inklusive im 'Braunen Dogger', sind die bautechnischen Bedingungen günstig. Generell sind die Raumverhältnisse geeignet für die Aufnahme des umhüllenden Abfallinventars und weisen diesbezüglich Reserven auf; das potenzielle Platzangebot wird sowohl im Opalinuston als auch im 'Braunen Dogger' ungefähr auf das Siebenfache des umhüllenden Abfallinventars geschätzt (NTB 08-03, S. 336).

Beurteilung des ENSI

Die südöstliche Grenzziehung des geologischen Standortgebiets wird vor allem durch die maximale Tiefenlage des Wirtgesteins «Brauner Dogger» bestimmt, während der Bereich mit Opalinuston weniger weit nach Südosten reicht (Figur 6.2-4). Die Überprüfung durch den Experten des ENSI (Dr. von Moos AG 2009b) zeigt zwar im Süden eine grössere Ausdehnung des «Braunen Doggers» in geeigneter Tiefenlage und Mächtigkeit (Figur 6.2-5), jedoch ist das vorgeschlagene geologische Standortgebiet dort durch eine Zone mit erhöhter tektonischer Zergliederung

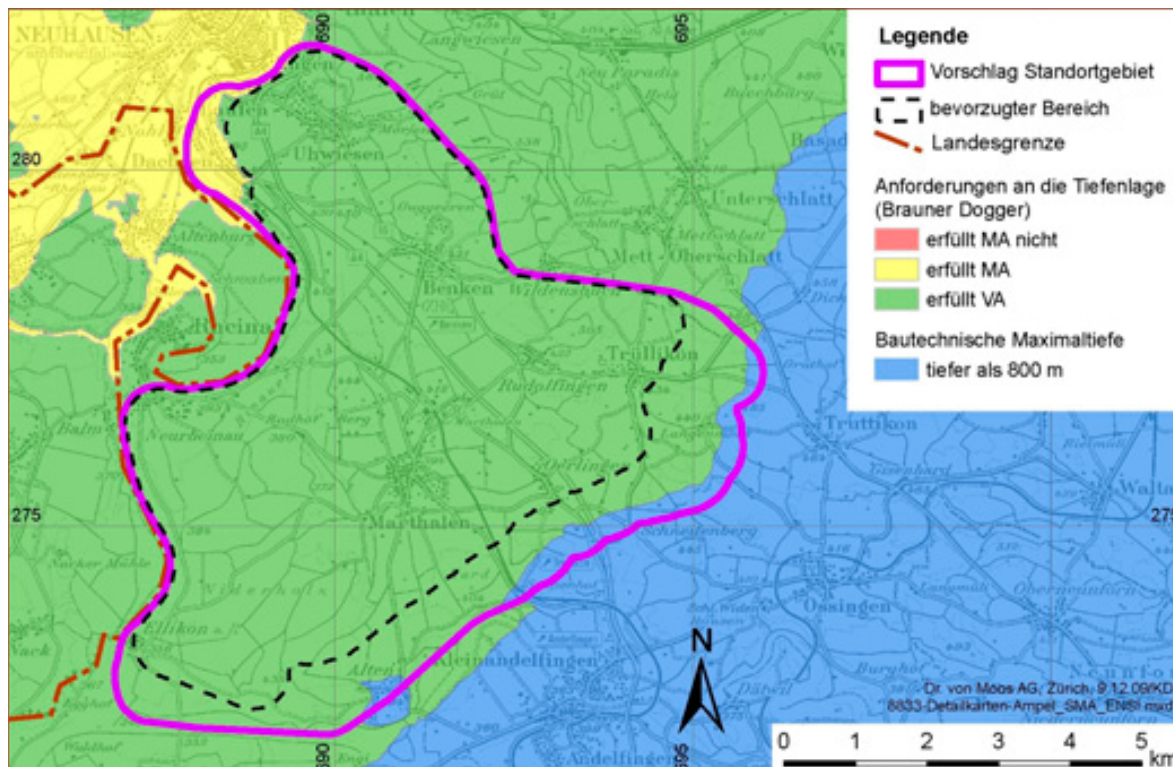


Figur 6.2-4: Tiefenlage des Opalinustons im SMA-Standortgebiet Zürcher Weinland (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage überall erfüllt.

begrenzt (NTB 08-03, S. 337). Daher markiert die von der Nagra vorgeschlagene Grenze nach Ansicht des ENSI bereits die maximal mögliche Ausdehnung des geologischen Standortgebiets.

Die sehr günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschliesswirksamen Gebirgsbereiches' ist für das ENSI sowohl für den Opalinuston (siehe Kapitel 5.2) als auch für den «Braunen Dogger» nachvollziehbar. Nur als bedingt günstig wird sowohl von der Nagra als auch vom ENSI die Homogenität des «Braunen Doggers» beurteilt. Nach Ansicht des ENSI stellen die zu erwartenden Fazieswechsel innerhalb des «Braunen Doggers» im Zürcher Weinland keinen schwerwiegenden Nachteil dar, da innerhalb des vorgeschlagenen geologischen Standortgebiets ausreichend Platz für eine optimale Positionierung der Lagerkavernen besteht.

Dank der zahlreichen neueren Untersuchungen, welche unter anderem für den Entsorgungsnachweis im Zürcher Weinland (NTB 02-05) durchgeführt wurden, gehört der Opalinuston in diesem Gebiet zu den am besten untersuchten Gesteinen der Schweiz. Nach Ansicht der Nagra wie auch des ENSI kann die Wildensbucher Flexur, an welcher mit hochauflösender 3D-Seismik ein maximaler Versatz von 17 m auf Niveau Opalinuston nachgewiesen wurde (NTB 00-03), als in diesem Umfang einzelnes Phänomen angesehen werden. Dieser Struktur könnte bei der Erstellung der Lagerkavernen ausgewichen werden. Für den Opalinuston beurteilt das ENSI die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' im Zürcher Weinland als sehr günstig. Der «Braune Dogger» als über-



Figur 6.2-5: Tiefenlage des «Braunen Doggers» im SMA-Standortgebiet Zürcher Weinland (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 250 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 250 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 375 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 375 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 800 m unter Terrain⁸. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

lagernde Schicht wird ebenfalls als sehr günstig beurteilt. Das ENSI bewertet die Indikatoren 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' bzw. 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten' unter Verweis auf Tabelle 5.2-2 als bedingt günstig, so dass das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' als bedingt günstig angesehen wird.

Die 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' ist für den Opalinuston im Gebiet Zürcher Weinland sehr hoch. Nach Ansicht des ENSI kann diese Kriteriengruppe auch für den «Braunen Dogger» als günstig beurteilt werden.

Obwohl an die maximale Tiefenlage für das SMA-Lager aufgrund der grösseren Kavernenquerschnitte strengere Anforderungen gestellt werden als für das HAA-Lager (vgl. Kapitel 3.4, Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', und NTB 08-05, S. A1-7), wird die bautechnische Eignung für das SMA-Lager im Opalinuston günstiger beurteilt als für das HAA-Lager (siehe Kapitel 6.3.2). Der Grund liegt darin, dass beim SMA-Lager zementhaltige Stützmittel ohne grössere Einschränkungen eingesetzt werden können. Die insgesamt günstige Beurteilung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' für Opalinuston und «Brau-

⁸ Vereinfachte Darstellung: Wenn die Effinger Schichten weniger als 50 m mächtig sind, ist die bautechnische Maximaltiefe des «Braunen Doggers» bereits bei 750 m für den Top der Effinger Schichten erreicht.

nen Dogger» bleibt nach Ansicht des ENSI zutreffend, auch wenn der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' für beide Wirtgesteine vom ENSI bzw. seinem Experten nur als bedingt günstig bis günstig beurteilt wird (Amann und Löw 2009). Hier setzt das ENSI eine Abstufung zwischen Gebieten im Tafeljura, in der Vorfaltenzone und der Subjurassischen Zone ein, die für den Tafeljura die günstigste Bewertung ergibt. Die Erschliessung des Lagers führt durch die USM mit potenziellen Gasvorkommen und durch Malmkalke mit erhöhtem Karst- und Wasser- bzw. Gaseinbruchrisiko (Emch+Berger AG 2010). Diese Erschwernisse sind jedoch bautechnisch beherrschbar und stellen die günstige Bewertung des vorgeschlagenen geologischen Standortgebiets Zürcher Weinland bezüglich Erschliessung nicht in Frage.

Die zugrunde liegenden Bereiche SMA-OPA-TJ-S und SMA-BD-TJ weisen günstige bis sehr günstige sicherheitstechnische Eigenschaften bezüglich nahezu aller Kriterien auf, mit Ausnahme der 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' für den «Braunen Dogger» (NTB 08-03, S. 326) und 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' für beide Wirtgesteine. Beide Bereiche liegen zum grössten Teil direkt übereinander. Unabhängig von der Positionierung des SMA-Lagers innerhalb des Gebiets Zürcher Weinland stehen somit grundsätzlich zwei Wirtgesteinsoptionen zur Verfügung. Die dadurch gewonnene Flexibilität für die Platzierung eines Lagers und das standortbezogene Optimierungspotenzial werden vom ENSI als Vorteil angesehen.

Zusammenfassend folgt das ENSI der Gesamtbeurteilung des geologischen Standortgebiets Zürcher Weinland als sehr geeignet und stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

Nördlich Lägeren (ZH, AG)

Angaben der Nagra

Die Grenzziehung des Gebiets erfolgt im Süden und im Nordwesten durch regionale Störungszonen, im Osten durch die maximale Tiefenlage, im Westen durch eine Zone mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung, und im Nordosten entlang der Landesgrenze. Das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren hat eine Fläche von 65 km². Darin kommen sowohl der 'Braune Dogger' als auch der Opalinuston mit ihren jeweiligen Rahmengesteinen als Wirtgestein in Frage. Es ist offen, ob das ganze SMA-Lager jeweils im 'Braunen Dogger' oder im Opalinuston angeordnet oder ob das Lager auf beide Wirtgesteine aufgeteilt würde. Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend mit geeignet bewertet. Diese Bewertung basiert auf der detaillierten Bewertung des zugrunde liegenden prioritären Bereichs SMA-BD-VZ-O und der bevorzugten Bereiche SMA-OPA-VZ-O sowie SMA-BD-VZ-W. Weiter ist auch der Opalinuston unterhalb des Bereichs SMA-BD-VZ-W zu erwähnen, welcher zusätzlich bei sehr günstigen felsmechanischen Bedingungen für einige Lagerkammern genutzt werden könnte.

Das geologische Standortgebiet liegt in der Vorfaltenzone, welche tektonisch teilweise stark überprägt ist, aber auch grössere, weniger gestörte Bereiche aufweist. Die Wirtgesteine weisen eine gute bis sehr gute Barrierenwirkung auf. Die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' wird in allen zugrunde liegenden bevorzugten Bereichen als sehr günstig beurteilt.

Die insgesamt als günstig bewertete Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' beinhaltet eine bedingt günstige Bewertung der Nutzungskonflikte in allen drei zugrunde liegenden bevorzugten Bereichen, vor allem weil unterhalb der Wirtgesteine in der Bohrung Weiach in den Sedimenten des Permokarbons Kohlenwasserstoffe und Kohle nachgewiesen wurden. Das geothermische Potenzial ist mässig.

Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' erhält für den Opalinuston eine sehr günstige, für den 'Braunen Dogger' eine günstige Bewertung (NTB 08-03, S. 338).

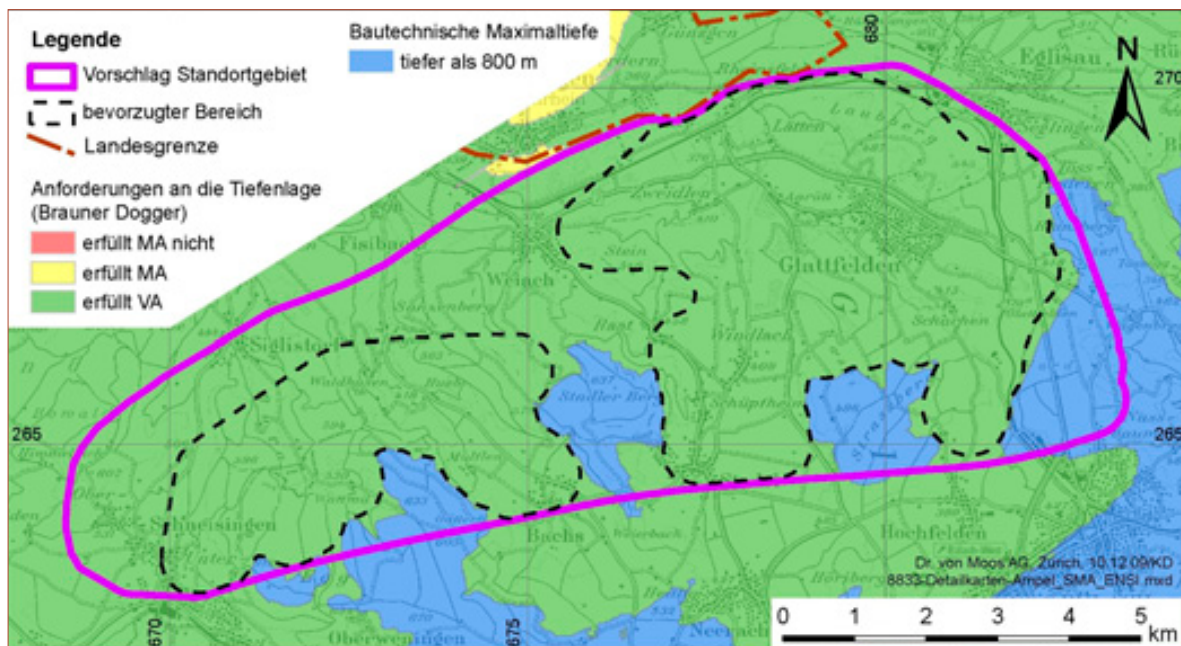
Vor allem der Opalinuston liegt im geologischen Standortgebiet sehr tief und ist somit bautechnisch sehr anspruchsvoll (Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'). Im Süden und Osten des Gebiets wird die Grenze der bautechnischen Machbarkeit erreicht. Die bevorzugten Bereiche des 'Braunen Doggers' im Westen und Osten können eventuell verbunden werden, falls sich die bautechnischen Bedingungen zwischen den beiden bevorzugten Bereichen als geeignet erweisen (geotechnische Bedingungen, exakte Tiefenlage der Lagerebene). Ihre jetzige Trennung ist auf eine vorsichtige Beurteilung der aus Sicht der Bautechnik sehr grossen lokalen Überlagerung zurückzuführen (NTB 08-03, S. 338).

Beurteilung des ENSI

Die Grenzziehung des Gebiets erfolgt im Süden und im Nordwesten durch regionale Störungszonen, im Osten durch die maximale Tiefenlage, im Westen durch eine Zone erhöhter tektonischer Zergliederung und im Nordosten entlang der Landesgrenze. Durch die tektonischen Rahmenbedingungen bliebe nur für einen ca. 3 km langen Abschnitt an der Südostgrenze Spielraum für eine grosszügigere Grenzziehung. Dort ist allerdings die maximale Tiefenlage der Oberkante des «Braunen Doggers» hinsichtlich bautechnischer Machbarkeit von 800 m unter Felsoberfläche erreicht (Dr. von Moos AG 2009b, Figur 6.2-6). Die maximale Tiefenlage wurde von Experten des ENSI überprüft und bestätigt (Amann und Löw 2009).

Der von der Nagra favorisierte Opalinuston nimmt nur einen kleinen Teil im Nordosten des vorgeschlagenen geologischen Standortgebiets ein (Figur 6.2-1). In der Westhälfte wird für den Opalinuston die maximale Tiefenlage hinsichtlich bautechnischer Machbarkeit erreicht, weshalb von der Nagra dort kein eigenständiger, bevorzugter Bereich für das SMA-Lager definiert wurde. Ob bei einer Aufteilung der SMA auf zwei Teillager der Opalinuston allenfalls für einen Teil der SMA genutzt werden könnte, ist aus Sicht des ENSI offen.

Für den von der Nagra bevorzugten Bereich SMA-BD-VZ-W werden die verschärften Anforderungen an den Indikator 'Platzangebot untertags' nur erfüllt, wenn zusätzliche Überlegungen zur effektiv wirksamen Überlagerungshöhe berücksichtigt werden. Dazu stützt sich die Nagra auf eine gesonderte Beurteilung des Bereichs, in welcher die Bezugshöhe (Terrain) zur Berechnung der maximalen Tiefenlage nicht auf das Niveau der Höhenzüge (maximale Überlagerung), sondern auf das realistischere, mittlere Niveau der Geländetopographie gelegt wird. Dadurch kommen grössere Bereiche innerhalb des bautechnisch machbaren Tiefenbereichs zu liegen, und auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten steht noch ausreichend Platz zur Anordnung des SMA-Lagers zur Verfügung. Das ENSI kann diesen Überlegungen zustimmen, bewertet das

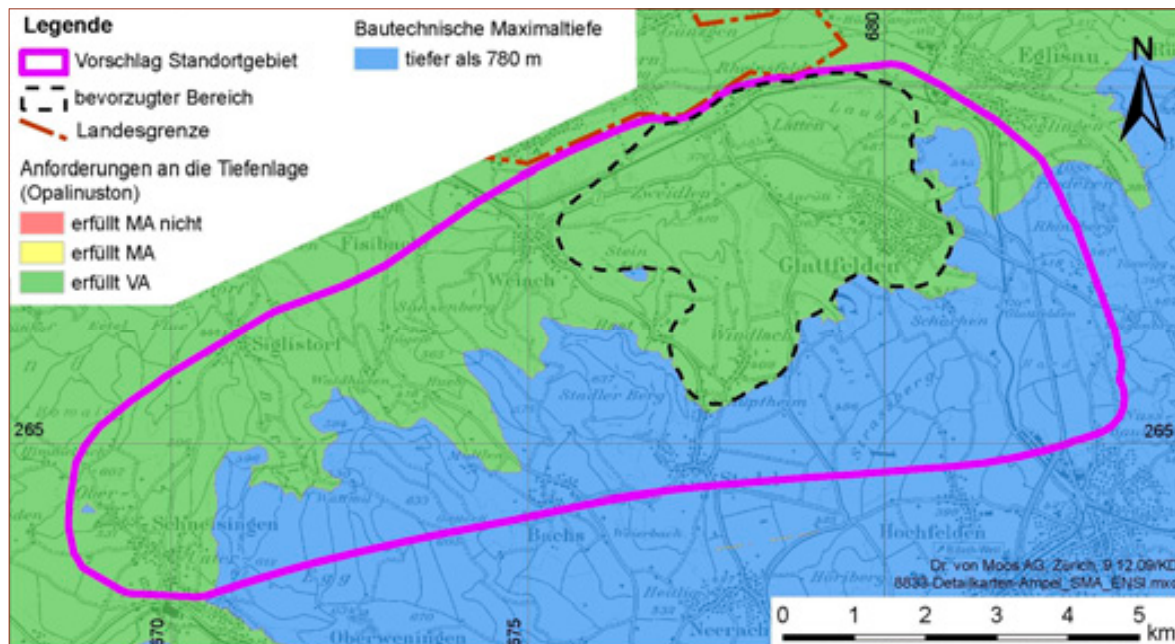


Figur 6.2-6: Tiefenlage des «Braunen Doggers» im SMA-Standortgebiet Nördlich Lägeren (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 250 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 250 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 375 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 375 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 800 m unter Terrain. In den bevorzugten Bereichen werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

untertägige Platzangebot jedoch aufgrund der für den Westbereich herangezogenen Abwägungen etwas kritischer als die Nagra.

Innerhalb des vorgeschlagenen geologischen Standortgebiets schränken vor allem im Nordwesten und im äussersten Nordosten diffus gestörte Zonen (NTB 08-03, Fig. 5.7-4) sowie eine stellenweise zu grosse Tiefenlage der Wirtgesteine «Brauner Dogger» (Figur 6.2-6) bzw. Opalinuston (Figur 6.2-7) die Positionierung eines Lagers innerhalb des Gebiets weiter ein. Während der Erkundung und beim Bau ist damit zu rechnen, dass die angetroffenen lokalen Verhältnisse aufgrund heute nicht bekannter Störungszonen zu Anpassungen der Kavernenpositionierung bzw. -auslegung führen können. Dank der Grösse des Gebiets und der damit verbundenen Flexibilität einer Kavernenpositionierung sind die genannten Einschränkungen für die Bewertung nicht massgebend. Das ENSI kann daher der Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' insgesamt als sehr günstig für alle drei Bereiche mit Opalinuston bzw. «Braunem Dogger» zustimmen.

Das geologische Standortgebiet bietet günstige Eigenschaften hinsichtlich der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'. Als einziges vorgeschlagenes Gebiet wird Nördlich Lägeren von der Nagra hinsichtlich des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' nur als bedingt günstig bewertet, weil gegenwärtig in der Region Weiach Explorationsarbeiten für Kohlenwasserstoffe im Gang sind. Das ENSI folgt daher der Bewertung der Nagra. Das ENSI bewertet ausserdem das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' unter Verweis auf Tabelle 5.2-2 als bedingt günstig.



Figur 6.2-7: Tiefenlage des Opalinustons im SMA-Standortgebiet Nördlich Lägeren (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird für das Gesamtgebiet (d. h. alle drei darin enthaltenen bevorzugten Bereiche) angesichts der schwierigen örtlichen Bedingungen für 3D-Seismik und der tektonischen Zergliederung nur als günstig bewertet.

Aufgrund der vergleichsweise grossen Tiefenlage der Wirtgesteine und ihrer tektonischen Zergliederung wird die Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' von der Nagra wie vom ENSI als bedingt günstig bewertet. Eine inkonsistente Angabe für die Tiefenlage des «Braunen Doggers» (NTB 08-03, S. 262 bzw. 266) ist auf einen Druckfehler zurückzuführen (NAB 09-29). Die Erschliessung des Lagers führt durch die Untere Süsswassermolasse (hier sind Gasvorkommen aufgrund der nördlich der Lägeren steil gestellten Schichten und der geringen Überdeckung wenig wahrscheinlich) und durch Malmkalke mit erhöhtem Karst- und Wassereintrichsrisiko (Emch+Berger AG 2010). Diese Erschwernisse sind jedoch bautechnisch beherrschbar.

Zusammenfassend folgt das ENSI der Gesamtbeurteilung des geologischen Standortgebiets Nördlich Lägeren als geeignet und stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

Bözberg (AG)

Angaben der Nagra

Das geologische Standortgebiet Bözberg ist allseitig durch tektonische Elemente begrenzt. Die Grenzziehung folgt im Süden der Hauptüberschiebung des Faltenjuras, im Norden der Mandacher Überschiebung, und im Osten und Westen Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung. Das geologische Standortgebiet Bözberg hat eine Fläche von 61 km². Das bevorzugte Wirtgestein ist der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen. Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend mit sehr geeignet bewertet. Diese Bewertung basiert auf der detaillierten Bewertung des zugrunde liegenden prioritären Bereichs SMA-OPA-VZ-W.

Das Wirtgestein im geologischen Standortgebiet weist eine sehr gute Barrierenwirkung auf. Sämtliche Kriterien der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' sind sehr günstig bewertet.

Das geologische Standortgebiet liegt in der Vorfaltenzone, welche tektonisch teilweise stark überprägt ist, aber insbesondere im Gebiet Bözberg auch wenig gestörte Bereiche aufweist. Die Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' und 'Erosion' werden sehr günstig beurteilt. Beim Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' ergibt sich die insgesamt günstige Bewertung durch das bedingt günstige 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas'. Beim Kriterium 'Nutzungskonflikte' ergibt sich die insgesamt günstige Bewertung aufgrund der bedingt günstigen Bewertung der Indikatoren 'Rohstoffvorkommen unterhalb bzw. oberhalb des Wirtgesteins' und 'Geothermie'. Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird als günstig bewertet.

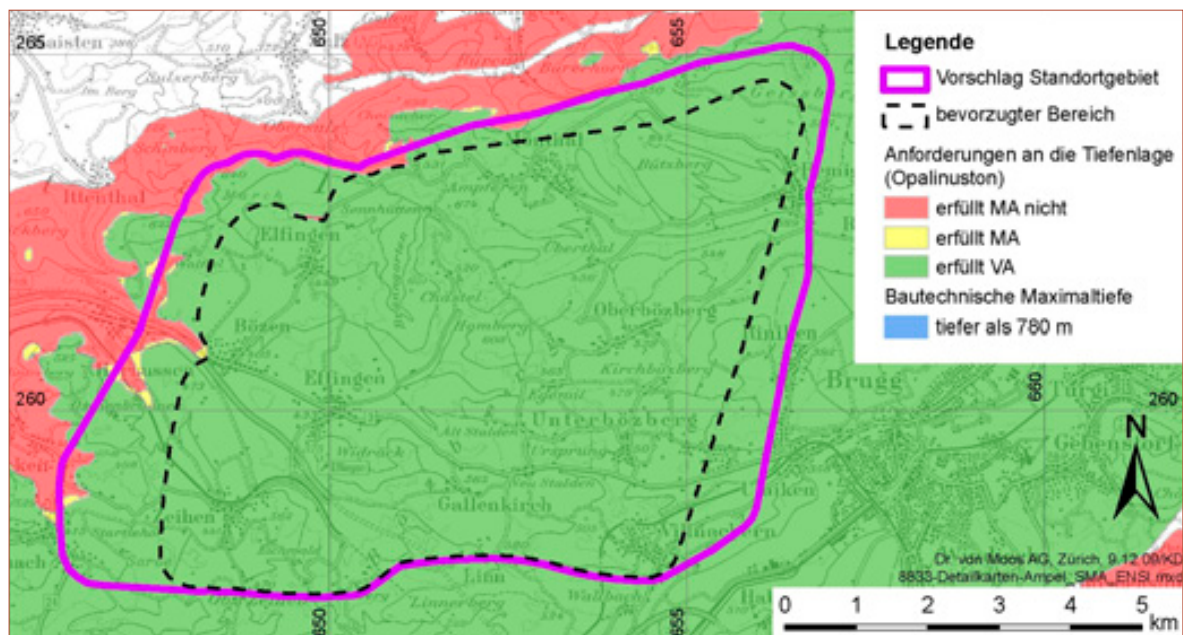
Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' ist sehr günstig bewertet. Generell ist der Opalinuston relativ ruhig gelagert und fällt leicht nach Süden ein, was eine optimale Anordnung der Lagerkammern begünstigt (Orientierung bezüglich Hauptspannungen, horizontale Lagerebene). Die Übergänge zu den Zonen mit Anzeichen für erhöhte tektonische Zergliederung sind nicht klar definiert. Der Opalinuston liegt im ganzen geologischen Standortgebiet mässig tief und ist somit bautechnisch günstig. Der Indikator 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' wird aufgrund lokaler Zergliederung nur mit bedingt günstig bis günstig beurteilt.

