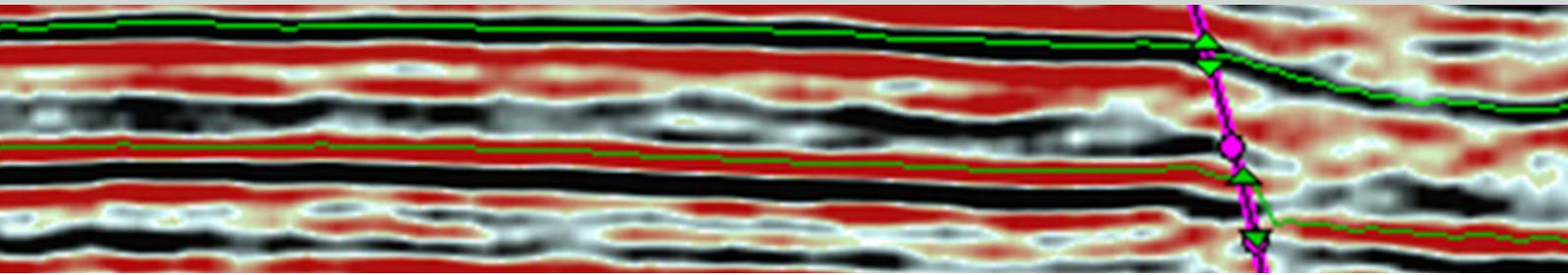




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

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



## **Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT»**

### **Sachplan geologische Tiefenlager**





ENSI 33/115

# **Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT»**

---

## Sachplan geologische Tiefenlager

März 2011

**Impressum**

Stellungnahme zu NTB 10-01 «Beurteilung der geologischen Unterlagen  
für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT»

**Herausgeber**

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

**Zu beziehen bei**

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

**Abrufbar unter**

[www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehen bei der Beurteilung der für die provisorischen Sicherheitsanalysen notwendigen Unterlagen</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Festlegung der relevanten Prozesse und Parameter</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der Wirtgesteine</b>	<b>18</b>
4.1	Opalinuston	20
4.2	'Brauner Dogger'	21
4.3	Effinger Schichten	24
4.4	Mergel-Formationen des Helvetikums	26
4.5	Porositäten der Wirtgesteine	27
4.6	Hydraulische Durchlässigkeiten der Wirtgesteine	28
4.7	Einfluss der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit	33
4.8	Verhalten der Wirtgesteine bezüglich Gas	34
<b>5</b>	<b>Geologisch-tektonische Verhältnisse der Standortgebiete</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Langzeitentwicklung</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Hydrogeologie</b>	<b>55</b>
7.1	Prozesse und Parameter	55
7.2	Hydrogeologische Verhältnisse der Standortgebiete	60
<b>8</b>	<b>Bautechnische Machbarkeit</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>Geochemische Bedingungen</b>	<b>81</b>
9.1	Mineralogie der Wirt- und Rahmengesteine	81
9.2	Porenwässer der Wirt- und Rahmengesteine	83
9.3	Sorptionskoeffizienten im Wirt- und Rahmengestein	86
9.4	Diffusionskoeffizienten im Wirt- und Rahmengestein	88
9.5	Löslichkeitslimiten im Nahfeld	93
9.6	Sorptionskoeffizienten im Nahfeld	95
<b>10</b>	<b>Biosphäre</b>	<b>98</b>
10.1	Relevante Exfiltrationspfade	99
10.2	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf die Biosphärenmodellierung	101
10.3	Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung	105

<b>11</b>	<b>Testrechnungen für die Radionuklidausbreitung</b>	<b>108</b>
11.1	Rechenfälle für die Testrechnungen	108
11.2	Modellkonzepte für das Nahfeld	111
11.3	Modellkonzepte für die Wirt- und Rahmengesteine	113
11.4	Konzeptualisierung der Wirt- und Rahmengesteine in den jeweiligen Standortgebieten	115
11.5	Resultate der Testrechnungen	118
<b>12</b>	<b>Zusammenfassende Beurteilung und Schlussfolgerungen</b>	<b>124</b>
<b>13</b>	<b>Referenzen</b>	<b>138</b>
<b>14</b>	<b>Glossar und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>147</b>