Generell sind die Raumverhältnisse für die Aufnahme des umhüllenden Abfallinventars geeignet und weisen diesbezüglich Reserven auf; das potenzielle Platzangebot wird im Opalinuston auf ungefähr das 16-Fache des umhüllenden Abfallinventars geschätzt (NTB 08-03, S. 340).

Beurteilung des ENSI

Die erforderliche minimale und maximale Tiefenlage und die Mächtigkeit des Wirtgesteins wurden durch die Experten des ENSI überprüft und bestätigt (Figur 6.2-8, Dr. von Moos AG 2009b). Die bautechnisch maximale Tiefenlage des Wirtgesteins wird nirgends erreicht.

Im zentralen Bereich Oberbözberg-Effingen sind in den Profilen (NTB 08-03, S. 341; NTB 08-04, Beilagen 5.2-16 und 5.2-17) vor allem im tieferen Untergrund (Muschelkalk) eine Aufschiebung



Figur 6.2-8: Tiefenlage des Opalinustons im SMA-Standortgebiet Bözberg (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis \geq 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis \geq 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder Basis \geq 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), blau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

und Schichtverstellungen zu erkennen. Im Nordosten des Gebiets streicht bei Remigen eine Überschiebung bis an die Gebietsgrenze heran (NTB 08-03, S. 341). Im seismischen Profil 83-NF-31ST (NTB 08-04, Beilage 5.2-14) ist die Struktur aus Sicht des ENSI als Zone unruhiger Reflektoren zu erkennen. Sie wurde von der Nagra nicht in das geologische Profil projiziert. Es ist damit zu rechnen, dass diese Struktur in das Gebiet Bözberg hineinreicht und damit im nordöstlichen Bereich das Platzangebot einschränkt und die bautechnische Machbarkeit erschwert. Es verbleibt im geologischen Standortgebiet dennoch ein rund achtfaches, sehr günstiges 'Platzangebot untertags' bestehen. Insgesamt kann das ENSI der Bewertung der Nagra für die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' als sehr günstig folgen.

Hinsichtlich der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' ist anzumerken, dass zusätzlich zu den von der Nagra genannten Nutzungskonflikten (wahrscheinlich vorhandene Kohlenwasserstoffressourcen, NTB 08-03, S. 264) ein Abbau der Effinger Schichten am Homberg projektiert ist. Würden durch diesen und allenfalls benachbarte Steinbrüche die Effinger Schichten grossräumig und vollständig, d. h. bis ca. 120 m unterhalb der Talsohle entfernt, stünden dort nur noch etwa 135 m Überdeckung des Wirtgesteins Opalinuston zur Verfügung, und die Mindestanforderung an den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion' wäre nicht mehr erfüllt. Da es genügend andere, oberflächennähere Abbaumöglichkeiten gibt (NAB 09-29), ist dieses extreme Szenario nach Ansicht des ENSI zwar für spätere Zeiten (> 1'000 Jahre) unwahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen. Ein Abbau bis auf das Niveau der Talsohlen erscheint weniger unwahrscheinlich, aber die Mindestanforderung an die Tiefenlage würde in diesem Fall eingehalten. Der Einrichtung von Schutzzonen kommt in diesem geologischen Standortgebiet

besonders hohe Bedeutung zu. Das ENSI bewertet das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wegen des nicht auszuschliessenden Abbaus von Zementrohstoffen oberhalb des Wirtgesteins nur als bedingt günstig. Die Kohlevorkommen im Permokarbondrog unterhalb des Standortgebietes befinden sich in mehreren Kilometern Tiefe und sind zurzeit für einen Abbau wenig attraktiv. Die insgesamt günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird vom ENSI geteilt.

Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird seitens ENSI unter Verweis auf Tabelle 5.2-2 nur als bedingt günstig bewertet. Die insgesamt günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird vom ENSI geteilt.

Das ENSI stimmt der Bewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' als sehr günstig zu. Allerdings bewertet das ENSI das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' aufgrund der topographischen Verhältnisse nur als günstig.

Der Opalinuston weist in der Vorfaltenzone nur bedingt günstige felsmechanische Eigenschaften auf. Diese Nachteile werden jedoch durch eine geringe, bautechnisch günstige Tiefenlage und die Möglichkeit, das Lager von den Tälern her ohne Durchfahrung der teilweise verkarsteten Malmkalke zu erschliessen, teilweise ausgeglichen. Der insgesamt günstigen Bewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' seitens Nagra kann das ENSI folgen.

Zusammenfassend folgt das ENSI der Gesamtbeurteilung des geologischen Standortgebiets Bözberg als sehr geeignet und stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

Jura-Südfuss (SO, AG)

Angaben der Nagra

Das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss hat eine Fläche von 65 km². Innerhalb des geologischen Standortgebiets kommen sowohl der Opalinuston mit seinen Rahmengesteinen als auch die Effinger Schichten als Wirtgestein in Frage. Dabei ist es offen, ob das ganze SMA-Lager jeweils im Opalinuston oder in den Effinger Schichten angeordnet oder ob das SMA-Lager auf beide Wirtgesteine aufgeteilt würde. Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend als geeignet bewertet. Diese Bewertung basiert auf der detaillierten Bewertung des zugrunde liegenden prioritären Bereichs SMA-EFF-SJ-O und des bevorzugten Bereichs SMA-OPA-SJ-O.

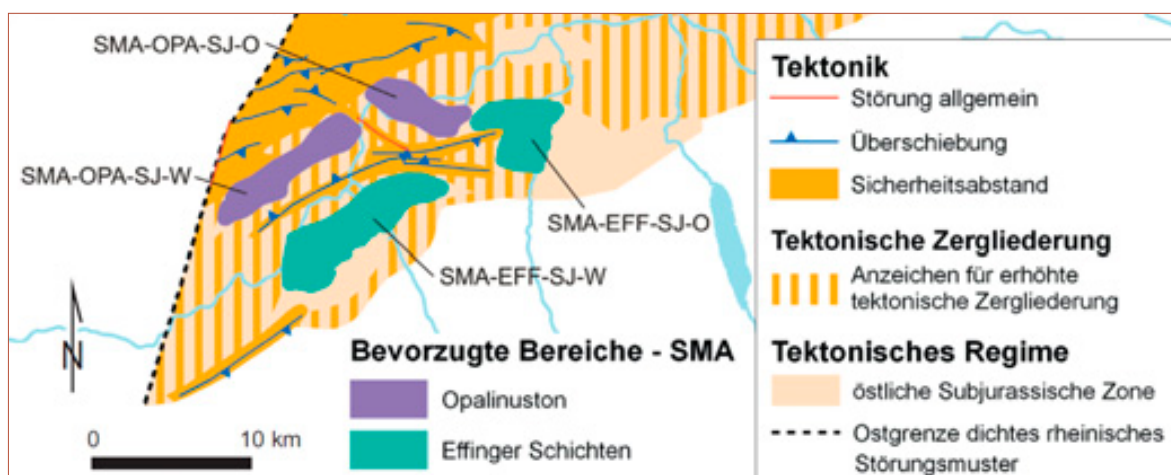
Die Wirtgesteine im geologischen Standortgebiet weisen eine gute (Effinger Schichten) bis sehr gute (Opalinuston) Barrierenwirkung auf. Das geologische Standortgebiet liegt in der östlichen Subjurassischen Zone und ist tektonisch teilweise stark überprägt. Dies äussert sich neben den regionalen tektonischen Elementen (Störungssysteme der Born-Engelberg-Antiklinale im Süden, Faltenjura im Norden) auch in Zonen mit Anzeichen einer erhöhten tektonischen Zergliederung, welche weitere Störungen mit regionalem Charakter enthalten dürfte, deren Verlauf mit den heute vorhandenen Daten nicht eruiert werden kann. Zudem bestehen Ungewissheiten, inwieweit sich die Störungen der Born-Engelberg-Antiklinale gegen Osten fortsetzen. Auch ausserhalb der identifizierten Störungen sind die Wirtgesteinsschichten leicht deformiert und verfaltet sowie grossräumig

nur mässig ruhig gelagert. Im nordwestlichen Teil fallen die Schichten generell etwas steiler ein als im Süden, und auch die Streichrichtung variiert im Vergleich zu den anderen geologischen Standortgebieten relativ stark. Die Wirtgesteinsgeometrie bietet keine optimalen Bedingungen für die Anordnung der Lagerkammern (Orientierung bezüglich Hauptspannungen, horizontale Lager ebene). Die Wirtgesteinsschichten liegen im geologischen Standortgebiet mässig bis sehr tief, was unter Berücksichtigung der tektonischen Überprägung vor allem im Opalinuston bautechnisch anspruchsvoll ist. Die Raumverhältnisse sind geeignet für die Aufnahme des umhüllenden Abfallinventars und weisen diesbezüglich unter Inkaufnahme von nicht optimaler Lageranordnung Reserven auf: Das potenzielle Platzangebot wird im Opalinuston auf ungefähr das Zweifache des umhüllenden Abfallinventars, in den Effinger Schichten auf das Vierfache geschätzt (NTB 08-03, S. 342).

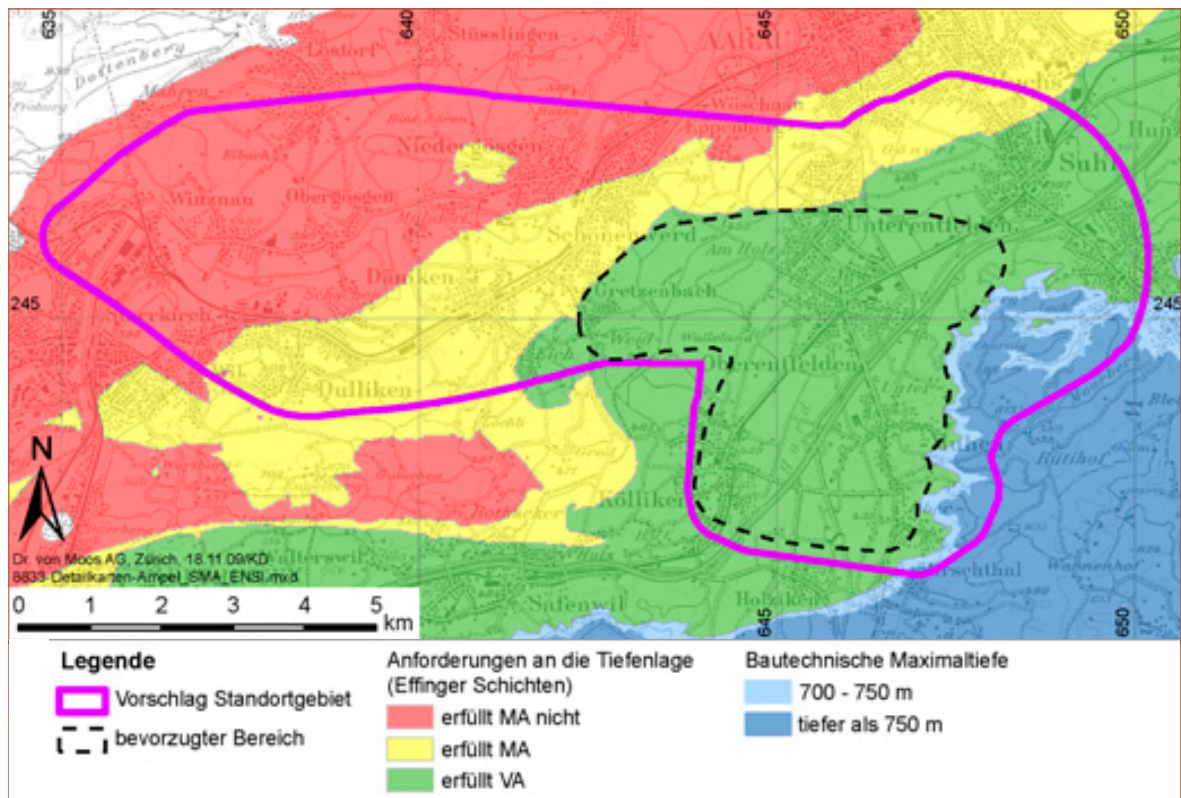
Beurteilung des ENSI

Das von der Nagra vorgeschlagene geologische Standortgebiet umfasst die beiden nebeneinander liegenden bevorzugten Bereiche SMA-OPA-SJ-O mit Opalinuston im Nordwesten und SMA-EFF-SJ-O mit den Effinger Schichten im Südosten (Figur 6.2-1). Nachdem das ENSI das von der Nagra angewandte Verfahren zur Prioritätensetzung und Definition der geologischen Standortgebiete als in seiner Methodik nachvollziehbar beurteilt (Kapitel 6.1), wird im Folgenden das vorgeschlagene geologische Standortgebiet zunächst aufgrund der einbezogenen bevorzugten Bereiche beurteilt. Anschliessend prüft das ENSI, inwiefern die von der Nagra zurückgestellten, bevorzugten Bereiche SMA-OPA-SJ-W und SMA-EFF-SJ-W (Figur 6.2-9) im Detail mit den östlich davon liegenden Bereichen im Standortgebietsvorschlag der Nagra sicherheitstechnisch gleichwertig sind. Das ENSI prüft insbesondere, ob durch die Vielfalt der Wirtgesteine und die Flexibilität bei der Kombination von Wirtgesteinen im vorgeschlagenen geologischen Standortgebiet ein Sicherheitsgewinn erreicht wird.

Die Grenzziehung für die vier bevorzugten Bereiche folgt überwiegend tektonischen Elementen (regionale Störungszonen, Born-Engelberg-Antiklinale, Südrand des Faltenjuras, Zonen erhöhter tektonischer Zergliederung). Die erforderliche minimale und maximale Tiefenlage und die Mächtigkeit wurden für beide Wirtgesteine in allen vier bevorzugten Bereichen überprüft (Dr. von Moos AG 2009b). Gegen Südosten werden die Bereiche der Effinger Schichten (Figuren



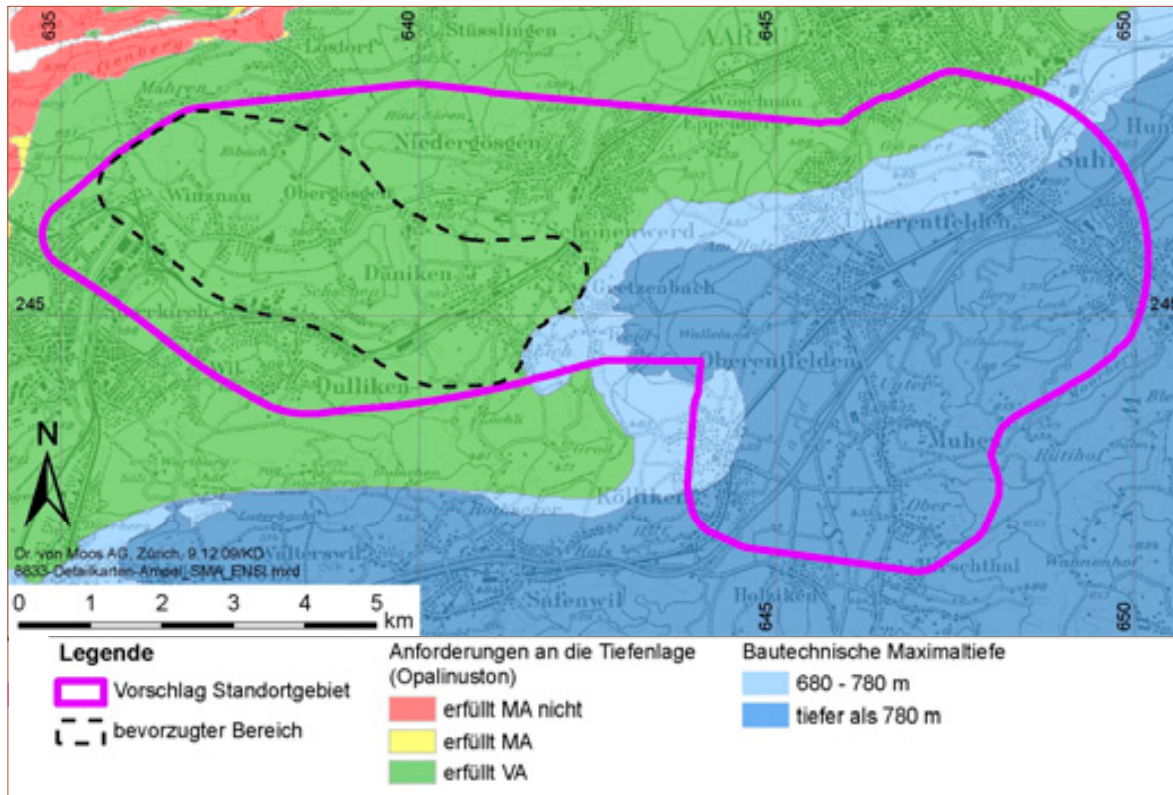
Figur 6.2-9: Karte der vier bevorzugten Bereiche und deren Abkürzungen im Grossraum der östlichen Subjurasischen Zone (modifiziert nach NTB 08-03, Fig. 5.4-1).



Figur 6.2-10: Tiefenlage der Effinger Schichten im SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 300 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis \geq 300 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis \geq 500 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder Basis \geq 500 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 700 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 750 m. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

6.2-10 und 6.2-12) jeweils durch die maximale Tiefenlage hinsichtlich bautechnischer Machbarkeit begrenzt. Die bevorzugten Bereiche mit Opalinuston (Figuren 6.2-11 und 6.2-13) werden ausschliesslich durch tektonische Elemente begrenzt.

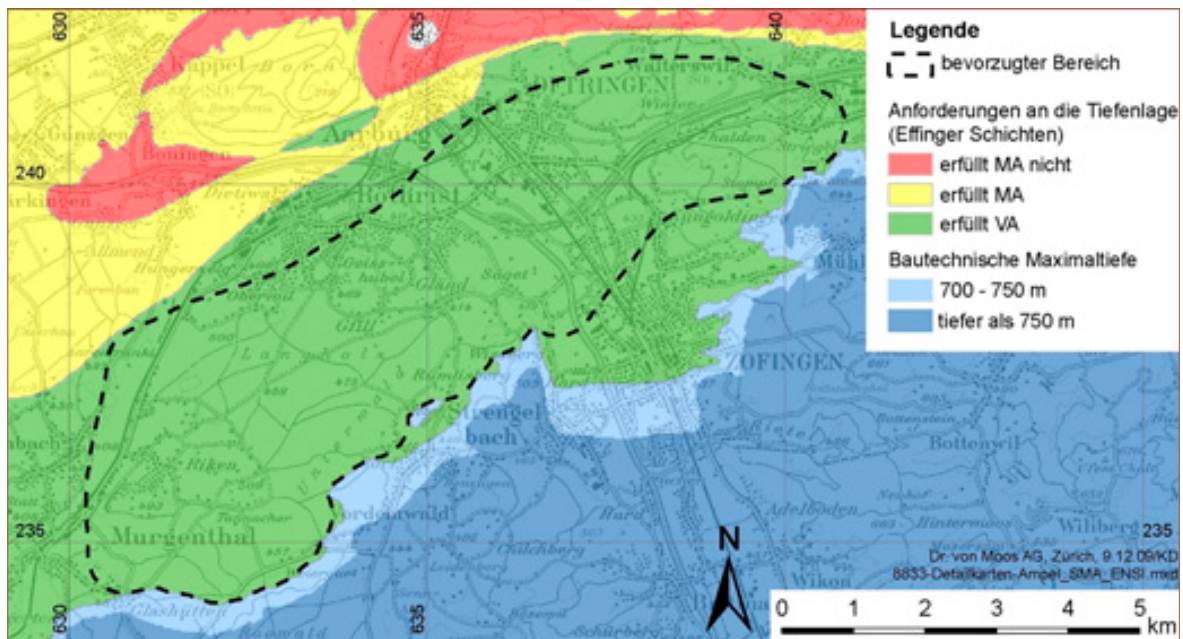
Die Bewertung der Nagra als sehr günstig (Bereich SMA-OPA-SJ-O) bzw. günstig (Bereich SMA-EFF-SJ-O) für die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist für das ENSI nachvollziehbar. Der Indikator 'Platzangebot untertags' im bevorzugten Bereiche SMA-EFF-SJ-O wird seitens ENSI als nur bedingt günstig angesehen. Das 'Platzangebot untertags' wird seitens Nagra als günstig beurteilt (NTB 08-03, S. 343, 406). Das Zentrum des Bereichs SMA-EFF-SJ-O liegt jedoch direkt in der östlichen Verlängerung (Streichrichtung) der Born-Engelberg-Antiklinale und ihren randlichen Aufschiebungen (NTB 08-03, S. 343). Eine mögliche Verlängerung dieser Struktur bis in das geologische Standortgebiet hinein wird auch von der Nagra nicht ausgeschlossen (NTB 08-03, S. 342). Tatsächlich zeigen sich im seismischen Profil 83-SE-12 (NTB 08-04, Beilage 5.2-12) Anzeichen unruhiger Reflektoren, die die Ausläufer einer Fortsetzung nach Osten darstellen könnten. Das seismische Profil liegt hier ca. 3 km vom eingezeichneten östlichen Ende der Born-Engelberg-Antiklinale entfernt. Bei einer Fortsetzung tektonisch beanspruchter Gesteine im Untergrund gegen Osten würde die räumliche Ausdehnung des Bereichs deutlich eingeschränkt.



Figur 6.2-11: Tiefenlage des Opalinustons im SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 680 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird von der Nagra für den bevorzugten Bereich mit Effinger Schichten als günstig, für den bevorzugten Bereich mit Opalinuston als sehr günstig bewertet. Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass langfristig die Gefahr der Verkarstung der Effinger Schichten zu berücksichtigen ist. Zurzeit sind aus Tiefenlagen > 200 m in den Effinger Schichten keine Beobachtungen von Verkarstungen dokumentiert. Unter Verweis auf Tabelle 5.2 2 bewertet das ENSI ausserdem das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' nur als bedingt günstig. Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' im Bereich der Effinger Schichten wird aus Sicht des ENSI nur als günstig bewertet. Sowohl für Geothermie als auch für Kohlenwasserstoffe dürfte der tektonisch beanspruchte Untergrund auch in Zukunft für die Prospektion ein gewisses Potenzial haben, so dass sich aus Sicht des ENSI eine sehr günstige Einschätzung nicht rechtfertigt.

Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird von der Nagra für den Bereich mit Opalinuston als sehr günstig, für den Bereich mit Effinger Schichten als günstig bewertet. Das ENSI sieht die Verhältnisse für Sondierbohrungen und seismische Erkundungen grundsätzlich in beiden Gebieten als gleichwertig an (starke Besiedlung, diverse quartäre Bedeckungen) und würde daher beide Gebiete gleich, d. h. als bedingt günstig bewerten. Auf die aggregierte Bewertung der Kriteriengruppe hat dies den Einfluss, dass der bevorzugte Bereich SMA-EFF-SJ-O seitens ENSI nur als bedingt günstig bewertet wird.

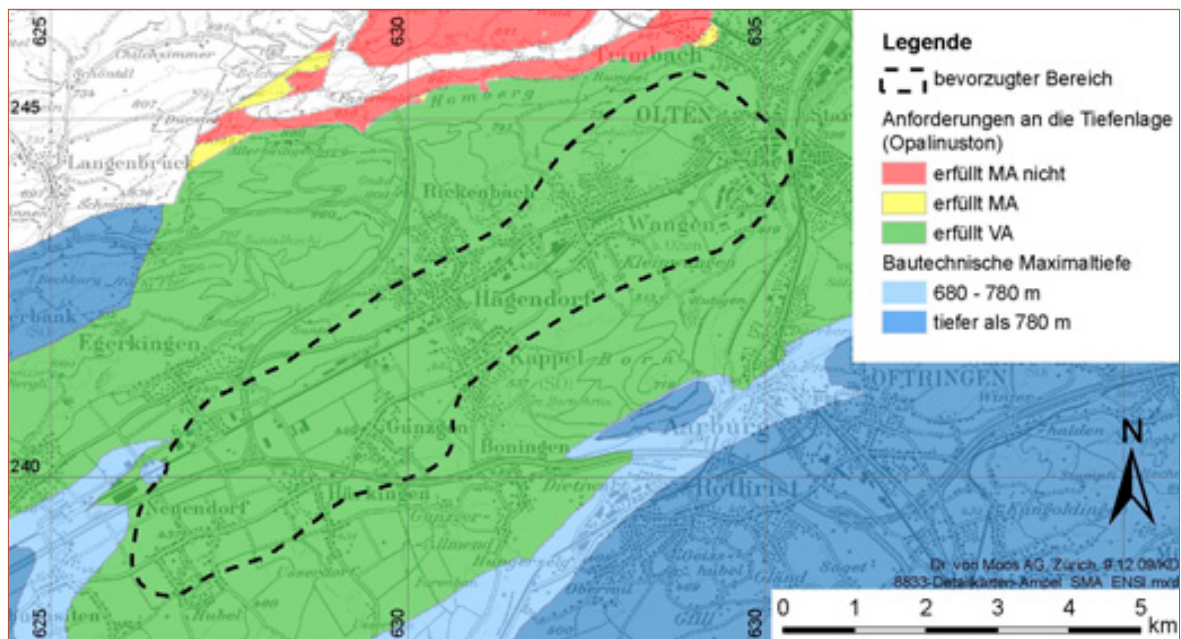


Figur 6.2-12: Tiefenlage der Effinger Schichten im bevorzugten Bereich SMA-EFF-SJ-W (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 300 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis \geq 300 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis \geq 500 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder Basis \geq 500 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 700 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 750 m. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen an die Tiefenlage (VA) erfüllt.

Die Kriterien­gruppe 'Bautechnische Eignung' wird von der Nagra für die bevorzugten Bereiche im geologischen Standortgebiet je als bedingt günstig bewertet. Die in den seismischen Profilen vorhandenen Anzeichen tektonischer Zergliederung (sichtbar in den vielfachen Flächen erhöhter tektonischer Zergliederung, Figur 6.2-9) wirken sich aus Sicht des ENSI direkt auf die bautechnische Standfestigkeit der Wirtgesteine aus (Amann und Löw 2009) und rechtfertigen auch aus Sicht des ENSI eine nur bedingt günstige Bewertung der Bereiche im geologischen Standortgebiet bezüglich des Indikators 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften'. Daneben sind auch die Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' und 'Geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen' als bedingt günstig zu bewerten (Emch+Berger AG 2010).

Im Folgenden werden die westlichen und östlichen Bereiche miteinander verglichen. Die westlichen bevorzugten Bereiche wurden dazu ebenfalls bezüglich der Tiefenlage der Wirtgesteine dargestellt (Figuren 6.2-12 und 6.2-13).

Bei den konfigurationsspezifisch betrachteten Indikatoren der Kriterien­gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' zeigen sich zwischen West- und Ost-Bereichen nur geringe Unterschiede. Der Indikator 'Platzangebot untertags' im bevorzugten Bereiche SMA-EFF-SJ-O wird seitens ENSI spezifisch für den Ost-Bereich wegen der vermuteten Fortsetzung der Born-Engelberg-Antiklinale als nur bedingt günstig, angesehen. Der west-



Figur 6.2-13: Tiefenlage des Opalinustons im bevorzugten Bereich SMA-OPA-SJ-W (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis \geq 270 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis \geq 270 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit \leq 100 m) oder Basis \geq 370 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top < 680 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 780 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen an die Tiefenlage (VA) erfüllt.

liche bevorzugte Bereich der Effinger Schichten liegt nicht in Streichrichtung einer nachgewiesenen regionaltektonischen Struktur.

Bei den konfigurationsspezifischen Indikatoren zur Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' zeigen sich zwischen West- und Ost-Bereichen nur bezüglich des Indikators 'Geothermie' deutliche Unterschiede in der Bewertung. Das geothermische Potenzial wird im Westen als bedingt günstig, im Osten als günstig bewertet. Das geothermische Potenzial im Westen ist mässig und wird genutzt (NTB 08-03, S. 289), im Osten ist das geothermische Potenzial gering (NTB 08-03, S. 280). Der Indikator 'Geothermie' ist in den Effinger Schichten aufgrund der Geothermiebohrung Oftringen (51°C in 700 m Tiefe, NAB 08-13) aus Sicht des ENSI zu Recht nur als bedingt günstig zu bewerten. Die Ausdehnung dieser geothermischen Anomalie ist in Figur 5.4-3 aus NTB 08-03 nicht sichtbar (da in ihrer Ausdehnung nicht bekannt). Das ENSI bewertet aber das Kriterium 'Nutzungskonflikte' auch für das Ost-Gebiet als günstig, so dass hier kein Unterschied zwischen Ost und West entsteht. Sowohl in den West- als auch Ost-Bereichen bewertet das ENSI das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' nur als bedingt günstig (abweichende Bewertungen der Indikatoren 'Auflockerungszone' und 'Chemische Wechselwirkung').

Konfigurationsspezifisch ist bei der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' nur der Indikator 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' zu berücksichtigen, der wegen der oft dichten Besiedlung, den Gewässerböden der Aare, Suhre und Dünern sowie der in den Haupttälern vorhandenen Quartärmächtigkeit von der Nagra als bedingt günstig, im Bereich

SMA-EFF-SJ-O als günstig bewertet wird. Der Unterschied in der Bewertung ist aufgrund der Angaben der Nagra (NTB 08-03, S. 280 bzw. S. 290) für das ENSI nicht zwingend, d. h. das ENSI sieht die Verhältnisse für Sondierbohrungen und seismische Erkundungen grundsätzlich in allen Gebieten als gleich beschränkt an und würde daher alle Gebiete gleich, d. h. als bedingt günstig bewerten.

Bei der Bewertung der konfigurationsspezifischen Indikatoren zur Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' zeigt sich zwischen West- und Ost-Bereichen nur ein Unterschied für den Indikator 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit', der im westlichen bevorzugten Bereich mit Opalinuston nur mit bedingt günstig bewertet wird, wohingegen die Bewertung im Osten bedingt günstig bis günstig ist. Die von der Nagra angeführten Unterschiede der Tiefenlage sind aus Sicht des ENSI zwar gegeben, aber rechtfertigen den deutlichen Unterschied der Wertung nicht, so dass das ENSI auch für SMA-OPA-SJ-O eine bedingt günstige Bewertung einsetzen würde. Die erhöhte Gebirgstemperatur, welche in der Bohrung Oftringen gemessen wurde, muss bei der bautechnischen Machbarkeit für die infrage kommende Tiefenlage im bevorzugten Bereich SMA-EFF-SJ-W berücksichtigt werden (Emch+Berger AG 2010). Das ENSI ist daher mit einer bedingt günstigen Bewertung der Kriteriengruppe einverstanden. Das ENSI hat ausserdem mit Hilfe der seismischen Profile sorgfältig abgeklärt, ob sich allenfalls ein Gradient in der tektonischen Zergliederung von Ost nach West findet. Ein solcher konnte jedoch nicht nachgewiesen werden.

Ein Gesamtvergleich der Bewertungen aller Kriterien zeigt mit einer Ausnahme (Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' des östlichen Effinger Schichten-Bereichs) keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Bewertungen der Nagra und des ENSI auf Stufe Kriterium. Das ENSI kommt zum Schluss, dass es zwischen den bevorzugten Bereichen mit Opalinuston einerseits und den bevorzugten Bereichen mit Effinger Schichten andererseits im Einklang mit der Nagra einen deutlichen Unterschied in der sicherheitstechnischen Bewertung zugunsten der Opalinuston-Bereiche gibt. Diese besitzen hauptsächlich ein besseres Einschlussvermögen gegenüber den Effinger Schichten. Wie die Nagra beurteilt das ENSI die Westgebiete wirtgesteinspezifisch nicht ungünstiger als die Ostgebiete. Die bevorzugten Opalinuston-Bereiche im Jura-Südfuss sind sicherheitstechnisch weniger günstig als z.B. die Opalinuston-Bereiche im Tafeljura. Nur bei den Ost-Bereichen ist die Möglichkeit der Kombination zweier Wirtgesteine (Effinger Schichten und Opalinuston) vorhanden. Die Möglichkeit der Kombination der beiden Wirtgesteine stellt aus Sicht des ENSI einen Gewinn an Flexibilität dar (NAB 09-29), der sich auf die Sicherheit eines Lagers in diesem geologischen Standortgebiet positiv auswirken kann. Das ENSI ist daher mit dem von der Nagra vorgeschlagenen geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss einverstanden.

Wellenberg (NW, OW)

Angaben der Nagra

Das geologische Standortgebiet Wellenberg hat eine Fläche von rund 16 km² und das Wirtgestein eine Mächtigkeit von mindestens 1'000 m, unter dem Eggeligrat bis zu 1'700 m. Das bevorzugte Wirtgestein ist die tektonische Akkumulation von Mergel-Formationen des Helvetikums (Palfris-Formation und Vitznau-Mergel der Drusberg-Decke sowie tertiäre Tonmergel der Axen-Decke). Das geologische Standortgebiet wird zusammenfassend mit geeignet bewertet.

Das geologische Standortgebiet liegt in den tektonisch stark beanspruchten Alpen; die Akkumulation des Wirtgesteins zeichnet sich durch eine beschränkte laterale Ausdehnung (Nord-Süd rund 2 km, Ost-West rund 3 km) und eine grosse Mächtigkeit von dichten tektonisch überprägten Mergeln mit zerscherten Kalkbankabfolgen aus. Es wird im Norden durch die Kalke der Drusberg-Decke und im Süden durch Kalke und Sandsteine der Axen-Decke begrenzt. Die Grenzziehung im Westen und im Osten ist nicht zwingend; die Grenzen wurden am Westrand des Haupttals der Engelberger Aa und etwas östlich des Secklisbach-Tals bei Oberrickenbach gezogen, weil dort die ersten grossen Kalkschuppen als Fremdgesteinseinschlüsse im Wirtgestein nachgewiesen sind.

Generell sind die Raumverhältnisse für die Aufnahme des umhüllenden Abfallinventars geeignet und weisen diesbezüglich Reserven auf; das robuste Platzangebot wird unter Ausnutzung mehrerer Lagerebenen ungefähr auf das Zweifache des umhüllenden Abfallinventars geschätzt. Das Wirtgestein im geologischen Standortgebiet weist eine gute Barrierenwirkung auf. Aufgrund der lateralen Ausdehnung und der grossen Mächtigkeit des Wirtgesteinskörpers besteht eine hohe Flexibilität, was eine optimale Anordnung der Lagerkammern begünstigt. Die Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' wird als sehr günstig beurteilt.

Die Kriterien-Gruppe 'Langzeitstabilität' wird insgesamt als günstig bewertet. Die Bewertung für das Kriterium 'Erosion' fällt günstig aus, weil im relevanten Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren die erwarteten Hebungsraten maximal im Hektometerbereich liegen und die Überdeckung überall mindestens 400 m beträgt. Auch die mehrfache glaziale Übertiefung des Engelbergertals in der Vergangenheit hat nicht zu einer erheblichen Beeinträchtigung des Wirtgesteinskörpers geführt (NTB 08-03, S. 294). Aufgrund der Effekte lokaler Erosion und der zu erwartenden differenziellen Hebung (20 m zwischen Wolfenschiessen und Luzern in 100'000 Jahren, NTB 96-01) wird eine Lagertiefe unterhalb der Sohle des Haupttals in Betracht gezogen (NTB 08-04, S. 376).

Das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' wird unter Einbezug der Erkundung mittels Sondierstollen insgesamt als bedingt günstig bis günstig beurteilt. Die Bedingungen für seismische Untersuchungen von der Oberfläche aus sind durch die geologisch-tektonische Situation und die Topographie in erheblichem Masse erschwert bzw. nicht zielführend, da keine adäquaten Reflektoren vorhanden sind. Deshalb wird auf eine Bewertung des Indikators 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' verzichtet. Der Indikator 'Kontinuität der interessierenden Schichten' ist auf tektonische Akkumulationen nicht anwendbar und wird für den Bereich SMA-MG-HEL nicht bewertet (NTB 08-03, S. 295).

Die bautechnischen Bedingungen sind in Bezug auf die Gesteinsfestigkeiten und die Erschliessung günstig; die Möglichkeit von Erdgasfreisetzung verlangt jedoch beim Bau und beim Betrieb spezielle Massnahmen.

Beurteilung des ENSI

Die Grenzziehung des Gebiets erfolgt im Norden und Süden durch Lithologiewechsel (wobei das Nordfallen der Schichtgrenzen berücksichtigt wird) und im Osten durch die ersten bekannten

grossen Fremdgesteinseinschlüsse (NTB 08-03, S. 292, 344). Der Indikator 'Diffus gestörte Zonen' wurde zur Eingrenzung der flächenhaft vorkommenden Wirtgesteine entwickelt und daher zu Recht nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.4). Das ENSI stimmt den Standortgebietsgrenzen zu.

Das geologische Standortgebiet Wellenberg ist nach heutigem Kenntnisstand eine in seiner Ausdehnung einzigartige tektonische Akkumulation von geringdurchlässigen, aber noch nicht anchizonal überprägten Mergelgesteinen im Grossraum der Alpen, welche durch ihre vertikale Mächtigkeit trotz der geringen lateralen Ausdehnung genügend Platzreserven aufweist. Im Unterschied zum früheren Projekt Wellenberg ist der zur Verfügung stehende Raum nicht mehr durch die Voraussetzung einer horizontalen Erschliessung eingeschränkt (HSK 30/9, S. 8).

Unter der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist nach Ansicht der ENSI der Indikator 'Platzangebot untertags' sorgfältig abzuschätzen, da je nach bautechnischen Eigenschaften vor Ort allenfalls die maximal geeignete

Warum der Oberbauenstock kein geologisches Standortgebiet ist

Die Nagra hat 1985 die grundsätzliche Machbarkeit der sicheren Entsorgung der SMA am Beispiel des Wirtgesteins der Palfris-Formation am Oberbauenstock im Kanton Uri aufgezeigt (Entsorgungsnachweis Projekt Gewähr). Der Nachweis wurde von den Behörden geprüft und 1988 durch den Bundesrat als erbracht anerkannt. Der damalige Entsorgungsnachweis ging mit 200'000 m³ vom gleichen Abfallvolumen für SMA aus, wie es heute von der Nagra unter Berücksichtigung des umhüllenden Abfallinventars angegeben wird. Es stellt sich daher die Frage, warum der Oberbauenstock als Standortgebiet von der Nagra im Rahmen des Sachplans nicht mehr vorgeschlagen wurde.

Am Oberbauenstock wie am Wellenberg liegt eine Akkumulation von Mergeln der Palfris-Formation vor. Im Unterschied zum Wellenberg ist das Mergelvorkommen am Oberbauenstock viel kleiner und lateral wie vertikal stark beschränkt. Das von der Nagra gemäss den Vorgaben des Sachplans vorgelegte, seit damals stark geänderte Lagerkonzept sieht grössere Platzreserven vor: Insbesondere durch die lateralen Mindestabstände von 100 m zwischen den Lagerkavernen, die bevorzugten

Kavernenlängen von 200 m und die erforderliche laterale Ausdehnung des Wirtgesteins von



1 x 3 km werden heute höhere Anforderungen an die Platzverhältnisse des SMA-Lagers gestellt, die deutlich mehr Fläche als damals verlangen. Dazu kommt, dass die Platzverhältnisse im Sinne einer sicherheitsgerichteten Auslegung mindestens die doppelte laterale Ausdehnung umfassen müssen.

Zur Sicherstellung des langzeitlichen Schutzes vor Erosion wird unter Berücksichtigung von Dekompaktionsprozessen eine Überdeckung von mindestens 600 m gefordert. Wie am Wellenberg, sind die tektonischen Verhältnisse am Oberbauenstock komplex. Da die Akkumulation von Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg vertikal eine Ausdehnung von über 1200 m erreicht, ist hier auch eine mehrstöckige Lagerauslegung möglich, was am Oberbauenstock nicht der Fall ist. Die Platzverhältnisse am Oberbauenstock zeigen, dass bereits eine einfache Lagergeometrie (entsprechend einer Mindestfläche von 3 km² in Schritt 5) am Oberbauenstock aus Platzgründen kaum realisierbar ist. D. h. es verbliebe damit auch kein planerischer Spielraum, eventuell angebotenen geologischen Schwierigkeiten (z. B. Fremdgesteinseinschlüssen oder grösseren Störungsflächen) auszuweichen.

Grösse der Lagerkavernen zu beschränken ist (Emch+Berger AG 2010). Ausserdem bezieht die Nagra den Tiefenbereich 400 m bis 500 m unter Terrain, in welchem nach Ansicht des ENSI noch mit entlastungsbedingter Dekompaktion zu rechnen ist (ENSI 33/43, Kapitel 3.4), in die Ermittlung des robusten Platzangebots mit ein (Nagra 2009b). Das ENSI erachtet eine Lagerplatzierung unter dem Niveau des heutigen lokalen Vorfluters für sinnvoll.

In Analogie zum Indikator 'Abstand zu regionalen Störungszonen' hält das ENSI einen lateralen Abstand zu den potenziell durchlässigen Kalksteinen der Axen- und Drusbergdecke von jeweils 200 m für notwendig, um den Ungewissheiten im genauen Verlauf dieser Deckengrenzen Rechnung zu tragen. Weitere Ungewissheiten bestehen ferner auch bezüglich möglicher Fremdgesteinseinschlüsse im Wirtgestein. Diese Gründe führen dazu, dass das Platzangebot weiter eingeschränkt wird. Der Indikator 'Platzangebot untertags' wird vom ENSI daher nur als bedingt günstig beurteilt. Zusammen mit der grossen Mächtigkeit der helvetischen Mergel am Wellenberg kommt das ENSI für das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' zur Bewertung günstig im Gegensatz zu sehr günstig der Nagra.

Der Indikator 'Grundwasserstockwerksbau' in der Definition der Nagra (NTB 08-05, S. A1-38) ist aus Sicht des ENSI nicht auf lokale tektonische Akkumulationen anwendbar. Insgesamt ist die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' aus Sicht des ENSI als günstig statt sehr günstig zu beurteilen.

Die in den Alpen im Vergleich zum nördlichen Vorland generell höheren Erosionsraten stellen für den Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren im geologischen Standortgebiet Wellenberg einen deutlichen Nachteil dar. Die ausgeprägte Topographie kann langfristig durch Hangrutschungen oder noch tiefgreifendere Massenbewegungen die Beständigkeit der Standorteigenschaften verringern. Veränderungen der alpinen Vergletscherungen könnten auf den Standort Wellenberg verschärft einwirken. Das ENSI beurteilt deshalb das Kriterium 'Erosion' nur als ungünstig. Als Resultat aus der Aggregation verbleibt jedoch auch beim ENSI eine günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität'. Das ENSI ist jedoch mit der Nagra einverstanden, dass eine Tieferlegung des Lagers (unter die Talsohle) einer frühzeitigen Freilegung des Lagers zusätzlich entgegenwirkt.

Anders als bei den anderen bevorzugten Bereichen bewertet die Nagra die Indikatoren 'Explorationsbedingungen an Oberfläche' und 'Kontinuität der interessierenden Schichten' hier nicht. Um alle bevorzugten Bereiche untereinander vergleichen zu können, darf die Bewertung dieser Indikatoren nach Meinung des ENSI nicht ausgelassen werden. Beide Indikatoren wären im Fall des Gebiets Wellenberg aufgrund der komplexen geologisch-tektonischen Verhältnisse als ungünstig zu bewerten, womit der Unterschied der tektonischen Akkumulation zu lateral ausgedehnten, subhorizontal liegenden Schichten, wie sie in den übrigen fünf vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten vorliegen, zum Ausdruck kommen würde. Die Bewertung für das Kriterium 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' verbleibt dennoch bei bedingt günstig, die Bewertung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' reduziert sich aus Sicht des ENSI auf bedingt günstig.

Gestützt auf den Expertenbericht Amann und Löw (2009) beurteilt das ENSI die Kriterien-
gruppe 'Bautechnische Eignung' für die Mergel-Formationen des Helvetikums aufgrund der star-
ken Tektonisierung (Kakirite) nur als bedingt günstig.

Die zusammenfassende Bewertung der Nagra des Bereichs SMA-MG-HEL als geeignet bleibt
trotz der teilweise unterschiedlichen Einschätzungen des ENSI bestehen. Das ENSI stimmt dem
Vorschlag des geologischen Standortgebiets Wellenberg aus Sicht von Sicherheit und technischer
Machbarkeit zu.

6.2.3 Aufteilung eines SMA-Lager auf zwei Wirtgesteine

Die Nagra schliesst erstmals die Möglichkeit ein, ein SMA-Lager auf zwei unterschiedliche, räum-
lich getrennte Wirtgesteine aufzuteilen. Dies betrifft den Opalinuston und die Effinger Schichten
im Gebiet Jura-Südfuss (NTB 08-03, S. 342), sowie den Opalinuston und den «Braunen Dogger» im
Gebiet Nördlich Lägeren (NTB 08-03, S. 338) und im Gebiet Zürcher Weinland (NTB 08-03, S. 336).
Die tektonisch verzahnten Gesteine der helvetischen und der tertiären Mergel im geologischen
Standortgebiet Wellenberg werden von der Nagra als einheitliches Wirtgestein angesehen (NTB 08-
03, S. 344). Im Falle des Gebiets Jura-Südfuss wird das Argument, sowohl den Opalinuston als auch
die Effinger Schichten nutzen zu können, für die Bevorzugung der östlich gelegenen Bereiche der
Subjurasischen Zone herangezogen (NTB 08-03, S. 342) und führt dazu, kein geologisches Stand-
ortgebiet um die westlichen Bereiche SMA-OPA-SJ-W und SMA-EFF-SJ-W vorzuschlagen.

Nach Ansicht des ENSI sind die geologischen Voraussetzungen für eine Aufteilung des Lagers
auf zwei Wirtgesteine im Gebiet Jura-Südfuss anspruchsvoll, weil die beiden in Frage kommen-
den Wirtgesteine Opalinuston und Effinger Schichten durch den ca. 75 m mächtigen Haupt-
rogenstein, einen lokalen Grundwasserleiter, voneinander getrennt sind. Im Gegensatz dazu
bestehen in den Gebieten Nördlich Lägeren und Zürcher Weinland (Opalinuston und «Brauner
Dogger») sowie Wellenberg (Helvetische Mergel und tertiäre Tonmergel der Axen-Decke) zusam-
menhängende einschlusswirksame Gebirgsbereiche, welche bei vergleichbaren Gesteinseigen-
schaften (Barrierenwirkung, felsmechanische Eigenschaften) als Einheit betrachtet werden kön-
nen. Das ENSI hat im Zusammenhang mit den vier bevorzugten Bereichen des Jura-Südfuss sorg-
fältig abgewogen, ob das Argument der Vielfalt der Wirtgesteine höher zu bewerten ist als die
Aufgabe der ansonsten gleich gut bewerteten Westbereiche. Auf der Basis der eigenen Bewer-
tungen aller Bereiche im Jura-Südfuss stimmt das ENSI dem von der Nagra vorgeschlagenen geo-
logischen Standortgebiet und der Zurückstellung der West-Bereiche zu.

6.2.4 Vollständigkeit der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete

Angaben der Nagra

Ausgehend von dem für SMA-Lager geeigneten geologisch-tektonischen Grossraum (ganze
Schweiz) und den innerhalb dieses Raumes evaluierten bevorzugten Wirtgesteinen identifizierte
die Nagra in einem Einengungsprozess geeignete Konfigurationen für geologische Standortge-
biete für SMA-Lager (Schritt 5 der Etappe 1 SGT). Das Ergebnis dieses Einengungsschritts stellte
sie in wirtgesteinsspezifischen Karten dar (NTB 08-03, Opalinuston: S. 204, 'Brauner Dogger':

S. 210, Effinger Schichten: S. 216). Allein aufgrund des zu geringen Platzangebots sieden demnach Flächen um Aarau und Rekingen (Opalinuston) und das Rafzer Feld (Opalinuston und 'Brauner Dogger') aus.

Jedes potenzielle Gebiet der Mergel-Formationen des Helvetikums in den Alpen hat die Nagra einzeln für sich abschliessend beurteilt. Aufgrund der lateralen Ausdehnung (Mindestanforderung) kommen die meisten dieser Vorkommen, inklusive dem Gebiet Oberbauenstock, nicht in Frage (NTB 08-03, S. 219). In den Gebieten Wartau und Muotathal sind die Aufschlussverhältnisse schlecht und das Realisierungsrisiko ist entsprechend gross, weswegen diese Gebiete nicht als bevorzugte Bereiche eingestuft und zurückgestellt werden (verschärfte Anforderungen nicht erfüllt, NTB 08-03, S. 219 – 221, swisstopo 2010).