## **Anhang**

<b>Zuordnung der Prozesse und Parameter zu den sicherheitstechnischen Kriterien gemäss Konzeptteil Sachplan</b>	<b>151</b>
---	------------

# 1 Einleitung

## **Auftrag an die Entsorgungspflichtigen**

Im Hinblick auf die Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) schreibt der Konzeptteil (BFE 2008) vor, dass die Entsorgungspflichtigen die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen frühzeitig mit dem ENSI abklären müssen. Die Kenntnisse über die Standorte müssen die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich erlauben; gegebenenfalls sind sie durch Untersuchungen zu ergänzen. Die Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich sind im Konzeptteil SGT und in ENSI 33/075 festgelegt.

Die verwendeten geologischen Daten müssen die aktuelle Situation am Standort für die provisorische Sicherheitsanalyse adäquat wiedergeben und die vorhandenen relevanten Ungewissheiten berücksichtigen (BFE 2008, S. 45). Adäquat bedeutet, dass der von den Entsorgungspflichtigen dokumentierte Kenntnisstand ausreicht, um zu zeigen, dass die Aussagen zur Langzeitsicherheit des Tiefenlagers und dem sicherheitstechnischen Vergleich belastbar sind. Eine belastbare Aussage ist auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilitäten und Ungewissheiten in Daten und Prozessen gültig (ENSI 33/075).

Um die Frage zusätzlicher Untersuchungen transparent zu klären, hat die Nagra nach Abschluss der behördlichen sicherheitstechnischen Überprüfungen in Etappe 1 SGT den Bericht NTB 10-01 erstellt, in dem sie für jedes Standortgebiet darlegt und diskutiert, ob der aktuelle Wissensstand für die Durchführung der erforderlichen provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs in Etappe 2 SGT ausreichend ist. In diesem Bericht ist gemäss ENSI 33/075 zu zeigen, welche Prozesse und Parameter für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT Relevanz haben und was der jeweilige Kenntnisstand der Prozesse und Parameter ist. Im Bericht sollen die unterschiedlichen Annahmen, die wegen des unterschiedlichen Kenntnisstands angewendet werden müssen, ausgewiesen und beim Entscheid über die Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen berücksichtigt werden. Sollte der Wissensstand den Anforderungen nicht genügen, schlagen die Entsorgungspflichtigen die erforderlichen ergänzenden Untersuchungen vor.

## **Schlüsselaussagen der provisorischen Sicherheitsanalyse**

Die provisorische Sicherheitsanalyse hat Aussagen zu folgenden Aspekten zu enthalten (ENSI 33/075):

- **Barrierenwirkung und deren Langzeitentwicklung:** Die Entsorgungspflichtigen haben die Barrierenwirkung des Mehrfachbarrierensystems insgesamt und die jeweiligen Beiträge der technischen und natürlichen Barrieren (beispielsweise das Aufzeigen der Rückhalteeigenschaften der Einzelbarriere Wirtgestein für Radionuklide) zu bestimmen. Das Langzeitverhalten der Barrieren ist aufzuzeigen. Die Entsorgungspflichtigen haben die sicherheitstechnische Bedeutung lagerbedingter Einflüsse zu bewerten, insbesondere die Wechselwirkungen zwischen den Barrieren und lagerinduzierten Prozessen (beispielsweise Temperaturentwicklung, Gasbildung bzw. Gasdruckaufbau, Hoch-pH-Fahne).