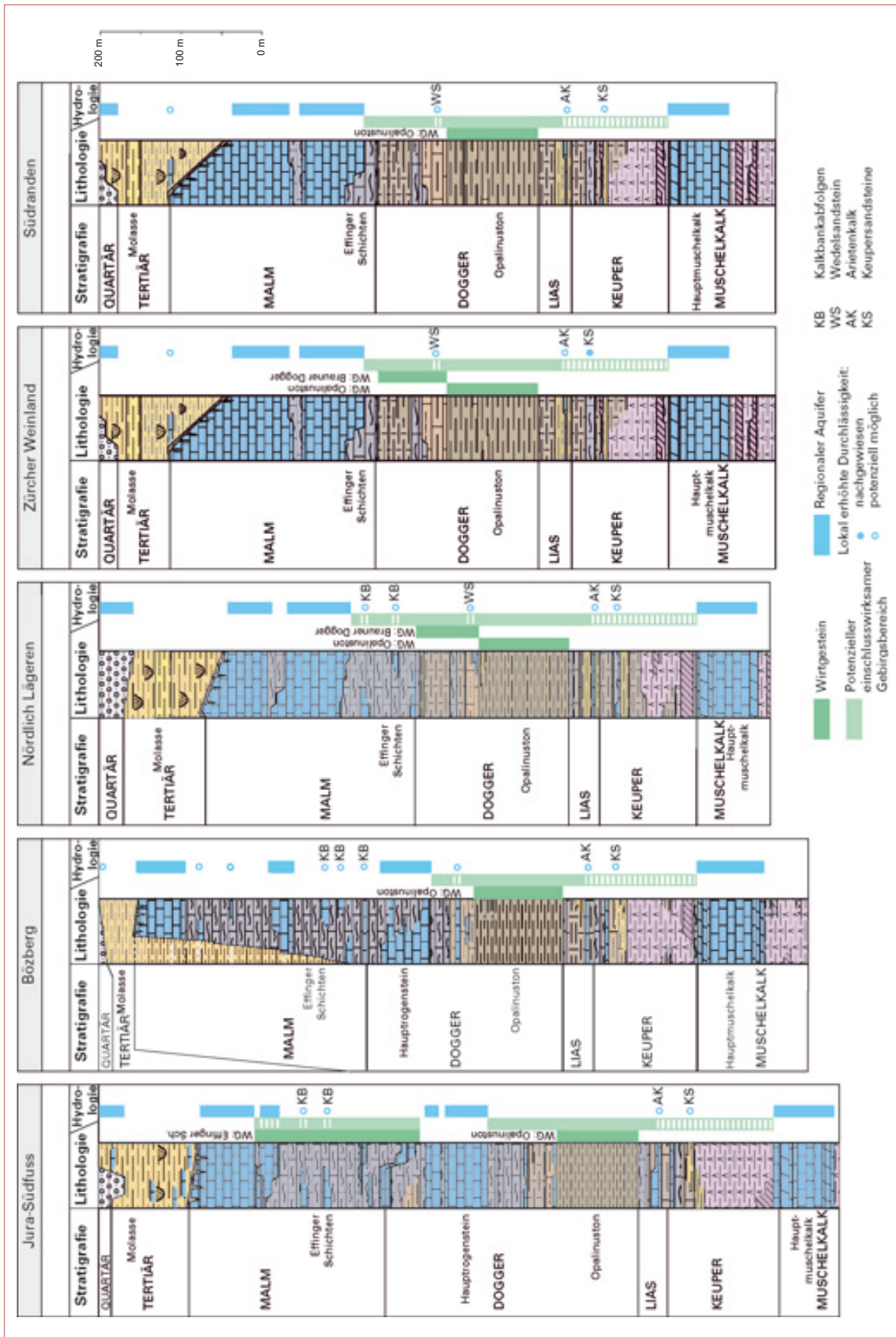
Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat das Vorgehen der Nagra bei der konfigurationsspezifischen Prüfung des Platzangebots anhand detaillierter, zusätzlicher Angaben nachvollzogen (Nagra 2009b; NAB 09-29). Das ENSI teilt die Meinung der Nagra, dass die Flächen um Aarau, Rekingen und Rafzer Feld aufgrund des eingeschränkten Platzangebots nicht weiter betrachtet werden.

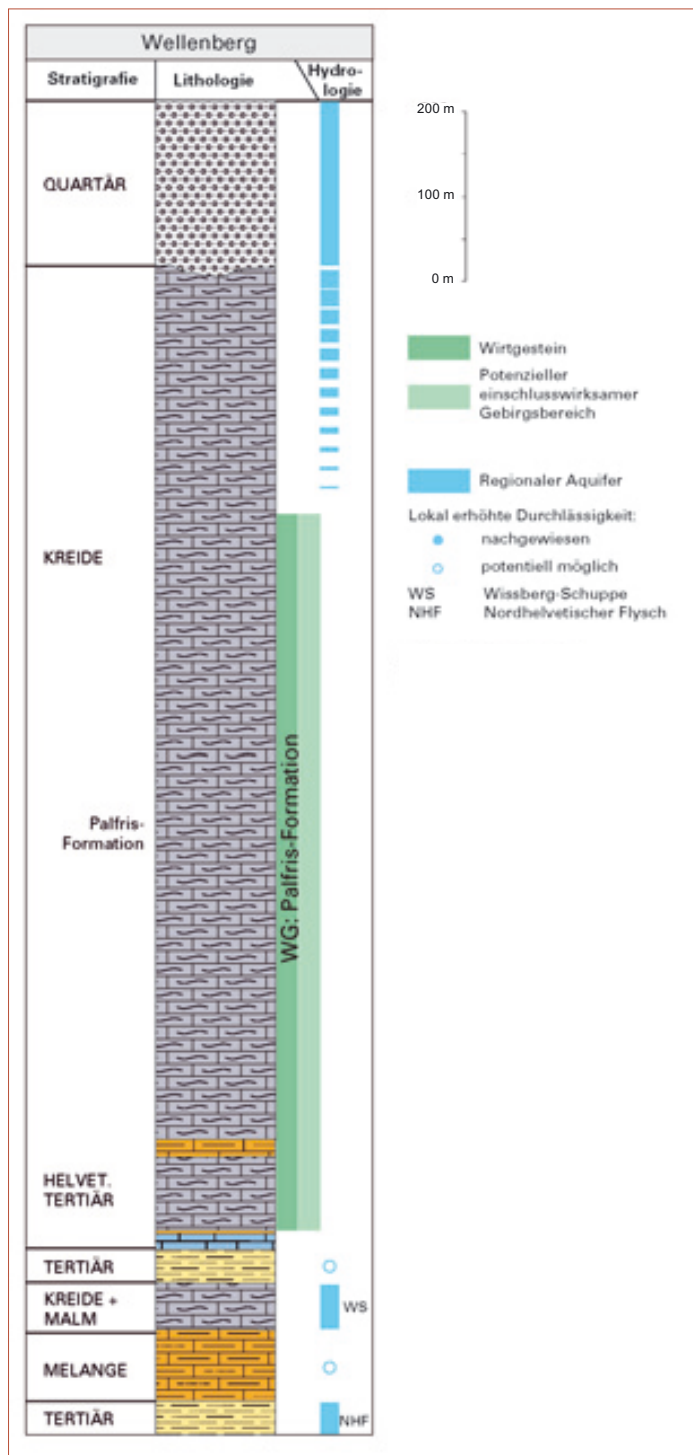
In den Untersuchungen am Wellenberg zeigte sich, dass in den Helvetischen Mergeln eine Dekompaktionszone von mindestens 500 m Mächtigkeit berücksichtigt werden muss. Dadurch werden die Platzverhältnisse in den potenziellen Gebieten Oberbauenstock und Wartau bezüglich Schutz vor flächenhafter Erosion und Dekompaktion zu stark eingeschränkt. Ähnlich ungünstige Bedingungen sind auch im potenziellen Gebiet Muotathal zu erwarten. Das Gebiet Wartau liegt ausserdem im Bereich erhöhter seismischer Aktivität aufgrund erhöhter Gradienten in den Hebungsraten nördlich von Sargans (Figur 4.2-2). Das ENSI stimmt der Einschätzung der Nagra zu, unter den bekannten Mergel-Formationen des Helvetikums nur das geologische Standortgebiet Wellenberg weiter zu verfolgen.

6.2.5 Vergleich der hydrogeologischen Situation der vorgeschlagenen SMA-Standortgebiete

Der diffusive und advective Transport im Grundwasser stellt den Hauptfreisetzungspfad von Radionukliden aus einem geologischen Tiefenlager dar. Daher ist die Suche nach möglichst geringdurchlässigen Wirtgesteinen in möglichst geeigneter hydrogeologischer Konfiguration für die Standortevaluation von zentraler Bedeutung. Das ENSI hat deshalb die bevorzugten Wirtgesteine in den vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten und deren hydrogeologische Begrenzung durch regionale Aquifere analysiert und miteinander verglichen. In den Figuren 6.2-14 und 6.2-15 sind die unterschiedlichen Grundwasserstockwerke in den jeweiligen SMA-Standortgebieten schematisch zusammengestellt. Die wichtigsten Aquifere von regionaler Bedeutung sind in allen alpenfernen geologischen Standortgebieten der Malm-Aquifer, der zum Teil als Karstaquifer entwickelt ist, oberhalb der vorgeschlagenen Wirtgesteine und der Muschelkalk-Aquifer unterhalb der Wirtgesteine. Da die Ablagerungen des mittleren und oberen Doggers gegen Westen zunehmend kalkiger werden und in den Gebieten Bözberg und Jura-Südfuss als Haupttrogenstein ausgebildet sind, stellen diese Gesteinsformationen in den genannten Gebieten einen weiteren wichtigen regionalen Aquifer dar.



Figur 6.2-14: Synthetische Profile der Gesteinsabfolge und der hydrogeologischen Situation der SMA-Standortgebiete Jura-Südfuss, Bözberg, Nördlich Lägeren, Zürcher Weinland und Südranden (zusammengestellt durch Dr. von Moos AG).



Figur 6.2-15: Überblick über die Gesteinsabfolge und hydrogeologische Situation des SMA-Standortgebiets Wellenberg (zusammengestellt durch Dr. von Moos AG).

halb des Aquifers der quartären Lockergesteine die Mergelgesteine der Palfris-Formation bis in eine Tiefe von rund 500 m unter Terrain aufgrund von Dekompaktion erhöhte hydraulische Durchlässigkeitswerte ($> 10^{-10}$ m/s, respektive 400 m für 10^{-9} m/s) aufweisen (NTB 08-04, Fig. 4.3-24). Darunter sind die Mergelgesteine sehr gering durchlässig und definieren das Wirtgestein bzw. den potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Dieser zeichnet sich durch stagnierende, sehr alte hochsaline NaCl-Porenwässer aus (NTB 08-04, S. 178).

Die Verhältnisse im geologischen Standortgebiet Jura-Südfuss stellen möglicherweise besondere Bedingungen an die untertägige Wasserhaltung des Tiefenlagers. Die beiden Wirtgesteine Effinger Schichten und Opalinuston sind gar nicht oder nur beschränkt von aquitarden Rahmengesteinen umgeben. Neben dem Malm-Aquifer wäre auch der zwischen den beiden Wirtgesteinen liegende Haupttrogenstein-Aquifer in alle sicherheitstechnische Betrachtungen (Bau-, Betrieb- und Nachverschlussphase) einzubeziehen.

Potenziell mögliche bzw. in einigen Bohrungen auch nachgewiesene lokale Wasserführung besteht in den Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten (unter anderem die «Gerstenhübel Beds»), in den sandigen Kalkgesteinen der Wedelsandstein-Formation, im Arietenkalk des unteren Lias und in den Sandsteinen des Keupers. Diese lokal erhöhten Durchlässigkeiten können, je nach lateraler Ausdehnung und hydraulischer Wirksamkeit, den potenziell einschlusswirksamen Gebirgsbereich einschränken.

Die hydrogeologischen Verhältnisse im geologischen Standortgebiet Wellenberg (Figur 6.2-15) sind durch zahlreiche Bohrungen gut untersucht und zeigen, dass unterhalb des Aquifers der quartären Lockergesteine die Mergelgesteine der Palfris-Formation bis in eine Tiefe von rund 500 m unter Terrain aufgrund von Dekompaktion erhöhte hydraulische Durchlässigkeitswerte ($> 10^{-10}$ m/s, respektive 400 m für 10^{-9} m/s) aufweisen (NTB 08-04, Fig. 4.3-24). Darunter sind die Mergelgesteine sehr gering durchlässig und definieren das Wirtgestein bzw. den potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Dieser zeichnet sich durch stagnierende, sehr alte hochsaline NaCl-Porenwässer aus (NTB 08-04, S. 178).

Die tektonische Situation des Wellenbergs mit der Drusberg-Decke im Norden, der Axen-Decke im Süden und den subhelvetischen Deckenelementen (Wissberg-Schuppe, Mélange-Zone) und dem Tertiär als Basis bzw. Unterlage des helvetischen Deckenstapels hat zur Folge, dass die Mergelgesteine der Palfris-Formation ringsum grossräumig von regionalen Grundwassersystemen umgeben werden: verkarsteter Schrottenkalk und Kieselkalke der Drusberg-Decke, Kalke der Axen-Decke und der Wissbergscholle, und Sandstein-Dachschiefer-Abfolgen des Nordhelvetischen Flysches (Tertiär). Diese Grundwassersysteme sind aufgrund der alpinen Topographie mit hohen hydraulischen Gradienten verbunden und meist artesisch gespannt (z. B. Tiefengrundwässer der Wissberg-Schuppe).

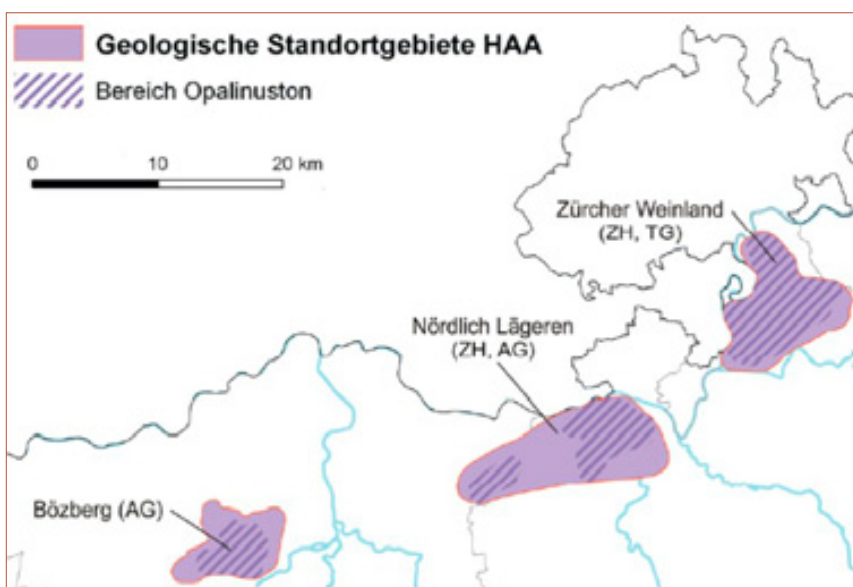
Zusammenfassend stellt das ENSI aufgrund der Profilzusammenstellung fest, dass die hydrogeologischen Verhältnisse in den vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten im Südranden, im Zürcher Weinland und Nördlich Lägeren bezüglich Lage und Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches besonders vorteilhaft sind. In den Gebieten Bözberg und Jura-Südfuss ist der potenzielle einschlusswirksame Gebirgsbereich wegen des Haupttrogenstein-Aquifers weniger mächtig. Eine einzigartige Situation stellen die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenbergs dar, wo der potenzielle einschlusswirksame Gebirgsbereich durch tektonische Akkumulation eine Mächtigkeit bis 1'000 m erreicht.

6.3 Standortgebiete für HAA-Lager

6.3.1 Identifikation und Auswahl bevorzugter Bereiche für das HAA-Lager

Angaben der Nagra

Zur Einengung geeigneter Konfigurationen für das HAA-Lager im Opalinuston geht die Nagra mit dem GIS-Schnittverfahren sinngemäss ebenso vor wie für das SMA-Lager. Zunächst werden, gemäss der Mindestanforderungen für die minimal erforderliche Tiefenlage bezüglich Erosion und der maximalen Tiefenlage bezüglich bautechnischer Eignung, Gebiete oberhalb 400 und unterhalb 900 m Tiefe unter Terrain weggeschnitten (NTB 08-03, S. 224). Generell zu meidende



Figur 6.3-1: Von der Nagra vorgeschlagene geologische Standortgebiete für das HAA-Lager und darin befindliche bevorzugte Bereiche (NTB 08-03, Fig. 5.7-1b)

glazial übertiefte Quartärrinnen (Thurtal-, Glattal-Rinne) werden nicht in einem Einzelschritt explizit abgetrennt, wenn sie die verschärften Anforderungen für eine Tiefenlage von mindestens 500 m unter Rinnenunterkante erfüllen. Durch die Anwendung verschärfter Anforderungen werden anschliessend bevorzugte Bereiche abgegrenzt und aufgrund einer Bewertung geologische Standortgebiete für das HAA-Lager vorgeschlagen (Figur 6.3-1).

Die Nagra benennt über die vier insgesamt mindestens geeigneten bevorzugten Bereiche hinaus prioritäre Bereiche, die zu den Vorschlägen geologischer Standortgebiete führen. Die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg werden anhand von vier Kriteriengruppen und 13 Kriterien einzeln bewertet (NTB 08-03, Kap. 5.5). Dies erfolgt mit einer quantitativen Bewertung (NTB 08-03, Tab. C.4-13 bis C.4-16) auf der Stufe der Indikatoren. Bei der Zusammenfassung von Bewertungen wird gerundet (NTB 08-03, S. 383).

Beurteilung des ENSI

Das GIS-Schnittverfahren der Nagra ist durch das ENSI im Detail geprüft worden (Dr. von Moos AG 2009b). Das konzeptionelle und technische Vorgehen der Nagra beim Schnittverfahren, die geologischen Grundlagendaten sowie die resultierende Abgrenzung von geologischen Standortgebieten sind sachplangemäss und nachvollziehbar.

6.3.2 Vorgeschlagene geologische Standortgebiete

Im Folgenden werden die Bewertungen der Nagra zu den drei vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg von Ost nach West einzeln kommentiert. Anschliessend wird die Auswahl der geologischen Standortgebiete vom ENSI mit Blick auf deren Vollständigkeit beurteilt (Kapitel 6.3.3) und die hydrogeologische Situation der Standortgebiete verglichen (Kapitel 6.3.4).

Zürcher Weinland (ZH, TG)

Angaben der Nagra

Die Begrenzung ist im Nordosten und Osten durch die neotektonisch potenziell aktive Neuhauser Störung gegeben (NTB 08-03, S. 347). Es gibt in der 3D-Seismik keine Anzeichen für westlich der Neuhauser Störung gelegene Strukturen mit Ausnahme der Wildensbucher Flexur. Fein-nivellements geben keinen Hinweis auf junge differenzielle Hebung im Bereich dieser Flexur wie auch im übrigen geologischen Standortgebiet Zürcher Weinland (NAB 07-27; NTB 08-04, S. 48). Im Bereich des südlichen Übergangs von der kristallinen Hochscholle (Standortgebiet) zum Permakarbondrog gibt es Anzeichen für eine leicht erhöhte Zergliederung durch die Rafz-Marthalen-Flexur, die nach West-Südwest immer deutlicher entwickelt ist (NTB 00-03). Diese Zone, die auch ein erhöhtes geothermisches Potenzial aufweist (NTB 08-04, S. 327), begrenzt das geologische Standortgebiet nach Süden ebenso wie die eiszeitliche Thurtal-Rinne. Die westliche Begrenzung des geologischen Standortgebiets besteht durch die Landesgrenze und das Rheintal.

Das geologische Standortgebiet Zürcher Weinland ist mit 2D- und 3D-Seismik (NTB 00-03) und der Sondierbohrung Benken (Nagra 1999) detailliert untersucht worden. Die Mächtigkeit des Wirtgesteins Opalinuston umfasst 110 – 120 m, unter Einbezug der faziell gleichartigen, tonreichen Murchisonae-Schichten an der Basis des 'Braunen Doggers'. Durch die gering-durchlässige Ausbildung der Rahmengesteine umfasst der einschlusswirksame Gebirgsbereich 220 bis 250 m und wird von der Nagra hinsichtlich Mächtigkeit, hydraulischer Barrierenwirkung und Freisetzungspfade als sehr günstig bewertet. Das ausgedehnte laterale Platzangebot übertrifft das der anderen geologischen Standortgebiete (NTB 08-03, S. 346) und es bestehen verschiedene Möglichkeiten, der innerhalb des Bereichs gelegenen Wildensbucher Flexur und begleitenden Störungen auszuweichen. Insgesamt wird die Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' als sehr günstig bewertet.

Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wird in etwa gleich bewertet wie Kriterium 'Erosion' (sehr günstig), jedoch besser als die Kriterien 'Lagerbedingte Einflüsse' (günstig) und 'Nutzungskonflikte' (günstig). Die Kriterien-Gruppe 'Langzeitstabilität' des geologischen Standortgebiets wird damit von der Nagra insgesamt als günstig beurteilt.

Die Kriterien-Gruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird als sehr günstig bewertet.

Bezüglich der Kriterien-Gruppe 'Bautechnischer Eignung' wird das Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' trotz erhöhtem Aufwand in wenig verfestigten, porösen Schichten der USM und in möglicherweise verkarsteten Malmkalken sehr günstig bewertet. Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird aufgrund der Tiefenlage unter Terrain insgesamt als bedingt günstig bezeichnet. Die Kriterien-Gruppe 'Bautechnische Eignung' ist insgesamt günstig.

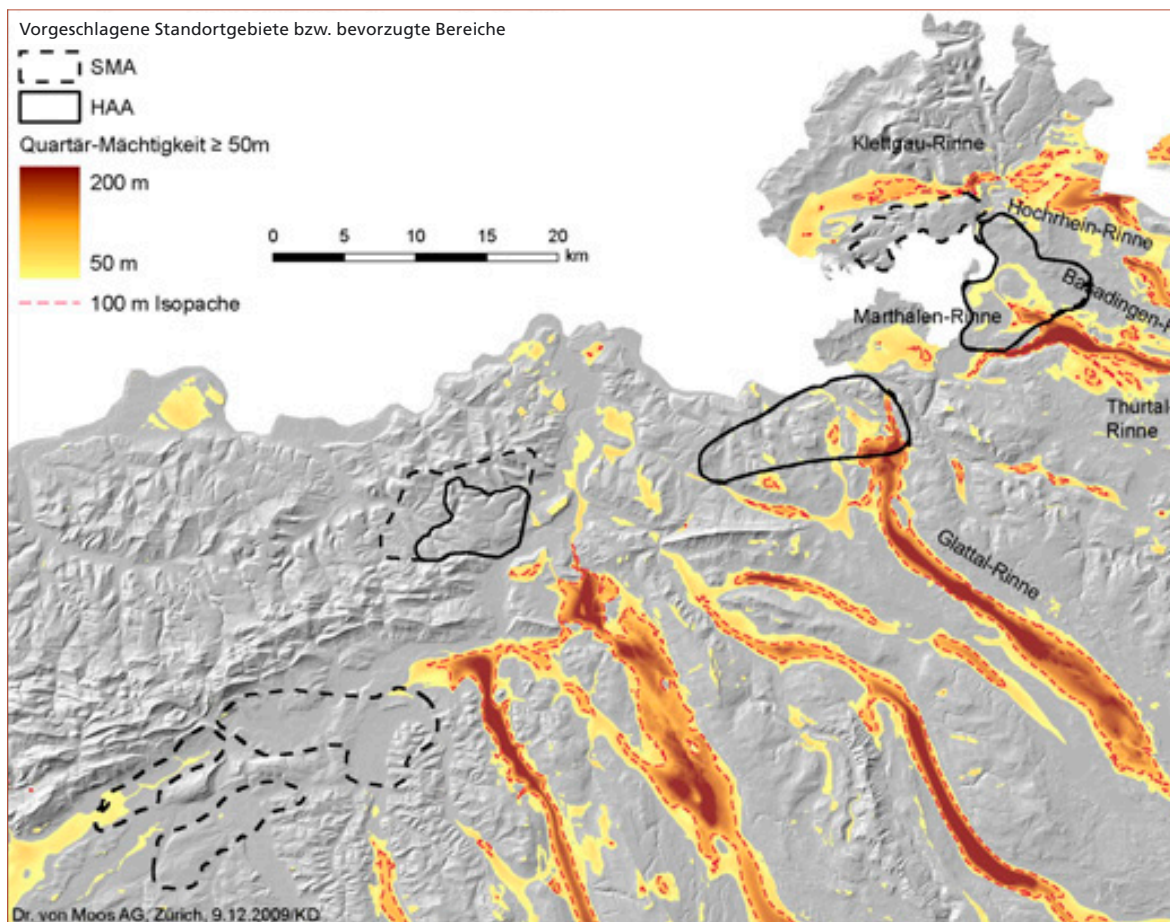
Beurteilung des ENSI

Die sehr günstige Bewertung der Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist für das ENSI aufgrund der dargelegten Grundlagendaten nachvollziehbar und bestätigt die im Gutachten zum Entsorgungsnachweis (HSK 35/99) präsentierten Schlussfolgerungen.

Das ENSI kann der Bewertung der Nagra für die Kriterien-Gruppen 'Langzeitstabilität', und die 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' grundsätzlich folgen. Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' hängt von zukünftigen tektonischen Aktivitäten, von Erosion und von kaltzeitlicher Rinnenübertiefung ab. Eine neotektonische Aktivität der Neuhauser Störung ist anhand verstellter Hochterrassenschotter am östlichen Ende der Klettgau-Rinne zu vermuten (Graf, im Druck), aber in ihrem Ausmass nicht genauer bekannt. Mögliche zukünftige Entwicklungen durch anhaltenden alpinen Fernschub (NTB 99-08) orientieren sich an dem sehr schwachen Fernschub in der Vorfaltenzone, doch es bestehen gewisse Unsicherheiten über zu erwartende lokale Deformations- und Hebungsraten (Milnes 2004). Die regionalen Erosionsraten werden mit 100 – 200 m pro Million Jahre (NTB 99-08) aus Sicht des ENSI genügend konservativ

eingeschätzt, so dass auch nach 1 Million Jahre mit mindestens 300 m eine genügende Überlagerung gegeben wäre.

Glaziale Tiefenerosion entlang der Thurtal-Rinne südlich des geologischen Standortgebiets (Figur 6.3-2) betrifft einen Bereich, in dem sich das Wirtgestein 600 m unterhalb der Felsoberkante der Rinne, also 900 m unter Terrain, befindet (NAB 07-12). Die Thurtal-Rinne wurde im östlichen und mittleren Abschnitt während der letzten Eiszeit komplett, im westlichen Teil nur teilweise ausgeräumt (Dr. von Moos AG 2005, deutlich verfestigte Seeablagerungen im tieferen Teil der Bohrprofile), und die Übertiefung an ihrem westlichen Ende scheint deutlich später erfolgt zu sein als die der nördlich gelegenen Rinnen (Müller 1996). Die von der westlichen Thurtal-Rinne nach West-Nordwest abzweigende Marthälen-Rinne ist relativ flach, und das Wirtgestein befindet sich mehr als 600 m unterhalb der Felsoberkante der Rinne. Östlich des geologischen Standortgebiets zweigt die übertiefte Basadingen-Rinne schräg von der Thurtal-Rinne Richtung Schaffhausen ab. Sie hat ein mittelquartäres, nicht genau bekanntes Alter (Dr. von Moos AG 2009a). Ihre Verfüllungsgeschichte belegt, dass es im Raum um Schaffhausen bis zum Thurtal zu Rinnenverlagerungen gekommen ist (Müller 1996) und daher in dieser Region auch zukünftig mit Rinnenverlagerungen zu rechnen ist.