- Erfüllung des Schutzkriteriums nach der Richtlinie ENSI-G03: Die Entsorgungspflichtigen führen eine numerische Analyse der erwarteten Entwicklung des Tiefenlagers durch und zeigen, ob das Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr eingehalten wird. Dazu definieren sie ein Referenzszenarium und einen dazugehörigen Referenzfall. Der Referenzfall soll der realistischerweise anzunehmenden Entwicklung entsprechen. Mit zusätzlichen Rechenfällen werden alternative Entwicklungsmöglichkeiten evaluiert. Die verwendeten Daten müssen die Situation am Standort für die provisorische Sicherheitsanalyse adäquat wiedergeben.
- Vergleich von Standorten: Die provisorische Sicherheitsanalyse enthält alle Berechnungen, die gemäss den Vorgaben SGT, Anhang III und des ENSI für den Vergleich der Standorte mittels der standardisierten Vergleichsmethode benötigt werden. Darunter fällt das Aufzeigen des jeweiligen charakteristischen Dosisintervalls. Die Vorgaben des ENSI für die notwendigen Berechnungen zur Durchführung der standardisierten Vergleichsmethode werden in ENSI 33/075, Kapitel 5, näher erläutert.
- Hinweise auf allfällige Feldarbeiten: Die Bewertung eines Standorts in der provisorischen Sicherheitsanalyse und die qualitative Bewertung der Kriterien gemäss Tabelle 1-1 für den sicherheitstechnischen Vergleich geben auch Hinweise auf allfällige Feldarbeiten für die Etappe 3 SGT.

Tabelle 1-1: Kriterien zur Standortevaluation zu Sicherheit und technischer Machbarkeit (BFE 2008, S. 40).

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

Die Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalyse enthält ausserdem Angaben bezüglich:

- Lage, Geometrie und Eigenschaften des Wirtgesteins: Dies beinhaltet belastbare Aussagen zur Tiefenlage des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,

zur Mächtigkeit dieser Gesteinsschichten und zu regionalen Strukturen sowie zu den Eigenschaften und Annahmen zu den Zustandsparametern des Wirtgesteins.

- Einfluss der bautechnischen Auslegung auf die Sicherheit: Die provisorischen Sicherheitsanalysen sollen auch explizit definierte bautechnische Annahmen berücksichtigen, da diese direkt mit der Langzeitsicherheit verknüpft sind. Ungenügende Stützmittel gefährden die Betriebssicherheit und führen zu einer Schwächung der geologischen Barriere. Die Entsorgungspflichtigen definieren bzgl. bautechnischer Machbarkeit Ausschluss- und Eignungskriterien für die Anordnung von Zugangsbauwerken und Lagerbereichen. Die bautechnische Machbarkeit ist unter Berücksichtigung der lokalen Gebirgseigenschaften (Trennflächen, Spannungen), den Anforderungen an das Mehrfachbarrierensystem sowie an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich der maximalen Tiefenlage (Bautechnik) aufzuzeigen.
- Biosphäre: Die Entsorgungspflichtigen legen die regionale hydrogeologische Situation dar, zeigen das Spektrum typischer Exfiltrationssituationen auf und beschreiben die konzeptuellen Modelle der Radionuklidausbreitung in der Biosphäre (Geomorphologie, Klima), inklusive ihrer Parametrisierung.

Die Dokumentation der provisorischen Sicherheitsanalysen muss folgende weitere Aspekte berücksichtigen:

- Nachvollziehbarkeit: Die Entsorgungspflichtigen haben für provisorische Sicherheitsanalysen die Quellen der verwendeten Eingabewerte transparent zu belegen. Sie haben zu zeigen, ob die Werte aus Bohrungen, Laborexperimenten, Plausibilitätsüberlegungen oder Analogieschlüssen abgeleitet wurden und ob sie auf das betrachtete Tiefenlager übertragbar sind. Abschätzungen von Zustandsparametern (beispielsweise Drücke oder Gradienten) sind zu erläutern. Die in der provisorischen Sicherheitsanalyse verwendeten Modelle (einschliesslich Eingabewerte, Rand- und Anfangsbedingungen) und die erhaltenen Resultate sind zu dokumentieren.
- Ungewissheiten: Die Entsorgungspflichtigen analysieren die Robustheit des Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds durch die Bestimmung des Einflusses von Ungewissheiten und Variabilitäten auf die daraus resultierenden radiologischen Konsequenzen. Die daraus gezogenen Schlüsse für die Langzeitsicherheit sind darzulegen (beispielsweise das Aufzeigen der Rückhalteigenschaften der Einzelbarriere Wirtgestein für Radionuklide). Die Entsorgungspflichtigen erstellen Berechnungen zum Systemverhalten unter anderen Voraussetzungen innerhalb des Referenzszenariums und analysieren die Sensitivität für ein abweichendes Systemverhalten (technische Barrieren, Geosphäre). Wo Ungewissheiten bestehen, sind in der provisorischen Sicherheitsanalyse die maximalen radiologischen Konsequenzen durch die Berechnung umhüllender Varianten oder durch konservative Annahmen abzuschätzen.
- Verlässlichkeit der Aussagen: Die Entsorgungspflichtigen machen qualitative Aussagen zur Verlässlichkeit der Explorierbarkeit und zur zeitlichen Entwicklung des geologischen Tiefenlagers und seines geologischen Umfelds. Sie machen eine qualitative Bewertung der Kriterien zu Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Tabelle 1-1.