Figur 6.3-2: Verbreitung glazial übertieferter Felsrinnen im Umfeld der schwarz umrandeten HAA-Standortgebiete (NTB 08-03, Fig. 5.1-2, modifiziert). Quartärmächtigkeiten lokal über 200 m sind bekannt (Dr. von Moos AG 2009a), aber hier nicht separat ausgewiesen.

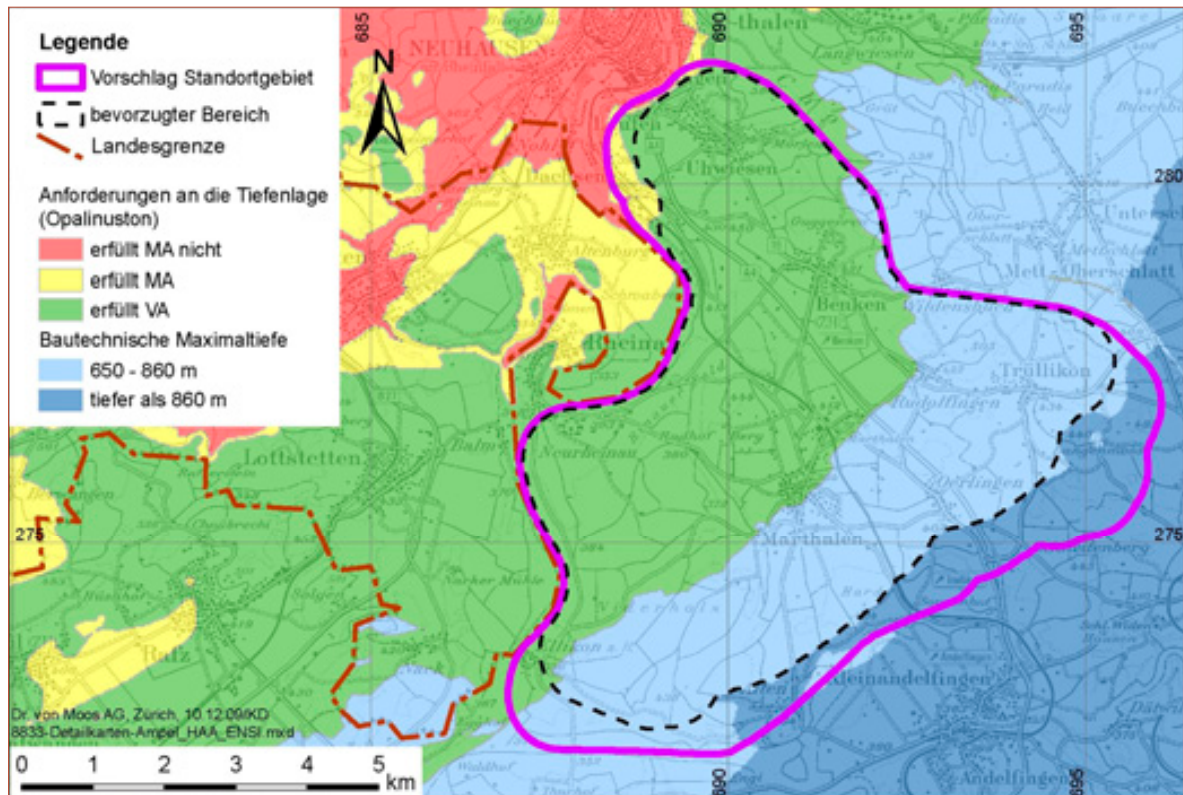
Da im geologischen Standortgebiet verbreitet Moränen der letzten Eiszeit, aber auch ältere kaltzeitliche Ablagerungen der Hochterrasse erhalten sind, konzentrieren sich Abtragung und glaziale Tiefenerosion potenziell auf die Thurtal-Rinne und betreffen das geologische Standortgebiet Zürcher Weinland nur marginal im südöstlichen Bereich. Grundsätzlich wäre bei gleichzeitiger Blockierung der Hochrhein-Rinne bei Schaffhausen und der Thurtal-Rinne vor dem Hochrhein die Bildung einer neuen Schmelzwasserrinne durch das geologische Standortgebiet möglich. In einem weiteren Kaltzeitzyklus könnte dann eine solche Schmelzwasserrinne von einer Gletscherzunge ausgeräumt und in der Folge auch übertieft werden. Die Wahrscheinlichkeit einer solchen Entwicklung wird vom ENSI als relativ gering angesehen. Auch wenn das ENSI eine verzögerte, aber besonders starke Vorlandvereisung in ca. 200'000 Jahren für möglich hält (Archer und Ganopolski 2005), wird das Wirtgestein durch überlagernde, generell schwer erodierbare Malmkalke vor glazialer Tiefenerosion im Fall einer Durchschneidung der Molassebedeckung geschützt. Daher ist die vorhandene Mindestüberlagerung von 500 m (verschärfte Anforderungen) aus Sicht des ENSI genügend.

Hinsichtlich Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' ist aus Sicht des ENSI eine bedingt günstige Bewertung angebracht (Tabelle 5.2-2). Die Nachteile des Opalinustons im Vergleich zu anderen Wirtgesteinen wie Granit sind ausgeprägt, vor allem in Bezug auf die Indikatoren 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur' und 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas'. Demgegenüber stehen gute Selbstabdichtungseigenschaften, die langfristig beim Opalinuston zum Tragen kommen. Dies gilt sinngemäss für alle HAA-Standortgebiete.

Bezüglich Kriterium 'Nutzungskonflikte' sieht das ENSI für die Indikatoren 'Mineralquellen und Thermen' sowie 'Geothermie' sowie aufgrund sehr geringmächtiger Salzvorkommen geringe Nutzungskonflikte. Das Fehlen lokaler Vorkommen von Kohlenwasserstoffen im Bereich des unterlagernden Kristallinhorsts wird vom ENSI als langfristig wichtiger Vorteil gesehen. Der günstigen Bewertung des geologischen Standortgebiets kann gefolgt werden.

Die bautechnische Machbarkeit wird vom ENSI aufgrund von bautechnischen Expertenberichten (Amann und Löw 2009; Emch+Berger AG 2010) im südlichen Teil des geologischen Standortgebiets in Tiefen unter 650 m als kritisch angesehen. Wie in Figur 6.3-3 ersichtlich, ist der südöstliche Teil des geologischen Standortgebiets überwiegend im kritischen Tiefenbereich > 650 m gelegen, was einen verstärkten Ausbau mit Stützmitteln nötig machen würde. Der Einfluss eines solchen Ausbaus auf die Langzeitsicherheit des Wirtgesteins wäre in den folgenden Etappen des SGT vertieft zu untersuchen. Eine Gesamtbewertung der bautechnischen Eignung als günstig ist in den Tiefenbereichen bis 650 m nachvollziehbar. Das Platzangebot untertags verfehlt im reduzierten Tiefenbereich zwischen 470 und 650 m eine sehr günstige Bewertung (NTB 08-03, S. 416) knapp, wäre also nur günstig. Die Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' als günstig ist für das ENSI nachvollziehbar.

Zusammenfassend kann das ENSI trotz dieser Einwände der Bewertung des geologischen Standortgebiets Zürcher Weinland als sehr geeignet durch die Nagra im Grundsatz folgen und stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zu.



Figur 6.3-3: Tiefenlage des Opalinustons im HAA-Standortgebiet Zürcher Weinland (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 490 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 590 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 650 m bis 860 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 860 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt, allerdings unter Inanspruchnahme einer bautechnisch kritischen Tiefenlage zwischen 650 und 860 m im Südosten.

Nördlich Lägeren (ZH, AG)

Angaben der Nagra

Der Kenntnisstand der räumlichen Verhältnisse im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren beruht auf elf Seismiklinien und einer Tiefbohrung (Weiach), kann aber in Anbetracht der Ungewissheiten betreffend dem Verlauf einzelner Strukturen im Untergrund nur als befriedigend bezeichnet werden (NTB 08-03, S. 348). Die Mächtigkeit des Wirtgesteins Opalinuston beträgt im östlichen Bereich 100 – 110 m. Durch die geringdurchlässige Ausbildung der Rahmengesteine im östlichen Bereich ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich 270 bis 320 m mächtig und wird damit als sehr günstig bewertet (NTB 08-03, S. 308). Im westlichen Bereich ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich 310 bis 420 m mächtig (NTB 08-03, S. 313).

Das geologische Standortgebiet ist gegen Norden durch Rheintal und Landesgrenze, im Süden und Osten durch die Tiefenlage des Opalinustons, mehrheitlich aber durch regionale Störungszonen und tektonisch zergliederte Gebiete begrenzt. Die beiden bevorzugten Bereiche innerhalb des geologischen Standortgebiets werden durch ein Gebiet getrennt, in dem die räumlichen Verhältnisse die Erfüllung der verschärften Anforderungen verfehlen. Die relativ geringe Fläche des

westlichen Bereichs (ca. 7 km², NTB 08-04) lässt wenig Flexibilität bezüglich der Platzierung eines HAA-Lagers zu und wird daher knapp als günstig beurteilt. Die räumliche Ausdehnung des östlichen Bereichs ist aufgrund im Detail nicht genau bekannter Zonen erhöhter tektonischer Zergliederung schwierig zu beurteilen, doch aufgrund der grossen Fläche und der daraus abgeleiteten Flexibilität wird dieses Kriterium als günstig beurteilt.

Die Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' wird im geologischen Standortgebiet als sehr günstig bewertet.

Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' des geologischen Standortgebiets wird von der Nagra im Durchschnitt als günstig beurteilt. Die Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' und 'Erosion' (sehr günstig) werden besser bewertet als 'lagerbedingte Einflüsse' (günstig) und 'Nutzungskonflikte' (bedingt günstig).

'Nutzungskonflikte' bestehen aufgrund lokaler Vorkommen von Kohlenwasserstoffen, nahe gelegenen Mineralquellen und Thermen und aufgrund eines erhöhten thermischen Gradienten. Das geologische Standortgebiet wird in West- und Ostteil jeweils als bedingt günstig bewertet.

Die Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' wird insgesamt als sehr günstig bewertet, wobei die Explorierbarkeit durch Seismik seitens Nagra als bedingt günstig (Westteil) bis günstig (Ostteil), aber sehr günstig für die Explorierbarkeit durch Bohrungen bewertet ist.

Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird aufgrund der Tiefenlage und einer gewissen tektonischen Überprägung als bedingt günstig bezeichnet. Bei der 'Untertägigen Erschliessung und Wasserhaltung' bestehen aufgrund von möglichem Paläokarst in Malmkalken mit erhöhtem Risiko von Wassereinbrüchen ähnliche Schwierigkeiten wie im Zürcher Weinland. Eine erhöhte Gasführung im Malmkalk (Bohrung Eglisau-2, NTB 08-03, S. 312) muss bautechnisch berücksichtigt werden. Die Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' wird damit als bedingt günstig bewertet.

Beurteilung des ENSI

Für den von der Nagra bevorzugten Bereich HAA-OPA-VZ-M werden die verschärften Anforderungen an den Indikator 'Platzangebot untertags' nur erfüllt, wenn zusätzliche Überlegungen zur effektiv wirksamen Überlagerungshöhe berücksichtigt werden. Dazu stützt sich die Nagra auf eine gesonderte Beurteilung des Bereichs, in welcher die Bezugshöhe (Terrain) zur Berechnung der maximalen Tiefenlage nicht auf das Niveau der Höhenzüge (maximale Überlagerung), sondern auf das realistischere, mittlere Niveau der Geländetopographie gelegt wird. Dadurch kommen grössere Bereiche innerhalb des bautechnisch machbaren Tiefenbereichs zu liegen, und auch unter Berücksichtigung von Ungewissheiten steht noch ausreichend Platz zur Anordnung des HAA-Lagers zur Verfügung. Das ENSI kann diesen Überlegungen zustimmen, bewertet das untertägige Platzangebot jedoch aufgrund der für den Westbereich herangezogenen Abwägungen etwas kritischer als die Nagra.

Die sehr günstige Bewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist für das ENSI aufgrund der dargelegten Grundlagendaten nachvollziehbar.

Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wird seitens der Nagra aufgrund der geologisch-tektonischen Situation als sehr günstig bezeichnet, obwohl gewisse Unsicherheiten über zu erwartende lokale Deformationsraten bestehen. Das Ausmass der Zergliederung ist aus Sicht des ENSI deutlich grösser als im Zürcher Weinland. Die seismischen Profile (NTB 08-04, Beilagen 5.2-19 bzw. -20) zeigen südlich des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments nach Norden reichende Rampen und nördlich angrenzend entlang der Rheinfelden-Rüdlingen-Flexur eine erkennbare Zergliederung. Auch innerhalb des geologischen Standortgebiets sind kompressive und transpressive Strukturen erkennbar. Weil aber die Beständigkeit des Wirtgesteins sehr günstig und die Wahrscheinlichkeit relevanter Deformation selbst innerhalb von einer Million Jahre aus Sicht des ENSI klein ist, kann einer sehr günstigen Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' gefolgt werden.

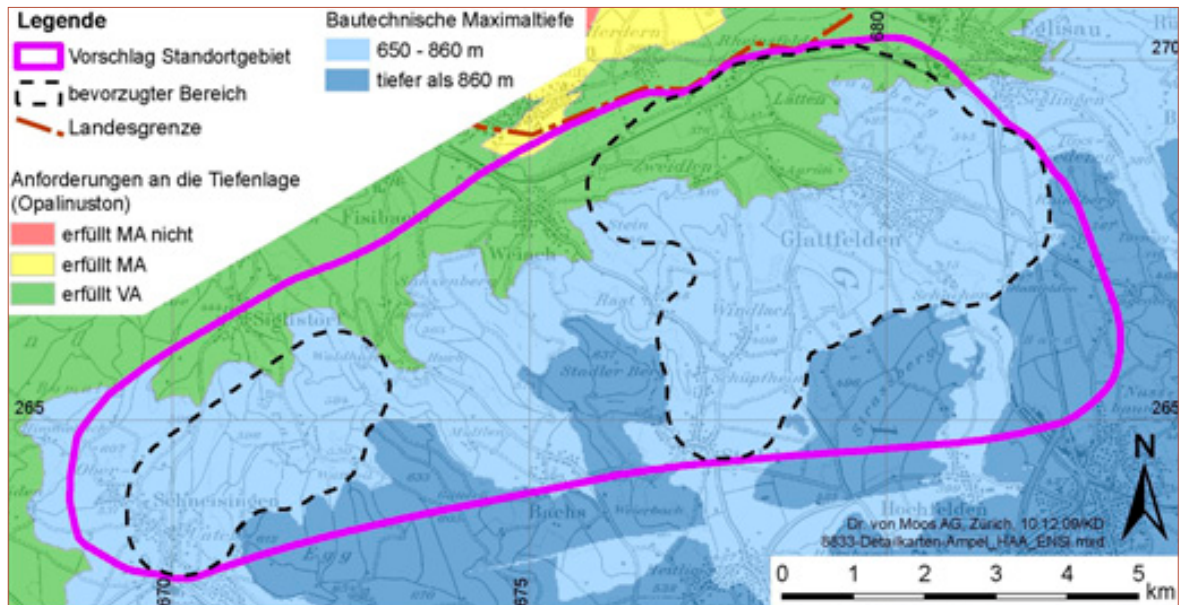
Nacheiszeitliche Verformung oder differenzielle Hebungen von Flussterrassen sind nicht nachzuweisen. Neotektonische Aktivität wurde aber in den 1.8 bis 2.5 Millionen Jahre alten Höheren Deckenschottern 1 km südlich des geologischen Standortgebiets im Verlauf des Baden-Irchel-Herdern-Lineaments nachgewiesen. Zwei fast rechtwinklig zu diesem Lineament verlaufende, ca. 150° streichende, ostfallende Abschiebungen mit jeweils ca. 10 bzw. 5 m Versatzbetrag zeigen aber, dass die tektonische Aktivität relativ gering war.

Die von der Nagra angegebene Erosionsrate von bis zu 200 m über 1 Million Jahre ist aus Sicht des ENSI hoch geschätzt, weil die verfestigten Höheren Deckenschotter insbesondere im westlichen Teil des geologischen Standortgebiets und östlich davon verbreitet erhalten sind und dort die unterlagernden Molasse-Schichten vor Erosion schützen. Die sehr günstige Bewertung der Nagra hinsichtlich flächenhafter Erosion ist daher aus Sicht des ENSI zutreffend. Glaziale Tiefenerosion in der Verlängerung des Glatttals wird aufgrund der Tiefenlage des Wirtgesteins von der Nagra für unproblematisch gehalten und als günstig bewertet. Dieser Bewertung schliesst sich das ENSI an. Die Gesamtbewertung des Kriteriums 'Erosion' als sehr günstig ist aus Sicht des ENSI plausibel.

Hinsichtlich des Kriteriums 'Lagerbedingte Einflüsse' schätzt das ENSI die Nachteile des Opalinustons im Vergleich zu anderen Wirtgesteinen wie Granit als ausgeprägt genug ein, so dass eine bedingt günstige Gesamtbewertung zutreffend erscheint (vgl. HAA-Standortgebiet Zürcher Weinland).

Aufgrund lokaler Vorkommen von Kohlenwasserstoffen im unterlagernden Permokarbondrog kann das ENSI der bedingt günstigen Bewertung des Kriteriums 'Nutzungskonflikte' folgen. Der Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' als günstig stimmt das ENSI zu.

Das Kriterium 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' ist statt mit knapp sehr günstig (Ostbereich) angesichts der schwierigen Bedingungen für 3D-Seismik (Topographie, Quartärabla-



Figur 6.3-4: Tiefenlage des Opalinustons im HAA-Standortgebiet Nördlich Lägeren (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 490 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 590 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 650 m bis 860 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 860 m unter Terrain. In den bevorzugten Bereichen werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt, allerdings unter Inanspruchnahme einer bautechnisch kritischen Tiefenlage zwischen 650 und 860 m.

gerungen) und der tektonischen Zergliederung aus Sicht des ENSI ebenso wie der Westbereich nur als günstig zu bewerten. Der Indikator 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund', unter Berücksichtigung konfigurationsspezifischer Aspekte (NTB 08-03, S. 421) ist nach Ansicht des ENSI mit der höchstmöglichen Bewertung seitens Nagra zu günstig dargestellt.

Die bautechnische Eignung wird aufgrund der Tiefenlage von teilweise über 600 m und der tektonischen Zergliederung von der Nagra als bedingt günstig angesehen. Wie in Figur 6.3-4 ersichtlich, ist ein Grossteil des geologischen Standortgebiets im kritischen Tiefenbereich grösser als 650 m gelegen, was aus Sicht des ENSI aufgrund von bautechnischen Expertenberichten (Amann und Löw 2009; Emch+Berger AG 2010) einen verstärkten Ausbau von HAA-Lagerstollen mit Stützmitteln nötig machen würde. Der Einfluss eines verstärkten Ausbaus mit Stützmitteln auf die Langzeitsicherheit wäre in den folgenden Etappen des SGT vertieft zu untersuchen.

Zusammenfassend kann das ENSI der günstigen Gesamtbewertung des geologischen Standortgebiets Nördlich Lägeren durch die Nagra im Grundsatz folgen, wobei der tiefenbedingte bautechnische Aufwand und seine Auswirkungen auf die Langzeitstabilität in den folgenden Etappen des SGT vertieft untersucht und bewertet werden sollten. Das ENSI stimmt dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

Bözberg (AG)

Angaben der Nagra

Das geologische Standortgebiet Bözberg ist mit vier Seismiklinien und der Sondierbohrung Riniken insgesamt gut untersucht, wobei die westlichste und östlichste Seismiklinie das Gebiet nur streifen (NTB 08-03, Fig. 5.7-10). Das geologische Standortgebiet ist im Norden und Süden durch den Verlauf von Überschiebungen und durch tektonisch zergliederte Gebiete begrenzt. Im Westen und Norden wird die Mindesttiefe nicht erreicht. Im Osten verläuft eine Zone starker Zergliederung.

Die Mächtigkeit des Wirtgesteins Opalinuston beträgt 100 m (Westen) bis 120 m (Osten). Die Rahmengesteine sind mit insgesamt 170 bis 200 m einschlusswirksamem Gebirgsbereich deutlich weniger mächtig als in den übrigen Gebieten und beinhalten mit dem teilweise kalkig entwickelten 'Braunen Dogger' eine Abfolge mit beschränkten Barriereigenschaften und allenfalls lokaler Wasserführung. Der Indikator 'Mächtigkeit' wird mit Bezug auf das Wirtgestein als sehr günstig bewertet.

Das Kriterium 'Räumliche Ausdehnung' wird von der Nagra mit 14 km² als sehr günstig eingeschätzt (NTB 08-03, S.318), wobei das Wirtgestein in deutlich geringerer Tiefe liegt als in den übrigen Gebieten und die Oberkante des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in 400 bis 550 m unter Terrain lokal nur knapp die verschärften Anforderungen erfüllt. Die Kriterien 'Hydraulische Barrierenwirkung', 'Geochemische Bedingungen' und 'Freisetzungspfade' werden wirtgesteinspezifisch als sehr günstig bewertet. Auch die Gesamtbewertung der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist damit sehr günstig.

Die Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' wird hinsichtlich der Kriterien 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' sowie 'Erosion' als sehr günstig bewertet. Das geologische Standortgebiet ist glazialer Tiefenerosion potenziell weniger ausgesetzt als andere Gebiete. Das Kriterium 'Lagerbedingte Einflüsse' wird je nach Indikator von bedingt günstig ('Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' und 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Temperatur') bis sehr günstig ('Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Chemische Wechselwirkungen') und insgesamt als günstig bewertet. Potenzielle Nutzungskonflikte bestehen aufgrund vermuteter Vorkommen von Kohlenwasserstoffen, eines möglichen, tief liegenden Salzvorkommens und eines mässigen bis erhöhten geothermischen Potenzials. Die Nagra beurteilt das geologische Standortgebiet in dieser Hinsicht als bedingt geeignet. Mineralquellen und Thermen sind in der Nähe vorhanden, aber aufgrund hydraulischer Entkoppelung unproblematisch. Aufgrund des teilweise erhöhten geothermischen Potenzials, insbesondere im Bereich der südlich begrenzenden Störung, ist der Indikator 'Geothermie' nur als bedingt günstig bewertet. Das Kriterium 'Nutzungskonflikte' wird insgesamt günstig bewertet.

Die Explorierbarkeit ist gemäss Nagra günstig für seismische Untersuchungen und wird als sehr günstig für Bohrungen bewertet. Die Bewertung des Kriteriums 'Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen' fällt sehr günstig aus. Zusammen mit der sehr günstigen Bewertung des Kriteriums 'Charakterisierbarkeit der Gesteine' ergibt sich aus Sicht der Nagra eine sehr günstige Beurteilung der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen'.

Das Kriterium 'Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen' wird aufgrund der Tiefenlage < 600 m von der Nagra als günstig angesehen, aufgrund tektonischer Zergliederung aber auf bedingt günstig zurückgestuft. Die Bewertung für Kriterium 'Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung' seitens Nagra als sehr günstig führt zusammen mit den felsmechanischen Eigenschaften zu einer insgesamt günstigen Bewertung der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung'.

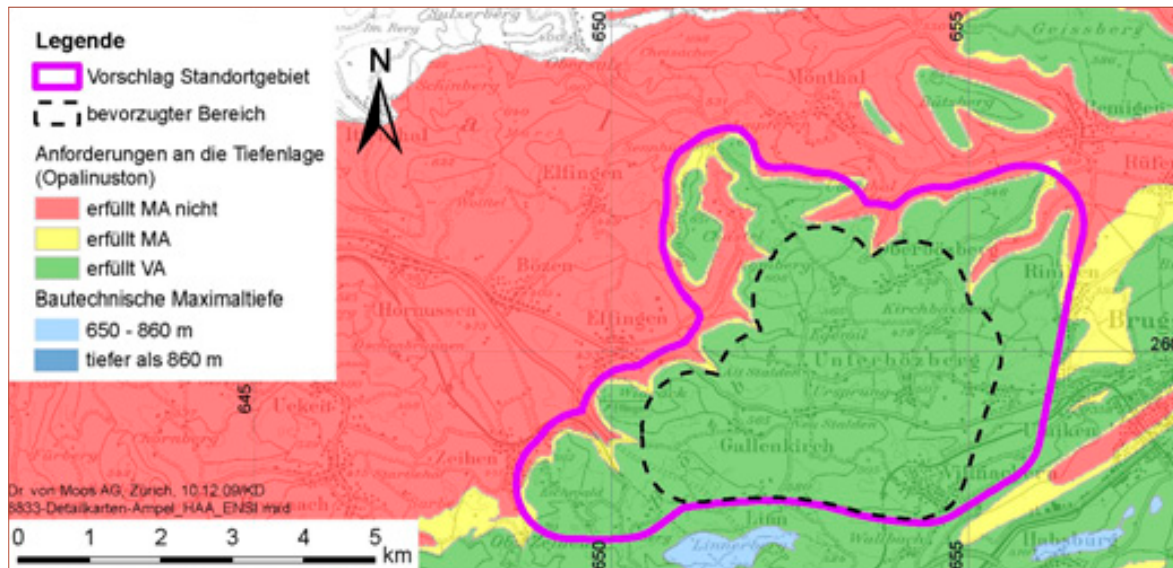
Beurteilung des ENSI

Das ENSI kann der Bewertung der Nagra für die Indikatoren 'Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade', 'Länge der Freisetzungspfade', das Kriterium 'Erosion' und die Kriteriengruppen 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' und 'Bautechnische Eignung' folgen. Bezüglich der Indikatoren 'Platzangebot untertags', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion', 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion', sowie der Kriterien 'Lagerbedingte Einflüsse', 'Nutzungskonflikte' und 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' kommt das ENSI zu abweichenden Bewertungen.

Hinsichtlich des Indikators 'Platzangebot untertags' ist bereits innerhalb des geologischen Standortgebiets die Richtung Westen stärker ausgeprägte tektonische Zergliederung der Vorfaltenzone in den seismischen Profilen (NTB 08-04, Beilagen 5.2-14 und -16) erkennbar. Nördlich der Jura-Hauptüberschiebung sind im geologischen Profil 30 (NTB 08-04, Beilage 5.2-14) zwei Rampen-Überschiebungen erkennbar, die vom Abscherhorizont in den Evaporiten der Mitteltrias bis in die Malmkalke nachzuweisen sind. Die Analyse des seismischen Profils 83-NF-31ST (NTB 08-04, Beilage 5.2-14) zeigt zwei weitere Rampenüberschiebungen, die in der Bohrung Riniken durchfahren wurden. In einer Tiefe von 420 bis 450 m wurde unter anderem im tieferen Teil des Opalinustons eine Zone starker Zergliederung und sekundärer Mineralausfällung registriert (NTB 88-09, S. 66, Beilage 5.1a). Das Platzangebot untertags wird vermutlich durch derartige tektonische Strukturen eingeschränkt. Die Bewertung des Indikators 'Platzangebot untertags' als günstig ist angesichts der Gebietsgrösse für das ENSI nachvollziehbar. Es bleibt anzumerken, dass angesichts der unklaren Laufgeschwindigkeiten seismischer Wellen im geologischen Standortgebiet in Hinblick auf die Mindestüberlagerung lokale Ungewissheiten bestehen (Figur 6.3-5).

Die hydraulische Barrierenwirkung ist durch einen reduzierten einschlusswirksamen Gebirgsbereich langfristig geringer als in den übrigen geologischen Standortgebieten, weil die oberen Rahmengesteine geringmächtiger und durchlässiger sind und im Nordbereich des geologischen Standortgebiets lokal über die kritische Obergrenze von 400 m unter Terrain hinaufreichen. Entsprechend kürzer sind auch die Freisetzungspfade. Sie werden von der Nagra als sehr günstig bewertet. Aus Sicht des ENSI wird eine sehr günstige Bewertung nur knapp erreicht, vor allem im Vergleich zu den übrigen HAA-Standortgebieten.

Das Kriterium 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' wird seitens der Nagra aufgrund der geologisch-tektonischen Situation als sehr günstig bezeichnet, obwohl gewisse Unsicherheiten über zu erwartende lokale Deformationsraten bestehen. Das Ausmass der Zergliederung ist aus Sicht des ENSI deutlich grösser als im Zürcher Weinland. Bei diesem Kriterium



Figur 6.3-5: Tiefenlage des Opalinustons im HAA-Standortgebiet Bözberg (Dr. von Moos AG 2009b). Rot: Basis < 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), gelb: Basis ≥ 470 m unter Terrain (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), grün: Basis ≥ 490 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit ≤ 100 m) oder Basis ≥ 590 m unter Felsoberfläche (wenn Quartärmächtigkeit > 100 m), hellblau: Top > 650 m unter Terrain, dunkelblau: Top > 860 m unter Terrain. Im bevorzugten Bereich werden die verschärften Anforderungen (VA) an die Tiefenlage erfüllt.

wirkt sich, wie auch im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren, das Gewicht des Indikators 'Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)' verzerrend aus, denn ohne diesen Indikator, der für alle geologischen Standortgebiete stets sehr günstig ist, fiel die Bewertung des Kriteriums auf günstig zurück. Weil aber die Beständigkeit des Wirtgesteins auch vom ENSI sehr günstig bewertet wird, kann einer sehr günstigen Bewertung des Kriteriums 'Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften' knapp gefolgt werden.

Hinsichtlich des Kriteriums 'Lagerbedingte Einflüsse' schätzt das ENSI die Nachteile des Opalinustons im Vergleich zu anderen Wirtgesteinen wie Granit als ausgeprägt genug ein, so dass eine bedingt günstige Gesamtbewertung zutreffend erscheint (vgl. HAA-Standortgebiet Zürcher Weinland).

Der differenzierten Bewertung der von der Nagra genannten Nutzungskonflikte kann das ENSI grundsätzlich folgen. Allerdings wird seitens der Nagra der Abbau von Kalk und Mergel für die Zementindustrie hier nicht berücksichtigt. Ein Gebiet am Homberg ist für den Abbau von Effinger Schichten projektiert. Falls ein Abbau bis zum heutigen Talgrund erfolgen würde, dann wären als Schutz des Wirtgesteins Opalinuston hier nur noch ca. 135 m «Brauner Dogger» in kalkiger, potenziell wasserführender Ausbildung plus ein Rest der Effinger Schichten vorhanden, die dann zur Dekompaktionszone zu zählen wären. Ein grossräumiger Abbau der Effinger Schichten für die Zementherstellung stellt langfristig eine Beeinträchtigung des geologischen Standortgebiets Bözberg dar. Zwar sind vergleichbare Gesteine weit verbreitet, aber die Effinger Schichten sind stofflich gut geeignet, mächtig entwickelt und im Nordteil des geologischen Standortgebiets grundsätzlich abbau- und transporttechnisch günstig gelegen.

Da sich im Bereich der Dekompaktionszone die Barriereneigenschaften des Opalinustons mit Annäherung an die Oberfläche stark verringern und die hangenden Rahmengesteine zuerst von der Auflockerung betroffen sind, ist eine Isolation von der Biosphäre über eine Million Jahre von der realen Erosionsrate abhängig. Die Annahme von 0.4 mm pro Jahr als konservative Schätzung würde die nördlichen Anteile des geologischen Standortgebiets auch ohne Abbau der Effinger Schichten vor Ablauf einer Million Jahre in den Bereich der Dekompaktionszone bringen. Hinsichtlich einer Schätzung realer Erosionsraten zeigt (Figur 4.1-2), dass in der Standortregion mit 60 bis 110 m Hebung pro Million Jahre gerechnet werden kann.

Das ENSI sieht die günstige Beurteilung des geologischen Standortgebiets Bözberg im Hinblick auf das Kriterium 'Nutzungskonflikte' kritischer und bewertet den von der Nagra als unwahrscheinlich eingestuften zukünftigen grossräumigen Abbau von Zementrohstoffen (NAB 09-29) oberhalb des Wirtgesteins als möglich, da bereits entsprechende Projekte bestehen. Aufgrund der Baustoffvorkommen und potenziell vorhandener Kohlenwasserstoffe im unterlagernden Permkarbondrog ergibt sich aus Sicht des ENSI eine insgesamt bedingt günstige Bewertung für das Kriterium 'Nutzungskonflikte'.

Hinsichtlich des Kriteriums 'Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse' bewertet das ENSI die drei verwendeten Indikatoren etwas schwächer, so dass sich wie im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägeren insgesamt eine günstige Bewertung ergibt.

Zusammenfassend kann das ENSI der sehr günstigen Bewertung der Nagra nur für den südlichen Kernbereich folgen. Für das gesamte geologische Standortgebiet hält das ENSI eine günstige Bewertung für sachgerecht. Das ENSI ist der Ansicht, dass die mässigen Barriereneigenschaften des «Braunen Doggers» bei der gegebenen geringen Tiefenlage und dem potenziellen Abbau von Zementrohstoff in den folgenden Etappen des SGT kritischer bewertet werden sollten. Gesamthaft gesehen stimmt das ENSI dem Vorschlag der Nagra aus Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

6.3.3 Prüfung von SMA-Standortgebieten auf mögliche Eignung für das HAA-Lager

Ein Abgleich der vorgeschlagenen SMA-Standortgebiete mit Blick auf eine mögliche Eignung auch für HAA erscheint dem ENSI für die Transparenz des Verfahrens nützlich. Zu den drei SMA-Standortgebieten Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg hat die Nagra auch HAA-Standortgebiete mit gleichem Namen vorgeschlagen. Die Gebiete gleichen Namens überlappen, sind jedoch nicht deckungsgleich, da die HAA-Standortgebiete aufgrund des längeren Schutzes vor Erosionsvorgängen eine grössere Tiefenlage des Opalinustons erfordern.

Während im Zürcher Weinland und Nördlich Lägeren die Flächen fast gleich gross sind, ist das SMA-Gebiet Bözberg aufgrund der geringen Tiefenlage des Opalinustons mehr als doppelt so gross wie das entsprechende HAA-Standortgebiet. Grundsätzlich behält sich die Nagra für diese drei Standorte die Option eines Kombilagers vor (ein Standort mit Lagerteilen für SMA und HAA).

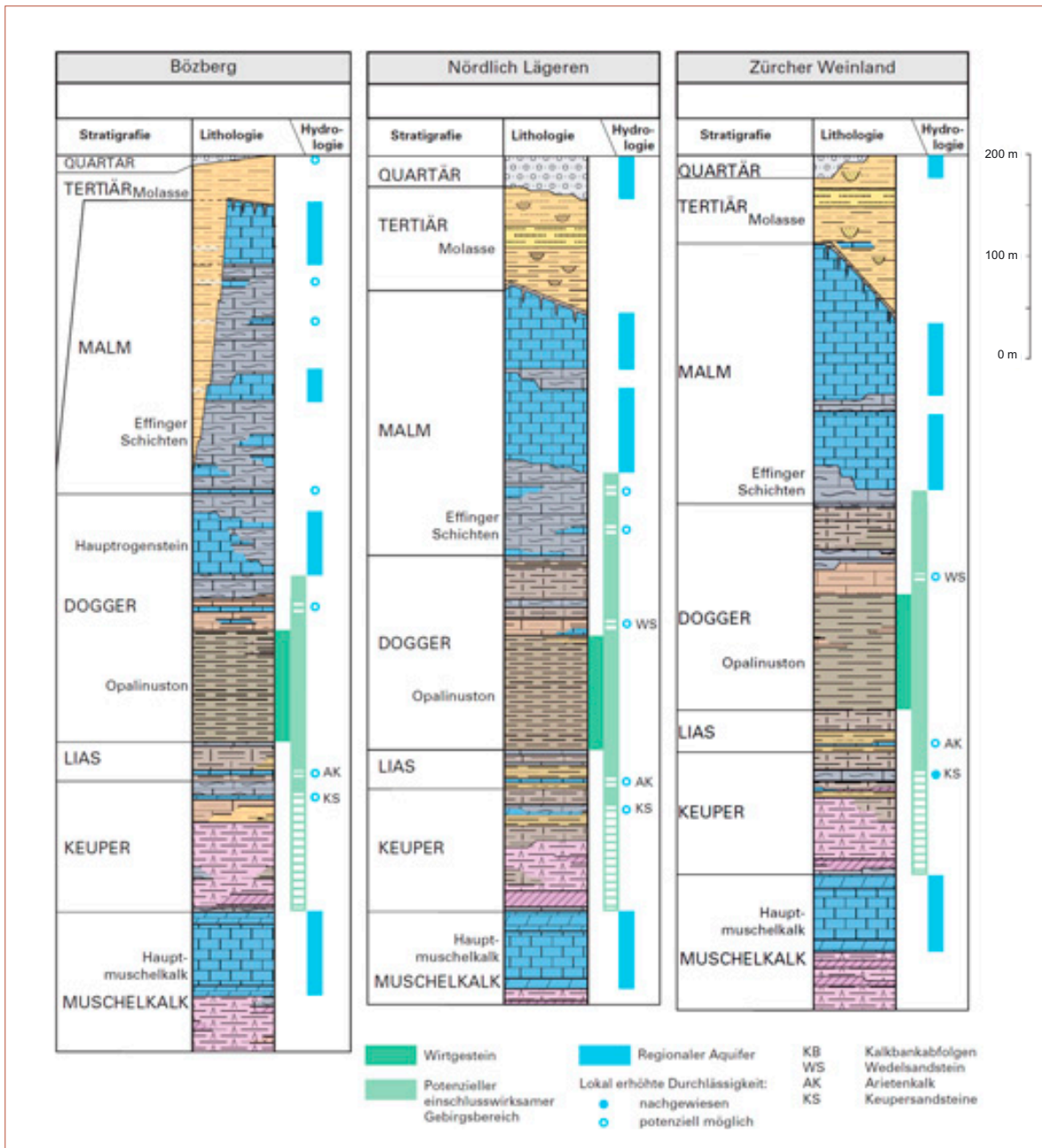
Für drei weitere SMA-Standortgebiete wurden keine HAA-Lager vorgeschlagen. Im geologischen Standortgebiet Südranden liegt nur ein kleiner Teil des Opalinustons in genügender Tiefe für ein HAA-Lager. Dadurch wird das Platzangebot deutlich zu gering (Mindestanforderung nicht erfüllt, NTB 08-03, S. 225). Das geologische Standortgebiet Jura-Südfuss kommt für ein HAA-Lager ebenfalls aus Platzgründen nicht in Frage (NTB 08-03, S. 365), denn die Wirtgesteinsgeometrie mit variierenden Streich- und Fallrichtungen der Schichten bietet keine genügenden Bedingungen für die Anordnung der Lagerkammern (NTB 08-03, S. 342). Während im Falle der SMA-Lager bei der Anordnung der Lagerkavernen flexibel auf die lokalen geologischen Verhältnisse reagiert werden kann, wäre ein HAA-Lager mit dem vorgeschlagenen Lagerkonzept kaum umsetzbar. Das geologische Standortgebiet Wellenberg liegt im geologisch-tektonischen Grossraum Alpen, welcher für HAA-Lager aus Sicht des ENSI nicht in Frage kommt (NTB 08-03, S. 109).

Das ENSI kann das Vorgehen der Nagra zur räumlichen Abgrenzung von HAA- und SMA-Standortgebieten nachvollziehen und ist mit der verbleibenden Auswahl der drei geologischen Standortgebiete einverstanden.

Als Schlussfolgerung ergibt sich für das ENSI, dass kein potenziell geeignetes, zumindest als bedingt günstig zu bewertendes HAA-Standortgebiet zurückgestellt oder übersehen worden ist.

6.3.4 Vergleich der hydrogeologischen Situation in den HAA-Standortgebieten

Ein massstabsgetreuer schematischer Vergleich der einschlusswirksamen Gebirgsbereiche der drei HAA-Standortgebiete stellt die Unterschiede hinsichtlich der Wasserwegsamkeiten bzw. der regionalen Aquifere gegenüber (Figur 6.3-6). Man erkennt die nach Westen zunehmende Mächtigkeit von Malmgesteinen, insbesondere der Effinger Schichten und relativ geringmächtigem und kalkigem «Braunen Dogger» am Bözberg mit geringmächtigem einschlusswirksamem Gebirge oberhalb des Opalinustons. Unterhalb des Opalinustons sind der einschlusswirksame Gebirgsbereich und der Muschelkalk-Aquifer darunter in allen Gebieten ähnlich ausgebildet.



Figur 6.3-6: Gesteinsabfolge und potenzielle Wasserführung der HAA-Standortgebiete im Vergleich (zusammengestellt durch Dr. von Moos AG).

Potenziell mögliche lokale Wasserführung innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist in Kalkbänken und Lagen der Wedelsandstein-Formation des «Braunen Doggers», im Arietenkalk des unteren Lias und in Keupersandsteinen möglich. Die lokale Mächtigkeit des Wedelsandsteins (Nördlich Lägeren) ist nicht vorhersagbar und von der Erdoberfläche aus schwer zu erkunden. Der hydraulische Gradient in den Aquiferen ist in allen drei Gebieten relativ gering.

Zusammenfassend stellt das ENSI aufgrund der vergleichenden Profilvergleichung fest, dass die hydrogeologischen Verhältnisse bezüglich Lage und Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im geologischen Standortgebiet Zürcher Weinland besonders vorteilhaft sind.

6.4 Zusammenfassende Bewertung der Vorschläge geologischer Standortgebiete

Aus der Überprüfung des Schrittes 5 kommt das ENSI zum Schluss, dass die Nagra für die Identifikation geeigneter Konfigurationen für SMA- und HAA-Wirtgesteine und die Evaluation potenzieller geologischer Standortgebiete die Vorgaben des SGT und die darin definierten 13 sicherheitstechnischen Kriterien adäquat berücksichtigt hat. Das ENSI beurteilt das von der Nagra für den Einengungsprozess verwendete Geografische Informationssystem GIS, mit welchem durch Anwendung von Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen schrittweise nicht geeignete Bereiche weggeschnitten und schliesslich geeignete Restbereiche aufgezeigt werden, als zielführend, transparent und nachvollziehbar.

Die Überprüfung der GIS-Methode und des GIS-Schnittverfahrens durch eigene Nachrechnungen zeigt, dass das geologische GIS-Modell Nordschweiz in seiner Struktur zweckmässig ist, dass alle verfügbaren geologischen Grundlagedaten berücksichtigt wurden und dass der Schnittprozess nachvollziehbar und unter Berücksichtigung der sicherheitstechnischen Kriterien des SGT korrekt durchgeführt wurde. Das ENSI ist mit den von der Nagra mit dem GIS-Schnittverfahren eingegrenzten bevorzugten Bereichen mit Opalinuston, «Brauner Dogger» und Effinger Schichten für das SMA-Lager und von Opalinuston für HAA-Lager in der Nordschweiz einverstanden.

Für die SMA-Mergelgesteine des Helvetikums, wo wegen der komplexen geometrischen Verhältnisse ein GIS-unterstütztes Vorgehen nicht zielführend ist, legt die Nagra eine Beurteilung der lokalen helvetischen Mergelvorkommen bezüglich der Erfüllung der Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen vor. Sie fasst anschliessend das Ergebnis der Evaluation anhand einer Bewertungsmatrix der sicherheitstechnischen Kriterien zusammen, was zur Einengung auf den Wellenberg führt. Nach Ansicht des ENSI ist dieses Vorgehen nachvollziehbar und korrekt.

Für die Ausarbeitung der Vorschläge geologischer Standortgebiete fasst die Nagra ihre auf der Hierarchiestufe von Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen durchgeführte Bewertung in Form von Tabellen für jeden eingegrenzten bevorzugten Bereich zusammen. Das ENSI stimmt diesen Bewertungen mit wenigen Ausnahmen im Grundsatz zu. Die Gesamtbewertung des ENSI unterscheidet sich von derjenigen der Nagra nur geringfügig, so dass das ENSI der Evaluation der aufgeführten zwölf bevorzugten Bereiche für ein SMA-Lager und den vier bevorzugten Bereichen für ein HAA-Lager zustimmen kann.

Die Nagra ergänzt ihre Bewertung der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die Festlegung geologischer Standortgebiete mit einer zusätzlichen wirtgesteinsspezifischen Prioritätensetzung je für SMA- und HAA-Lager. Das Ziel dieser Prioritätensetzung wurde für das ENSI erst nach Rückfragen und Einholen von Zusatzinformationen bei der Nagra nachvollziehbar. Mit der Prioritätensetzung will die Nagra eine möglichst breite Vielfalt an Wirtgesteinen, eine optimale Abgrenzung der geologischen Standortgebiete, Flexibilität bezüglich Wirtgesteinen und vergleichbare Sicherheit erreichen. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehens als zielführend und sicherheitsgerichtet. Die Diversität an Wirtgesteinen bleibt mit diesem Vorgehen erhalten und ist auch sinnvoll, da eine vertiefte sicherheitstechnische Analyse und damit ein direkter Vergleich der Eignung des Wirtge-

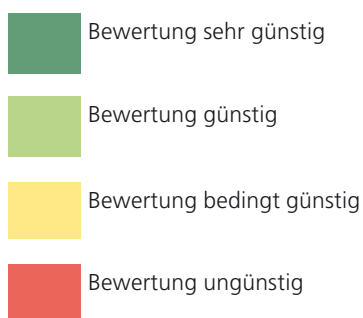
steins erst in Etappe 2 erfolgt. Die Möglichkeit, an einem geologischen Standortgebiet zwei Wirtgesteine für das Lager zur Verfügung zu haben, ist nach Ansicht des ENSI vorteilhaft, da die jeweiligen sicherheitstechnischen Stärken der zur Verfügung stehenden Wirtgesteine miteinander verknüpft werden können. Die Zielsetzung der Nagra, nur geologische Standortgebiete vorzuschlagen, die die Bewertungsstufe geeignet oder sehr geeignet erreicht haben, beurteilt das ENSI aus Sicht der Sicherheit in Hinblick auf den sicherheitstechnischen Vergleich in den späteren Etappen des Sachplanverfahrens als zweckmässig und zielführend.

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass es den von der Nagra ausgearbeiteten Vorschlägen für geologische Standortgebiete für das SMA-Lager (Südranden, Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren, Bözberg, Jura-Südfuss und Wellenberg) und für das HAA-Lager (Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg) zustimmen kann.

Die Bewertung der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete durch das ENSI auf der Stufe der 13 sicherheitstechnischen Kriterien des SGT ist in den Tabellen 6.4-1 und 6.4-2 zusammengefasst, woraus die Abweichungen zur Bewertung der Nagra ersichtlich werden. Aufgrund des Vorgehens bei der Bewertung durch das ENSI (vgl. Kapitel 3.4) sind die Tabellen nur beschränkt für einen Vergleich zwischen den Standortgebieten geeignet. Das Ableiten einer Rangliste unter den Standortgebieten auf der Basis der Tabellen ist wegen der Verschiedenheit der 13 Kriterien und wegen unterschiedlichem Kenntnisstand nicht sinnvoll. Es lässt sich aber grundsätzlich festhalten, dass Gebiete mit ruhigen Lagerungsverhältnissen (Tafeljura mit den Standortgebieten Südranden und Zürcher Weinland) gegenüber Gebieten erhöhter (Jura-Südfuss) oder starker (Wellenberg) Tektonisierung insgesamt als geeigneter beurteilt werden.

Tabelle 6.4-1: Gegenüberstellung der Bewertung der 13 sicherheitstechnischen Kriterien für alle sechs SMA-Standortgebiete durch die Nagra und das ENSI. Bei Standortgebieten, die sich aus mehr als einem bevorzugten Bereich pro Standortgebiet zusammensetzen, wurde die Bewertung der Nagra aus den Tabellen C.4-1 bis -12 (NTB 08-03) arithmetisch aggregiert. Die Differenzen zwischen Nagra und ENSI werden in Kapitel 6.2 erläutert.

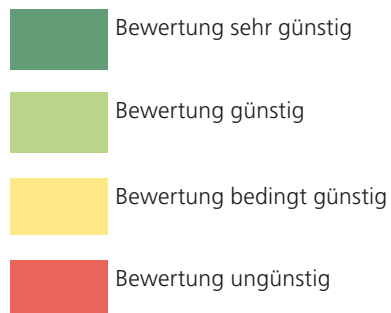
Kriterium (gemäss SGT)	Südranden		Zürcher Weinland		Nördlich Lägeren		Bözberg		Jura-Südfuss		Wellenberg	
	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI
1.1 Räumliche Ausdehnung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1.3 Geochemische Bedingungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1.4 Freisetzungspfade	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.2 Erosion	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2.4 Nutzungskonflikte	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	1)
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■



1 Exploration vermutlich nur mit Sondierstollen möglich

Tabelle 6.4-2: Gegenüberstellung der Bewertung der 13 sicherheitstechnischen Kriterien für die drei HAA-Standortgebiete durch die Nagra und das ENSI. Die Bewertung der Nagra wurde aus den Tabellen C.4-13 bis -16 (NTB 08-03) übernommen und für die beiden bevorzugten Bereiche des geologischen Standortgebiets Nördlich Lägeren arithmetisch aggregiert. Die Differenzen zwischen Nagra und ENSI werden in Kapitel 6.3 erläutert.

Kriterium (gemäss SGT)	Zürcher Weinland		Nördlich Lägeren		Bözberg	
	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI	Nagra	ENSI
1.1 Räumliche Ausdehnung	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	günstig	sehr günstig	sehr günstig
1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
1.3 Geochemische Bedingungen	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
1.4 Freisetzungspfade	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
2.2 Erosion	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
2.3 Lagerbedingte Einflüsse	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
2.4 Nutzungskonflikte	günstig	günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	günstig	bedingt günstig
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	sehr günstig	sehr günstig	günstig	günstig	sehr günstig	günstig
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig	sehr günstig
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig	bedingt günstig
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	sehr günstig	sehr günstig	günstig	günstig	sehr günstig	sehr günstig



7 Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen

7.1 Das Vorgehen gemäss Sachplan geologische Tiefenlager

Der Sachplan geologische Tiefenlager legt im Konzeptteil das Verfahren und die Kriterien fest, nach denen Standorte für geologische Tiefenlager für alle Kategorien radioaktiver Abfälle in der Schweiz ausgewählt werden. Das Auswahlverfahren besteht aus drei Etappen, die in einem Einengungsverfahren ausgehend von der ganzen Schweiz zu Standorten für die benötigten geologischen Tiefenlager führen. Der Sachplan geht davon aus, dass die Auswahl der geologischen Standortgebiete in Etappe 1 basierend auf allen bisherigen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der geologischen Kenntnisse der Schweiz erfolgt. Wo nötig, sind diese Kenntnisse in den folgenden Etappen stufengerecht zu vertiefen. Die Sicherheit hat im gesamten Auswahlverfahren oberste Priorität. Das Auswahlverfahren wird für ein Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und für ein Lager für hochaktive Abfälle (HAA) parallel durchgeführt.

In Etappe 1 schlagen die Entsorgungspflichtigen aufgrund von Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit geeignete geologische Standortgebiete vor und begründen ihre Auswahl. Sie haben sich dabei an die im Konzeptteil vorgegebenen Schritte zu halten:

1. Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA
2. Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben für die Standortevaluation
3. Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume
4. Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche
5. Identifikation geeigneter Konfigurationen

Nach Ausführung dieser fünf Schritte legen die Entsorgungspflichtigen eine zusammenfassende Bewertung der identifizierten geologischen Standortgebiete vor und stellen das Ergebnis auf einer qualitativen Werteskala dar. Die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete müssen mindestens mit bedingt geeignet bewertet sein.

In der zweiten Etappe erfolgt eine Einengung auf mindestens zwei Standorte pro Lagertyp, die in der dritten Etappe vertieft untersucht werden. Die Entsorgungspflichtigen schlagen schliesslich pro Lagertyp einen Standort vor und bereiten die Rahmenbewilligungsgesuche vor.

Das ENSI trägt als zuständige Aufsichtsbehörde des Bundes die Gesamtverantwortung für die sicherheitstechnische Überprüfung. Es beurteilt die von der Nagra eingereichten Vorschläge und erstellt ein sicherheitstechnisches Gutachten. Dabei wird das ENSI von der Kommission Nukleare Entsorgung KNE sowie von swisstopo und weiteren Experten unterstützt. Die Kommission für nukleare Sicherheit KNS fasst zum Gutachten des ENSI eine Stellungnahme.

7.2 Eingereichte Vorschläge der Nagra

Am 17. Oktober 2008 hat die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) bei den Bundesbehörden ihre Vorschläge für geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager eingereicht.

Das von der Nagra durchgeführte Auswahlverfahren hat zu den folgenden Vorschlägen für geologische Standortgebiete geführt:

Sechs Standortgebiete für das Lager für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA-Lager):

- Südranden (SH) mit dem Wirtgestein Opalinuston
- Zürcher Weinland (ZH, TG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'
- Nördlich Lägeren (ZH, AG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger'
- Bözberg (AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston
- Jura-Südfuss (SO, AG) mit den Wirtgesteinen Opalinuston und Effinger Schichten
- Wellenberg (NW, OW) mit dem Wirtgestein Mergel-Formationen des Helvetikums

Drei Standortgebiete für das Lager für hochaktive Abfälle (HAA-Lager):

- Zürcher Weinland (ZH, TG) mit dem Wirtgestein Opalinuston
- Nördlich Lägeren (ZH, AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston
- Bözberg (AG) mit dem Wirtgestein Opalinuston

Die Vorschläge geologischer Standortgebiete und das Vorgehen der Nagra sind im Bericht NTB 08-03 beschrieben. Die geologischen und technischen Grundlagen sind in den Berichten NTB 08-04 (Geologie), NTB 08-05 (Abfallzuteilung und Sicherheit) und NTB 08-06 (Abfallinventar), sowie in zahlreichen Referenzberichten enthalten.

Im Rahmen der behördlichen Überprüfung der Vorschläge wurden vom ENSI und seinen Experten eine Reihe von spezifischen Fragen formuliert und von der Nagra beantwortet. Diese Antworten (NAB 09-29) bilden einen weiteren Bestandteil der Dokumentation zu den Standortgebietsvorschlägen der Nagra.

7.3 Beurteilung der Abfallzuteilung (Schritt 1)

Die von der Nagra vorgeschlagene Zuteilung der Abfälle zum SMA- bzw. HAA-Lager basiert auf den Resultaten von Berechnungen zur Langzeitsicherheit für ein breites Spektrum von möglichen Gesteinseigenschaften und geologischen Situationen. Die unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Abfallsorten werden in den Berechnungen berücksichtigt. Die Nagra kommt aufgrund dieser Analysen zum Schluss, dass ein kleiner Teil der SMA (weniger als 1 % Volumenanteil) zusammen mit den alphanotoxischen Abfällen (ATA) im HAA-Lager zu entsorgen sind.

Das ENSI hat die Angaben der Nagra durch eigene Berechnungen überprüft und nachvollziehen können. Die Dokumentation der Abfallarten und ihrer Inventare ist aus Sicht des ENSI für Etappe 1 ausreichend. Bezüglich Abfallvolumen berücksichtigt die Nagra auch die Abfälle absehbarer zukünftiger Kernkraftwerke. Den Abschätzungen der zu entsorgenden Abfallmengen legt die Nagra ein Szenario zugrunde, das für die bestehenden KKW von 60 Jahren Betriebszeit ausgeht und eine optionale zusätzliche Elektrizitätsproduktion von 5 GWe während 60 Jahren durch neue KKW berücksichtigt. Das Volumen der dadurch insgesamt entstehenden, konditionierten und in Endlagerbehälter verpackten Abfälle schätzt die Nagra auf 200'000 m³ für das SMA-Lager und 20'000 m³ für das HAA-Lager. Die ATA und die dem HAA-Lager zugeteilten SMA werden mit 7'500 m³ beziffert; diese Abfälle bezeichnet die Nagra als LMA («langlebige mittelaktive Abfälle»). Die Nagra hat diese Angaben transparent dargelegt. Die Abfallmengen sind grosszügig gewählt und für das ENSI nachvollziehbar. Abfallmengen aus angenommenen neuen, noch nicht geplanten Forschungsanlagen sind ebenfalls berücksichtigt. Die zu erwartenden Abfallmengen aus der Stilllegung der Grossforschungsanlagen von CERN und PSI sind nur näherungsweise bekannt; ihre effektive Zusammensetzung wird erst später bekannt sein. Eine vertiefende Charakterisierung dieser Abfälle ist anzustreben; die Ergebnisse sind zu dokumentieren.

Zusammenfassend stimmt das ENSI der von der Nagra gewählten Zuteilung der Abfälle auf das SMA- und das HAA-Lager zu.

7.4 Beurteilung des Sicherheitskonzepts und der Anforderungen an die geologische Barriere (Schritt 2)

Das Sicherheitskonzept der Nagra beruht sowohl für das SMA- wie für das HAA-Lager auf dem gesetzlich vorgeschriebenen System von gestaffelten, passiv wirkenden technischen und natürlichen Barrieren. Diese bestehen im Fall des SMA-Lagers (und des LMA-Teils des HAA-Lagers) aus den verfestigten Abfallmatrizen in mit Zementmörtel verfüllten Lagercontainern, dem Zementmörtel als Verfüllmaterial für die Hohlräume des Tiefenlagers, und aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Wirtgestein und Rahmengesteine). Im Fall des HAA-Lagers bestehen die hauptsächlichen Barrieren aus den schwerlöslichen Brennstofftabletten (bzw. den Glasmatrizen im Fall der hochaktiven Wiederaufarbeitungsabfälle), den massiven Stahlbehältern, dem Bentonit als wasserundurchlässiges Verfüllmaterial sowie aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Das ENSI beurteilt dieses Sicherheitskonzept für geeignet, um den im Kernenergiegesetz und in der Richtlinie ENSI-G03 geforderten Schutz von Mensch und Umwelt zu gewährleisten. Dieses Konzept ist darauf ausgerichtet, dass sowohl die technischen als auch die geologischen Barrieren zum Einschluss und zur Rückhaltung der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide im geologischen Tiefenlager beitragen.

Der erforderliche Platzbedarf für das geologische Tiefenlager ist eine wichtige Grundanforderung an das Wirtgestein bzw. an das geologische Standortgebiet. Aus dem umhüllenden Abfallvolumen leitet die Nagra einen Platzbedarf von 2 bis 3 km² für das SMA-Lager und 4 bis 6 km² für das HAA-Lager ab. Der Platzbedarf ist aus Sicht des ENSI korrekt gewählt und nachvollziehbar.

Als Betrachtungszeitraum für die Langzeitsicherheit werden von der Nagra aufgrund der Radiotoxizität und des radioaktiven Zerfalls 100'000 Jahre für das SMA-Lager und 1 Million Jahre für das HAA-Lager angegeben. Der Betrachtungszeitraum legt fest, wie lange die Barrieren des geologischen Tiefenlagers ihre Funktion zu erfüllen haben. Die Überprüfung durch das ENSI zeigt, dass die Herleitung dieser Zeiträume nachvollziehbar ist. Die Nagra setzt damit die Anforderung aus der Richtlinie ENSI-G03 um.

Die quantitativen Vorgaben an die geologische Barriere wurden mittels generischer Sicherheitsbetrachtungen stufengerecht hergeleitet. Die abgeleiteten Zielvorgaben für die Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit der Wirtgesteine hat das ENSI durch unabhängige Berechnungen weitgehend bestätigt. Bezüglich der maximalen Tiefenlage für das HAA-Lager beurteilt das ENSI den von der Nagra gewählten Wert von 900 m unter Terrain in Tongesteinen als optimistisch in Bezug auf die bautechnischen Anforderungen. Berechnungen des ENSI zeigen, dass in Tiefen > 650 m zusätzliche Sicherungsmittel erforderlich sind. Sollte eine Lagertiefe zwischen 650 und 900 m in Betracht gezogen werden, müssen die Auswirkungen der zusätzlichen Stützmittel auf die Langzeitsicherheit vertieft untersucht werden. Bezüglich der SMA-Lager kommt das ENSI zum Schluss, dass die festgelegten Anforderungen an die maximale Tiefenlage nachvollziehbar und sinnvoll sind.

Die Auswirkung von lagerinduzierten Einflüssen (wie die chemischen Auswirkungen der Zementverfüllung auf das Wirtgestein oder die Gasbildung und der Gastransport im Tiefenlager und in der Geosphäre) auf die Langzeitsicherheit eines Tiefenlagers wurden von der Nagra stufengerecht und nachvollziehbar dokumentiert. Die Überprüfung der verwendeten Konzepte und Resultate der Nagra durch eigene Berechnungen zeigt, dass für SMA-Lager die Barrierenfunktion des Wirtgesteins nicht in Frage gestellt ist. Für ein HAA-Lager im Opalinuston waren entsprechende Beurteilungsergebnisse bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises erbracht worden.

Die weiteren Anforderungen an die geologische Barriere hat das ENSI ebenfalls im Detail geprüft und beurteilt sie als korrekt und stufengerecht. Der Herleitung der Mindestanforderungen für die Indikatoren kann das ENSI weitgehend folgen. Die Definition von verschärften Anforderungen, die bei der Einengung auf die vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete zur Anwendung kommen, erachtet das ENSI als sicherheitsgerichtet.

Die Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologische Barriere entspricht den Vorgaben des Sachplans.

7.5 Beurteilung der Vorschläge für geologisch-tektonische Grossräume (Schritt 3)

Bei der Identifizierung geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume hat die Nagra primär die Langzeitstabilität und die Geometrie betrachtet. Sie hat Grossräume gesucht, die keine starke tektonische Zergliederung aufweisen, und in denen in den Betrachtungszeiträumen von 100'000 Jahren (SMA-Lager) und 1 Million Jahren (HAA-Lager) keine generellen geologisch-tektonischen Veränderungen zu erwarten sind, die die Sicherheit des Lagers in Frage stellen könnten. Die Nagra präsentiert umfangreiche Literatur zu den geologischen Grundlagen sowie aktuelle eigene Studien.

Das ENSI hat angesichts zum Teil widersprüchlicher Publikationen der letzten Jahre zu grossräumiger Erosion und Modellvorstellungen zur Geodynamik der Alpen und ihres Vorlandes eigene Untersuchungen vorgenommen und gemeinsam mit der KNE auf zwei Symposien den aktuellen Kenntnisstand evaluiert. Es ergeben sich daraus keine grundsätzlichen Abweichungen von dem seitens der Nagra dargelegten Wissensstand. Der Gliederung, Darstellung und Bewertung der geologisch-tektonischen Grossräume kann daher gefolgt werden.

Grossräume für SMA: Das ENSI teilt die Ansicht der Nagra, dass die Mindestanforderungen an die geologisch-tektonischen Grossräume in der Schweiz für das SMA-Lager grundsätzlich überall erfüllt sind. In den Alpen zieht das ENSI jedoch eine differenziertere Betrachtung vor und stuft Gebiete mit hohen Hebungsraten (> 1 mm pro Jahr) und Gebiete mit hohen Gradienten von Hebungsraten und damit erhöhter seismischer Aktivität (z. B. Wallis, St. Galler Rheintal) als ungünstig ein. Aufgrund stark abnehmender quellfähiger Tonmineralgehalte sind für tonreiche Gesteine alpine Gebiete mit mindestens anchizonal-metamorpher Überprägung ebenfalls als ungünstig anzusehen. Die Nordwestschweiz und der nördliche Teil der Alpen sind generell als bedingt günstig anzusehen, weil ein gewisses Ausmass von Zergliederung besteht. Der Bewertung als günstig bis sehr günstig für den östlichen Tafeljura (inklusive Vorfaltenzone) und das zentrale und östliche Molassebecken kann das ENSI folgen.

Grossräume für HAA: Durch den Ausschluss stärker tektonisch zergliederter Grossräume und solcher mit Erosionsraten über 0.4 mm pro Jahr sind nur der östliche Tafeljura (inklusive Vorfaltenzone) und das Molassebecken der Nordostschweiz als günstig bis sehr günstig für das HAA-Lager zu bewerten. Während für die östliche Subjurassische Zone die Bewertung bedingt günstig als passend angesehen wird, rechtfertigen insbesondere die Zergliederung durch rheinische Störungen, die lokale Seismizität und die Verkippung der Schichten eine ungünstigere Bewertung für das westliche Molassebecken. Die Subjurassische Zone des westlichen Molassebeckens, der Faltenjura und die Region Basel mit dem westlichen Tafeljura werden nach Ansicht des ENSI zu Recht als ungenügend klassifiziert und für die folgenden Schritte nicht weiter betrachtet.

7.6 Beurteilung der potenziell geeigneten Wirtgesteine (Schritt 4)

Die von der Nagra auf der Basis von 27 Sammelprofilen schweizweit vorgenommene Analyse der Sedimentgesteine bzw. der darunter liegenden Kristallineinheiten stellt aus Sicht des ENSI eine gute Basis für die Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine dar. Das von der Nagra vorgenommene Auswahlverfahren in Teilschritten ist transparent und nachvollziehbar.

Das ENSI ist mit den von der Nagra vorgeschlagenen bevorzugten Wirtgesteinen für das SMA-Lager einverstanden. Diverse tonreiche und mächtige Gesteine wie die Bündnerschiefer (zu hoch metamorph und zu stark tektonisch überprägt), die Flysche (oft zu hoch metamorph, zu stark tektonisch überprägt oder zu sandig) oder die tonreichen Gesteine der Molasseablagerungen (Untere und Obere Süsswassermolasse: zu heterogen, zu durchlässig und schlecht prognostizierbar) erfüllen einzelne Anforderungen betreffend die Sicherheit und die technische Machbarkeit nicht. Auch tonarme Gesteine wie die Evaporite und das Kristallin erfüllen die Mindest- oder verschärften Anforderungen nicht. Aus den Teilschritten verbleiben für das ENSI, in Übereinstimmung mit der Nagra, die bevorzugten Wirtgesteine Opalinuston, der direkt über dem Opalinuston liegende «Braune Dogger», die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums im Alpenraum.

Die Wahl des Opalinustons als einziges bevorzugtes Wirtgestein für das HAA-Lager ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar. Der Opalinuston erfüllt auch aus Sicht des ENSI alle verschärften Anforderungen, wohingegen die ebenfalls die Mindestanforderungen erfüllenden Gesteine des Kristallins der Nordschweiz, der Unteren und Oberen Süsswassermolasse, der Effinger Schichten und des «Braunen Doggers» im Vergleich zu Opalinuston entweder stärker durchlässig sind oder aufgrund ihrer Inhomogenität Nachteile aufweisen. Der im Betrachtungsmaassstab des HAA-Lagers homogen ausgebildete, äusserst feinkörnige Opalinuston mit seinem hohen Tonmineralgehalt und ausgeprägten Sebtabdichtungsvermögen weist sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten und damit verknüpft ein sehr hohes Einschlussvermögen auf, was die Wahl dieser Gesteinsformation als einziges bevorzugtes Wirtgestein für das HAA-Lager aus Sicht des ENSI rechtfertigt.

7.7 Beurteilung der Wirtgesteinskonfigurationen (Schritt 5)

Ziel dieses Schrittes ist die Festlegung von geologischen Standortgebieten für das SMA- und das HAA-Lager. In Betracht kommen dabei die in Schritt 4 ausgewählten Wirtgesteine in den in Schritt 3 bezeichneten geologisch-tektonischen Grossräumen.

Die Nagra identifiziert mit Hilfe eines GIS-basierten Schnittverfahrens, das vom ENSI im Detail geprüft wurde, diejenigen Bereiche in den bezeichneten geologisch-tektonischen Grossräumen, in denen die ausgewählten Wirtgesteine in geeigneter Tiefenlage und mit der notwendigen Mächtigkeit vorkommen. Regionalen Störungszonen wird ausgewichen. Es werden weitere Anforderungen berücksichtigt, wodurch die Bereiche räumlich reduziert werden, bis nur noch solche mit optimalen Eigenschaften übrig bleiben. Die resultierenden, so genannten bevorzugten Bereiche (12 für SMA und 4 für HAA) werden einer zusammenfassenden Bewertung unterzogen und in prioritäre und nicht-prioritäre Bereiche unterteilt. Diese Unterteilung erfolgt pro Wirtge-

stein. Ausgehend von den prioritären Bereichen werden geologische Standortgebiete abgegrenzt. Nicht-prioritäre Bereiche, die in unmittelbarer Nähe eines prioritären Bereichs liegen oder mit diesem überlappen, werden in das geologische Standortgebiet integriert. Auf diese Weise resultieren 6 geologische SMA-Standortgebiete und 3 geologische HAA-Standortgebiete.

Anhand der Überprüfung des Schrittes 5 kommt das ENSI zum Schluss, dass die Nagra für die Identifikation geeigneter Konfigurationen für SMA- und HAA-Wirtgesteine und die Evaluation potenzieller geologischer Standortgebiete die Vorgaben des Sachplans und die darin definierten 13 sicherheitstechnischen Kriterien adäquat berücksichtigt hat. Das ENSI beurteilt das von der Nagra für den Einengungsprozess verwendete GIS-Verfahren, mit dem durch Anwendung von Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen schrittweise nicht geeignete Bereiche weggeschnitten und schliesslich geeignete Restbereiche aufgezeigt werden, als zielführend, transparent und nachvollziehbar.

Die Überprüfung der GIS-Methode und des GIS-Schnittverfahrens durch eigene Nachrechnungen zeigt, dass das geologische GIS-Modell Nordschweiz in seiner Struktur zweckmässig ist, und dass die relevanten verfügbaren geologischen Daten berücksichtigt wurden. Der von der Nagra verwendete Schnittprozess ist nachvollziehbar und wurde unter Berücksichtigung der vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien korrekt durchgeführt. Das ENSI ist mit den von der Nagra auf diese Weise eingegrenzten bevorzugten Bereichen der Wirtgesteine Opalinuston, «Brauner Dogger» und Effinger Schichten für das SMA-Lager und Opalinuston für das HAA-Lager in der Nordschweiz einverstanden.

In den Mergelgesteinen des Helvetikums ist wegen der komplexen geometrischen Verhältnisse keine GIS-Anwendung möglich. Die Nagra legt bezüglich der Erfüllung der Mindestanforderungen und verschärften Anforderungen eine Beurteilung der lokalen helvetischen Mergelvorkommen vor. Das Ergebnis der Evaluation verschiedener bekannter Mergel-Formationen des Helvetikums wird anhand einer Bewertung der sicherheitstechnischen Kriterien zusammengefasst. Dies führt aus Sicht des ENSI, trotz einiger Abweichungen in den Bewertungen einzelner Kriterien, zur korrekten Einengung auf das Standortgebiet Wellenberg. Mit Verweis auf die Einheitlichkeit des Verfahrens ergibt sich jedoch seitens ENSI eine Abweichung: Beim Wellenberg ist bei der Beurteilung des untertägigen Platzangebots ein Abstand zu potenziell wasserführenden Kalksteinen der angrenzenden Deckeneinheiten zu berücksichtigen, der dem Abstand zu regionalen Störungszonen bei Standortgebieten mit flächenhaft verbreiteten Wirtgesteinen entspricht. Dadurch reduziert sich das untertägige Platzangebot im Standortgebiet Wellenberg; es erfüllt jedoch die verschärften Anforderungen weiterhin.

Für die Ausarbeitung der Vorschläge geologischer Standortgebiete fasst die Nagra ihre auf der Stufe von Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen durchgeführte Bewertung in Form von Tabellen für jeden eingegrenzten bevorzugten Bereich zusammen. Das ENSI stimmt diesen Bewertungen mit einigen Ausnahmen zu. Abweichungen sind in Kapitel 6.4 zusammengefasst. Die Gesamtbewertung des ENSI unterscheidet sich von derjenigen der Nagra nur geringfügig, so dass das ENSI der Evaluation der aufgeführten 12 bevorzugten Bereiche für das SMA-Lager und der 4 bevorzugten Bereiche für das HAA-Lager zustimmen kann.

Mit der wirtgesteinsspezifischen Prioritätensetzung strebt die Nagra eine möglichst breite Vielfalt an Wirtgesteinen, eine optimale Abgrenzung der geologischen Standortgebiete, Flexibilität bezüglich Wirtgesteine und vergleichbare Sicherheit an. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als zielführend und sicherheitsgerichtet. Die Diversität an Wirtgesteinen bleibt mit diesem Vorgehen erhalten und ist sinnvoll, da eine vertiefte sicherheitstechnische Analyse und damit ein direkter Vergleich der Wirtgesteine und Standorte erst in Etappe 2 erfolgt. Die Möglichkeit, in einem geologischen Standortgebiet zwei verschiedene Wirtgesteine für das Lager zur Verfügung zu haben, ist als Vorteil zu werten.

Das ENSI stimmt den Vorschlägen für geologische Standortgebiete für das SMA-Lager (Südranden, Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren, Bözberg, Jura-Südfuss und Wellenberg) und für das HAA-Lager (Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg) zu.

7.8 Schlussfolgerungen

Das ENSI hat die Vorschläge der Nagra für geologische Standortgebiete detailliert geprüft. Dabei hat das ENSI:

- Eigene Berechnungen durchgeführt, um die Angaben der Nagra zur Abfallzuteilung und zu den sicherheitstechnischen Anforderungen nachzuvollziehen,
- öffentliche Seminare zu aktuellen wissenschaftlichen Fragen der Themengebiete quartäre Tiefenerosion und Neotektonik/Seismizität/Erosion durchgeführt, um die Meinung breiter Fachkreise einzuholen,
- eigene Untersuchungen zu quartärer Tiefenerosion und langfristigem Klimawandel vorgenommen bzw. in Gang gesetzt, um zusätzliche Fragen zu klären,
- externe Experten beigezogen, um spezifische Fragestellungen zuhanden des ENSI beurteilen zu lassen.

Gemäss Sachplan geologische Tiefenlager hat das ENSI bei der Überprüfung der Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit konkrete Fragen zu prüfen. Die Beurteilung ist nachfolgend aufgeführt.

Ist die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA nachvollziehbar?

Das ENSI hat die Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lagertypen SMA und HAA mit eigenen Berechnungen geprüft und kann sie nachvollziehen. Die Zuteilung ist aus Sicht des ENSI vernünftig.

Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologisch-tektonische Situation, an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und an den Standort nachvollziehbar und genügend?

Die quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologisch-tektonische Situation, an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und an den Standort hat das ENSI mittels eigener Berechnungen bestätigt und erachtet sie als nachvollziehbar und genügend.

Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke der Vororientierung?

Die Nagra hat umfangreiche Literatur zu den geologischen Grundlagen dokumentiert. Das ENSI und seine Experten haben diese Grundlagen überprüft und kommen zum Schluss, dass die Dokumentation für das Auswahlverfahren in Etappe 1 ausreichend ist.

Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?

Das ENSI kommt bei seiner Überprüfung zum Schluss, dass die Nagra alle vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien korrekt berücksichtigt und stufengerecht angewendet hat.

Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete transparent und nachvollziehbar?

Das ENSI hat sämtliche Unterlagen der Nagra geprüft. Die Nagra hat die Erarbeitung des Vorschlags geologischer Standortgebiete entsprechend den Vorgaben des Sachplans transparent und nachvollziehbar dargelegt.

Können die Behörden den Vorschlägen aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

Das ENSI stimmt den Vorschlägen der Nagra für geologische Standortgebiete für das SMA-Lager (Südranden, Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren, Bözberg, Jura-Südfuss und Wellenberg) und für das HAA-Lager (Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren und Bözberg) aus der Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zu.

8 Referenzen

- Allenbach R. (2001):* Annotated index of lithostratigraphic units currently used in the Upper Jurassic of northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 94, 265-287.
- Amann F., Löw S. (2009):* Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien, Expertenbericht ENSI 33/65, ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Zürich.
- Archer D., Ganopolski A. (2005):* A movable trigger: Fossil fuel CO₂ and the onset of the next glaciation. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6, 1-7.
- Barletta V.R., Ferrari C., Diolaiuti G., Carnielli T., Sabadaini R., Smiraglia C. (2006):* Glacier shrinkage and modeled uplift of the Alps. *Geophysical Research Letters* 33.
- BFE (2008):* Sachplan geologische Tiefenlager - Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern.
- BGR (2007):* Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands: Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin/Hannover.
- Bitterli P. (2007):* Untere Süsswassermolasse (USM): Geologische Grundlagen und Untersuchungsergebnisse, Expertenbericht, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen.
- Bläsi H.-R. (1987):* Lithostratigraphie und Korrelation der Doggersedimente in den Bohrungen Weiach, Riniken, und Schafisheim. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 80, 415-430.
- Bolliger T., Fejjar O., Graf H., Kälin D. (1996):* Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugern aus den höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 89, 1043-1048.
- Bossart P., Thury M. (2008):* Mont Terri Rock Laboratory Project, Programme 1996 to 2009 and Results. Rep. Swiss Geol. Survey 3.
- Champagnac J.D., Molnar P., Anderson R.S., Sue C., Delacou B. (2007):* Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology* 35, 195-198.
- De Ruig M.J., Hubbard S.M. (2006):* Seismic facies and reservoir characteristics of a deep-marine channel belt in the Molasse foreland basin, Puchkirchen Formation, Austria. *AAPG Bulletin* 90, 735-752.
- Dr. von Moos AG (2005):* Entsorgungsnachweis Quartär-Aquifere Zürcher Weinland – Beurteilung der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse, Expertenbericht zuhanden der HSK, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- Dr. von Moos AG (2009a):* Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Beurteilung der glazialen Tiefenerosion im Rahmen der Festlegung der geologischen Standortgebiete, Expertenbericht ENSI 33/63, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- Dr. von Moos AG (2009b):* Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Überprüfung des GIS-Verfahrens der Nagra und der verwendeten Datensätze im Standortauswahlverfahren SGT Etappe 1, Expertenbericht ENSI 33/64, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- Emch+Berger AG (2005):* Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierten Prozesse, Expertenbericht HSK 35/97, Emch+Berger AG, Bern.

- Emch+Berger AG (2009)*: Gutachten zur Beurteilung der Auswirkungen der Gasentwicklung im Tiefenlager, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, Expertenbericht ENSI 33/66, Emch+Berger AG, Bern.
- Emch+Berger AG (2010)*: Beurteilung der Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit und deren Umsetzung im Standortauswahlverfahren SGT Etappe 1, Expertenbericht ENSI 33/68, Emch+Berger AG, Bern.
- ENSI-G03*: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Richtlinie, Schweiz, 2009.
- ENSI 33/43*: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Beurteilung der für das Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und der von der Nagra festgelegten Mindestanforderungen und Bewertungsskalen, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/54*: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Überprüfung des Abfallinventars, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/55*: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Überprüfung der Abfallzuteilung und der Rechenfälle für die Radionuklidenausbreitung, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/56*: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Gasproduktion, Gastransport und deren Folgen für das SMA-Lager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- Fidelibus C., Löw S. (2007)*: Groundwater flux through radioactive waste repository in the USM West, Report ETH Report 3465/54, ETH Zurich, Engineering Geology, Zurich.
- Fraefel M. (2008)*: Geomorphic response to neotectonic activity in the Jura Mountains and the southern Upper Rhine Graben Dissertation, Basel.
- Frey M., Desmons J., Neubauer F. (1999)*: Metamorphic map of the Alps. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 79, 1-230.
- Glasser F.P., Matschei T. (2007)*: Interactions between cement and carbon dioxide, Proceedings of the ICCO Conference.
- Graf H.R. (im Druck)*: Stratigraphie von Mittel- und Oberpleistozän in der Nordschweiz, Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz 168, Landesgeologie BWG.
- Greber E., Leu W., Schegg R. (2004)*: Hydrocarbon Habitat and Potential of Switzerland – An evaluation of the oil and gas potential of Switzerland based on public well data, seismic lines and basin modelling results, Unpublished Internal Report Geoform Ltd., Minusio.
- Grim R.E. (1968)*: Clay Mineralogy. London, UK, McGraw-Hill Book Company, 596 p.
- Grolimund D., Elimelech M., Borkovec M. (2000)*: Aggregation and deposition kinetics of mobile colloidal particles in natural porous media, 74th Colloid and Surface Science Conference.
- Gygi R.A. (2000)*: Annotated index of lithostratigraphic units currently used in the Upper Jurassic of northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helveticae* 93, 125-146.
- Gygi R.A. (2003)*: Perisphinctacean ammonites of the Late Jurassic in northern Switzerland: a versatile tool to investigate the sedimentary geology of an epicontinental sea. *Schweizerische Paläontologische Abhandlungen* 123.
- Haeblerli W. (2004)*: Eishaus + 1'000'000a: Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland, während der kommenden Million Jahre, Expertenbericht HSK 35/93, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen.

- Hölker A. (2006): Lower Freshwater Molasse Stochastic Modelling of Hydraulic Conductivity, Report Proseis AG, Zurich, Switzerland.
- HSK 23/73: Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der Nagra, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2004.
- HSK 30/9: Gutachten zum Gesuch um Rahmenbewilligung für ein SMA-Endlager am Wellenberg, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 1996.
- HSK 30/26: Sorption im pH-alterierten Gestein, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2003.
- HSK 33/001: Sachplan geologische Tiefenlager: Herleitung, Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 2007.
- HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2005.
- HSK 35/108: Stellungnahme der HSK zum Optionenbericht NTB 05-02 der Nagra, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2007.
- Kahle H.-G., Geiger A., Bürki B., Gubler E., Marti U., Wirth B., Rothacher M., Gurtner W., Beutler G., Bauersima I., Pfiffner O.A. (1997): Recent crustal movements, geoid and density distribution; contribution from integrated satellite and terrestrial measurements, in Pfiffner O.A. et al., ed., Results of NRP 20; deep structure of the Swiss Alps: Basel, Birkhäuser, p. 251-259.
- KEG: Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, Schweiz, SR 732.1.
- KEV: Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004, Schweiz, SR 732.11.
- Kock S. (2008): Pleistocene terraces in the Hochrhein area – formation, age constraints and neotectonic implications. Basel, 99 p.
- Kübler B., Pittion J.-L., Heroux Y., Charollais J., Weidmann M. (1979): Sur le pouvoir réflecteur de la vitrinite dans quelques roches du Jura, de la Molasse et des nappes préalpines, helvétiques et penniques (Suisse occidentale et Haute-Savoie). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 72, 347-371.
- Kuhlemann J., Dunkl I., Brügel A., Spiegel C., Frisch W. (2006): From source terrains of the Eastern Alps to the Molasse basin: detrital record of non-steady-state exhumation. *Tectonophysics* 413, 301-316.
- Kuhlemann J., Frisch W., Székely B., Dunkl I., Kázmér M. (2002): Post-collisional sediment budget history of the Alps: Tectonic versus climatic control. *International Journal of Earth Sciences* 91, 818-837.
- Kuhn O., Etter W. (1994): Die Posidonienschiefer der Nordschweiz: Lithostratigraphie, Biostratigraphie, Fazies. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 87, 113-138.
- Lusser C. (1980): Sedimentologie und Palaeogeographie des unteren Doggers im zentralen und nördlichen Jura, unpubl. Dissertation der Universität Basel.
- Maurer H.R., Burkhard M., Deichmann N., Green A.G. (1997): Active Tectonism in the central Alps: contrasting stress regimes north and south of the Rhone Valley. *Terra Nova* 9, 91-94.
- Milnes A.G. (2004): Review Comments on Nagra Technical Report NTB 99-08 "Geologische Entwicklung und Langzeitszenarien Zürcher Weinland", Expertenbericht HSK 35/96, Würenlingen.

- Müller E.R. (1996): Die Ittinger Schotter und ihr morphogenetisches Umfeld. Eclogae Geologicae Helvetiae 89, 1077-1092.*
- Mullis J., Rahn M.K., Schwer P., De Capitani C., Stern W.B., Frey M. (2002): Correlation of fluid inclusion temperatures with illite "crystallinity" data and clay mineral chemistry in sedimentary rocks from the external part of the Central Alps. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 82, 325-340.*
- Nagra (1994): Der Dogger -Sandstein der Bohrung, Herdern-1, Teil 1: Lithofazies, Ablagerungsverhältnisse, Stratigraphie, Teil 2: Sedimentpetrographie des Dogger β -Sandsteines der Bohrung Herdern-1, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.*
- Nagra (1999): Sondierbohrung Benken: Bohrstellengeologie – Stratigraphie, Strukturgeologie, Laboranalysen Teil 1, Geologie-Log 1:100, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.*
- Nagra (2009a): Erläuterungen zur GIS-gestützten Einengungsprozedur, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.*
- Nagra (2009b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager: Interne Arbeitsnotizen zu den Grundlagen und zur Umsetzung des Indikators 'Platzangebot untertags' (Bericht zu Behördenanfrage), Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.*
- NAB 07-04: Explorierbarkeit der USM mit 3D-Seismik – Modellierung von Fazies, Petrophysik und Seismik, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-12: Digitales Höhenmodell Basis Quartär, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-13: Neotektonische Untersuchungen in der Nordschweiz und Süddeutschland. Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien CH/D, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-27: Auswertung von wiederholten Präzisionsnivellements im südlichen Schwarzwald, Bodenseeraum sowie in angrenzenden schweizerischen Landesteilen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-28: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss – Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttigen 1, Küttigen 2 und Oftringen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-35: Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.*
- NAB 07-43: Modellhaftes Inventar radioaktiver Materialien (MIRAM) Auswertung 2007, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.*
- NAB 08-03: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.*

- NAB 08-05*: VPAC – A numerical model for groundwater flow and radionuclide transport, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-12*: EWS-Bohrungen Küttigen – Synthese der geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-13*: Tiefe Erdsondenbohrung NOK Unterwerk Oftringen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-15*: Borehole Oftringen – Hydraulic Packer Testing, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-25*: EWS Bohrung Oftringen – Felsmechanische Tests, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-42*: Geologisches Modell der Nordschweiz mit digitalen Höhen- und Mächtigkeitenmodellen sowie geologischen Profilschnitten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-50*: Sorption Data Bases for Generic Swiss Argillaceous, Crystalline and Calcareous Rock Systems, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-51*: Geochemische Nahfeld-Daten für die sicherheitstechnischen Betrachtungen zum Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 09-07*: Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3 – Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NAB 09-29*: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NTB 00-03*: 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.
- NTB 01-01*: Model Radioactive Waste Inventory for Reprocessing Waste and Spent Fuel, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 01-02*: Experimental studies on the inventory of cement-derived colloids in the pore water of a cementitious backfill material, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.
- NTB 01-03*: Contaminant transport in fracture networks with heterogeneous rock matrices: The PICNIC code, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2001.
- NTB 01-04*: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel; vitrified High-Level Waste, and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-03*: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente; verglaste hochaktive sowie langle-

- biges mittelaktive Abfälle, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-05*: Project Opalinus Clay: Safety Report Demonstration of Disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-06*: Project Opalinus Clay: Models; Codes and Data for Safety Assessment – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2003.
- NTB 02-10*: Project Opalinus Clay: Radionuclide concentration limits in the near-field of a repository for spent fuel and vitrified high-level waste, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-14*: Stability and Mobility of Colloids in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-18*: Near-Field Sorption Data Bases for Compacted MX-80 Bentonite for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in Opalinus Clay Host Rock, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2003.
- NTB 02-19*: Far-Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of High-Level Radioactive Waste Repository in an Undisturbed Opalinus Clay Host Rock, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2003.
- NTB 02-20*: Cementitious Near-Field Sorption Data Base for Performance Assessment of an ILW Repository in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NTB 02-22*: Project Opalinus Clay: Radionuclide Concentration Limits in the Cementitious Near-Field of an ILW Repository, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2003.
- NTB 03-12*: Sorption Data Bases for Opalinus Clay Influenced by a High pH Plume, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2004.
- NTB 08-01*: Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-02*: Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-03*: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-04*: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Geologische Grundlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-05*: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie;

- Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-06*: Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien MIRAM 08, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-07*: Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 84-16*: Fluviale Erosions- und Akkumulationsformen als Indizien jungpleistozäner und holozäner Bewegungen in der Nordschweiz und angrenzenden Gebieten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1984.
- NTB 88-09*: Sondierbohrung Riniken – Untersuchungsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1990.
- NTB 90-41*: Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1990.
- NTB 93-01*: Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland – Synthesis of regional investigations 1981 – 1993 within the Nagra radioactive waste disposal programme, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1994.
- NTB 93-12*: Geology of the crystalline basement of Northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1998.
- NTB 93-22*: Kristallin-I – Safety assessment report, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1994.
- NTB 93-26*: Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen; NW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1993.
- NTB 94-06*: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen; NW), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1994.
- NTB 96-01*: Geosynthese Wellenberg 1996: Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1997.
- NTB 96-05*: Far-field sorption data bases for performance assessment of a L/ILW repository in an undisturbed Palfris marl host rock, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1997.
- NTB 96-06*: Far-field sorption data bases for performance assessment of a L/ILW repository in disturbed/alterred Palfris marl host rock, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1997.

- NTB 99-08*: Geologische Entwicklung der Nordschweiz; Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- Neall F.B. (1996)*: Modelling the long-term chemical evolution of the near-field of a cementitious repository using SEQDISSOLVE - model, assumptions and results, PSI Technical Note TM 44-95-08, Paul Scherrer Institut, Villigen.
- Oberhänsli R. (2004)*: Metamorphic Structure of the Alps – Map 1:1'000'000 and Explanatory Notes Commission of the Geological Maps of the World und Mitteilungen der Oesterreichischen Mineralogischen Gesellschaft, Paris.
- Persaud M., Pfiffner O.A. (2004)*: Active deformation in the eastern Swiss Alps: post-glacial faults, seismicity and surface uplift. *Tectonophysics* 385, 59-84.
- Preusser F., Drescher-Schneider R., Fiebig M., Schlüchter C. (2005)*: Re-interpretation of the Meikirch pollen record, Swiss Alpine Foreland, and implications for Middle Pleistocene chronostratigraphy. *Journal of Quaternary Science* 20, 607-620.
- Ritter J.R.R. (2005)*: Small-scale mantle plumes: Imaging and geodynamic aspects, in Wenzel F., ed., *Perspectives in Modern Seismology, Lecture Notes in Earth Sciences Volume 105*, Springer, p. 69-94.
- Rowe R.K., Quigley R.M., Booker J.R. (1995)*: *Clayed Barrier Systems for Waste Disposal Facilities*. London, UK, E & FN Spon, An Imprint of Chapman & Hall, 390 p.
- RPG*: Bundesgesetz über die Raumplanung vom 22. Juni 1979, Schweiz, SR 700.
- Schreiner A. (1992)*: Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee. Freiburg i.Br., Deutschland, Geologische Karte 1 : 50'000 von Baden-Württemberg, 290 p.
- SED (2004)*: The new Swiss Hazard Map (475 years/5 Hz), Karte Schweizerischer Erdbebendienst, Zürich.
- Sparks D.L. (1995)*: *Environmental Soil Chemistry*. London, UK, Academic Press Limited, 267 p.
- Suva (2002)*: Grundlagen zur Charakterisierung der Erdgasgefährdung bei Untertagentertagbauten. *Bulletin für angewandte Geologie* 7, 45-65.
- swisstopo (2010)*: Beurteilung der Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine sowie der Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten im Sachplan geologische Tiefenlager, Expertenbericht ENSI 33/67, Bundesamt für Landestopographie swisstopo, Wabern.
- Ustaszewski K., Schmid S.M. (2007)*: Neotectonic activity in the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction (North-Western Switzerland and adjacent France). *Bulletin für Angewandte Geologie* 12, 3-19.
- Ustaszewski M., Pfiffner O.A. (2008)*: Neotectonic faulting, uplift and seismicity in the central and western Swiss Alps, in Siegesmund S., Fügenschuh B., and Froitzheim N., eds., *Tectonic Aspects of the Alpine-Dinaride-Carpathian System, Volume 298*, Geological Society of London p. 231-249.
- Vernon A.J., Van der Beek P.A., Sinclair H.D., Rahn M.K. (2008)*: Increase in late Neogene denudation of the European Alps confirmed by analysis of a fission-track thermochronology database. *Earth and Planetary Science Letters* 270.
- Wagner J.J., Frischknecht C., Rosset P., Sartori M., Schindler C., Beer C., Mayer-Rosa D., Rüttener E., Smit P. (2000)*: Contribution au zonage sismique dans le vallée du Rhône, entre Sion et Brigue. *Landeshydrologie und -geologie, Geologische Berichte* 25, 123.
- Weidmann M. (1993)*: Notice explicative, Geologischer Atlas der Schweiz, 1:25'000, Blatt 1244 Châtel-St-Denis, Landeshydrologie und -geologie.

9 Glossar und Abkürzungsverzeichnis

ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Organisation, die in Frankreich für die Entsorgung und vor allem Endlagerung der dort anfallenden radioaktiven Abfälle zuständig ist
ATA	Alphatoxische Abfälle: Radioaktive Abfälle mit einem hohen Gehalt an Alphastrahlern (> 20'000 Becquerel pro Gramm konditionierter Abfall, Art. 51 KEV)
AZ	Alternative Abfallzuteilung, definiert in NTB 08-05, Tab. 3.3-7
BE	Brennelement, abgebrannte Brennelemente, die nicht weiter verwendet werden und gemäss Konzept der Nagra in ein HAA-Lager verbracht werden
Barrieren	Barrieren bilden das passive Sicherheitssystem eines Lagers zum Schutz von Mensch und Umwelt. Es sind technische und natürliche (geologische) Einschluss- und Rückhaltesysteme, welche die radioaktiven Abfälle nach dem Multibarrieren-Konzept von der Biosphäre isolieren.
BFE	Bundesamt für Energie, verfahrensleitende Behörde im Sachplan geologische Tiefenlager (www.bfe.admin.ch)
CERN	C onseil E uropéen pour la R echerche N ucléaire: Internationale Organisation für Kernforschung bei Genf auf dem Gebiet von Schweiz und Frankreich, mit diversen grösseren Beschleunigeranlagen, aus deren Betrieb sich radioaktive Abfälle ergeben
CSH	Calcium-Silikat-Hydrate sind Minerale, die sich bei der Zementaushärtung bilden und die durch Sorption Radionuklide zurückhalten können.
Dosis	Mass für die Beurteilung des gesundheitlichen Risikos durch ionisierende Strahlung. In diesem Gutachten ist die effektive Dosis gemeint: Summe der mit den Wichtungsfaktoren w_T gewichteten Äquivalentdosen in allen Organen und Geweben. Die Einheit der Dosis ist das Sievert (Sv).
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure: organische Verbindung, die durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden erhöhen kann
EDZ	Excavation damaged zone, Zone um die aufgefahrenen Untertagebauten, in denen das Gestein in das Tunnelbauwerk hinein deformiert und damit eine erhöhte Anzahl von Entlastungsklüften aufweist. Unterschiedliche Gesteine haben aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften unterschiedlich stark ausgeprägte Auflockerungszonen.
EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ist ein Teil der geologischen Barriere, der bei normaler Entwicklung des geologischen Tiefenlagers für den betrachteten Isolationszeitraum, im Zusammenwirken mit technischen und geologischen Barrieren, den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

EGTS	Engineered Gas Transport System, ein von der Nagra vorgeschlagenes System von geeigneten Verfüllmaterialien zur Verhinderung von zu hohen Gasdrücken in einem geologischen Tiefenlager
ENSI-G03	Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen zu den «Spezifischen Auslegungsgrundsätzen für ein geologisches Tiefenlager und Anforderungen an die Sicherheitsanalyse»
Entsorgungsnachweis	Der Entsorgungsnachweis ist der Nachweis über die grundsätzliche Machbarkeit der Entsorgung radioaktiver Abfälle in einer bestimmten geologischen Schicht. Der Entsorgungsnachweis soll aufzeigen, dass in der Schweiz ein genügend grosser Gesteinskörper mit den erforderlichen Eigenschaften existiert. Der Entsorgungsnachweis ist sowohl für SMA (1988) als auch HAA (2006) erbracht worden.
ESchT	Deutsche « Expertengruppe-Schweizer-Tiefenlager », die ESchT wurde vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) einberufen. Die Expertengruppe soll Fragen des BMU und der deutschen Begleitkommission Schweiz (BeKo-Schweiz) zum Sachplan «geologische Tiefenlager» der Schweiz beantworten sowie das Standortauswahlverfahren fachlich begleiten (www.escht.de).
Fernfeld	Das Fernfeld umfasst das Wirtgestein und die dazugehörigen Rahmgesteine.
FORGE	Fate of repository gases : FORGE ist ein 2009 gestartetes Forschungsprojekt der EU, mit dem Ziel, die sicherheitstechnische Bedeutung der durch Gase verursachten Prozesse im Nah- und Fernfeld eines Tiefenlagers, beispielsweise den Druckaufbau im Tiefenlager oder den Transport von Gasen und Radionukliden aus dem Tiefenlager ins Wirtgestein zu untersuchen.
Geologisches Standortgebiet	Das geologische Standortgebiet wird durch die für die Lagerung der radioaktiven Abfälle geeigneten geologischen Gesteinskörper im Untergrund definiert.
Geologisches Tiefenlager	Anlage im geologischen Untergrund, die verschlossen werden kann, sofern der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt durch passive Barrieren sichergestellt wird (Art. 3 KEG).
HAA	Hochaktive Abfälle sind nach Art. 51 KEV abgebrannte Brennelemente und verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung. Diese Abfälle produzieren durch radioaktive Zerfälle Wärme.
IAEA	I nternational A tomic E nergie A gency, Wien
IRF	«Instant release fraction», Anteil an Radionukliden, der bei einem Versagen der Einlagerungsbehälter im HAA-Lager unmittelbar freigesetzt wird
ISA	Isosaccharinsäure: organische Verbindung, die durch Komplexbildung die Mobilität von Radionukliden erhöhen kann
ISRAM	Informationssystem für Radioaktive Materialien, Datenbank der Entsorgungspflichtigen für die existierenden radioaktiven Abfälle in der Schweiz

K_d	Sorptionskoeffizient, je höher der K_d -Wert, desto stärker bleibt ein Element an der Gesteinsoberfläche haften, d.h. desto weniger mobil ist es.
KEG	Kernenergiegesetz vom 21. März 2003, in Kraft seit 1. Februar 2005, das Gesetz regelt die friedliche Nutzung der Kernenergie und bestimmt das Vorgehen bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle.
KEV	Kernenergieverordnung vom 10. November 2004, in Kraft seit 1. Februar 2005
KKW	Kernkraftwerk
KNE	Kommission Nukleare Entsorgung, die KNE berät das ENSI in erdwissenschaftlichen Fragen und verfasst zuhanden des ENSI Stellungnahmen zur geologischen Beurteilung der Standortgebiete und zur bautechnischen Machbarkeit der geologischen Tiefenlager (www.kne-schweiz.ch).
KNS	Eidgenössische Kommission für nukleare Sicherheit, die KNS verfasst Stellungnahmen zu den Gutachten des ENSI (www.kns.admin.ch).
LIDAR	L ight D etection and R anging, ein Verfahren zur optischen Distanzmessung aus einem Flugzeug mit GPS-bestimmter exakter Flugroute zur Berechnung der Geländekonturen
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle, als LMA werden diejenigen ATA und SMA bezeichnet, die in einem separaten Teil des HAA-Lagers eingelagert werden.
MA	Mindestanforderungen, diese werden von der Nagra für die Schritte 3 bis 5 (Etappe 1) definiert und angewendet.
MIRAM	Modellhaftes Inventar für radioaktive Materialien, zusammenfassende Datenbank zu den bereits vorhandenen und noch zu erwartenden radioaktiven Abfällen in der Schweiz
mSv	Millisievert: Sievert ist die Masseinheit für die biologischen Schäden bei der Absorption ionisierender Strahlung (in lebenden Zellen) und wird meistens in tausendstel Sievert (mSv) angegeben.
NAB	Nagra Arbeitsbericht
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Im Hinblick auf die dauernde und sichere Entsorgung von radioaktiven Abfällen haben die Betreiber der fünf schweizerischen Kernkraftwerke und die Schweizerische Eidgenossenschaft 1972 die Nagra gegründet. Die Nagra schlägt gemäss den Vorgaben des Konzeptteils geologische Standortgebiete und Standorte vor und reicht das Rahmenbewilligungsgesuch ein.
Nahfeld	Das Nahfeld in einem geologischen Tiefenlager umfasst die Abfallgebände und weitere technische Barrieren.
NEA	Nuclear Energy Agency der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development)
NTB	Nagra Technischer Bericht

PSI	Paul Scherrer Institut, das PSI ist ein Forschungszentrum für Natur- und Ingenieurwissenschaften. Das PSI sammelt die schweizerischen radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung und betreibt das Bundeszwischenlager.
RTI	Radiotoxizitätsindex, Mass für die Auswirkung der radiologischen Strahlung auf den Menschen
RZ	Referenzzuteilung der Abfälle, definiert in NTB 08-05, Tab. 3.3-6
Sedimente	Sedimente sind so genannte «Sekundärgesteine». Sie entstehen aus Verwitterungsmaterialien, welche durch Wind, Wasser oder Eis transportiert und abgelagert wurden oder durch chemische Ausfällung (Evaporite).
SGT	Der Sachplan geologische Tiefenlager umfasst sowohl den 2008 von BFE verabschiedeten Konzeptteil als auch das Verfahren selbst.
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle: Diese Abfälle enthalten vorwiegend kurzlebige radioaktive Stoffe mit kleinerer Halbwertszeit. Sie stammen vom Betrieb und späterem Abbruch der Kernkraftwerke und aus Medizin, Industrie und Forschung (gesetzlich definiert in Art. 51. KEV).
Sorptionskoeffizient	Der Sorptionskoeffizient (auch Verteilungskoeffizient, K_d , genannt) beschreibt, wie stark Radionuklide an der Festkörperoberfläche einer technischen Barriere bzw. des Wirtgesteins haften bleiben.
TOUGH 2	Rechencode der Berkeley-Universität für die Modellierung mehrphasiger Flüssigkeits- und Wärmeflüsse in porösen und geklüfteten Medien, eingesetzt zur Modellierung der Gasausbreitung
OSM	Obere Süsswassermolasse ist eine geologische Formation des nordalpinen Vorlandbeckens, deren Sedimente 16 bis < 5 Million Jahre alt sind.
USM	Untere Süsswassermolasse ist eine geologische Formation des nordalpinen Vorlandbeckens, deren Sedimente 28.5 bis 20.5 Million Jahre alt sind.
VA	Verschärfte Anforderungen, diese werden von der Nagra für die Schritte 3 bis 5 (Etappe 1) definiert und angewendet.
WG	Das Wirtgestein ist die Gesteinsformation, welche das Lager mit seinen Abfällen aufnimmt. Als Wirtgestein wird derjenige Bereich der Geosphäre bezeichnet, der für den Schutz der technischen Barrieren, für die Begrenzung des Wasserzuflusses zum Lager und für die Rückhaltung der Radionuklide massgebend ist.

ENSI 33/070

Herausgeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), CH-5200 Brugg
Telefon +41(0)56 460 84 00, Telefax +41(0)56 460 84 99

Zu beziehen bei: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Informationsdienst, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg
oder per E-Mail Infodienst@ensi.ch
Abrufbar unter www.ensi.ch