## **Erforderliche Analysen und Daten für die provisorischen Sicherheitsanalysen**

### *Charakterisierung der Wirt- und Rahmengesteine*

Die Entsorgungspflichtigen haben die in der provisorischen Sicherheitsanalyse verwendeten Informationen und Daten durch Kenntnisse aus dem geologischen Standortgebiet zu belegen. Ist dies nicht vollständig möglich, haben sie aufzuzeigen, dass die Übertragung von Informationen aus einem gleichen oder sicherheitstechnisch ähnlichen Wirtgestein an anderen Orten für die provisorische Sicherheitsanalyse belastbar ist. Die Entsorgungspflichtigen haben zu zeigen, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten bei der Bestimmung der Tiefenlage genügend tief liegt, damit die standortspezifischen Auswirkungen betreffend flächenhafter Erosion und Dekompaktion akzeptabel sind.

Für erst später erfassbare auslegungsbestimmende Elemente sind Ausschluss- bzw. Eignungskriterien darzulegen, wie sie im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch gefordert werden.

### *Hydrogeologie und Mechanismen der Radionuklidausbreitung*

Die Entsorgungspflichtigen haben für die Durchführung einer provisorischen Sicherheitsanalyse die hydrogeologischen Verhältnisse standortspezifisch zu beschreiben. Falls keine genügenden Befunde für die Charakterisierung der Transportpfade bzgl. Nuklidtransportprozesse vorliegen, müssen eingrenzende Annahmen verwendet werden. Weiter sind die Exfiltrationsmöglichkeiten anzugeben. Die in Etappe 1 SGT dokumentierten Aussagen zu den Mechanismen der Radionuklidausbreitung sind standortspezifisch im jeweiligen einschlusswirksamen Gebirgsbereich darzulegen.

### *Geochemische Bedingungen*

Die Entsorgungspflichtigen haben die in den provisorischen Sicherheitsanalysen verwendeten geochemischen Bedingungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu begründen. Für die Wirtgesteine ist die Ableitung der chemischen Zusammensetzungen der Porenwässer (u.a. Eh-Bereich, pH-Wert und Ionenstärke) in den einschlusswirksamen Gesteinsbereichen darzulegen und geochemische Größen wie die Sorptionskoeffizienten und Diffusionskoeffizienten der sicherheitsrelevanten Radionuklide zu bestimmen und zu begründen.

### *Langzeitentwicklung (Geodynamik)*

Die Entsorgungspflichtigen haben für die provisorischen Sicherheitsanalysen die erwartete regionale und lokale Langzeitentwicklung des Lagerstandorts aufzuzeigen.

### *Biosphäre und Expositionspfade*

Die im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston verwendete Biosphärenmodellierung ist konzeptuell für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalyse ausreichend. Die Modellierung der Radionuklidausbreitung in der Biosphäre unter Berücksichtigung der Expositionspfade soll aber für jedes geologische Standortgebiet spezifisch unter Berücksichtigung

möglicher typischer Morphologien und Klimasituationen (inkl. Verdünnungspotenziale) durchgeführt werden.

Die Entsorgungspflichtigen haben in der provisorischen Sicherheitsanalyse auch die sicherheitstechnische Bedeutung von alternativen Biosphärenszenarien zu untersuchen, ebenfalls unter Verwendung von plausiblen Annahmen zu möglichen Entwicklungen von Gebietsmorphologie und Klima.

Das ENSI hat die in Etappe 1 SGT von der Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen hergeleiteten Betrachtungszeiträume von 100 000 Jahren (SMA-Lager) und 1 000 000 Jahren (HAA-Lager) als nachvollziehbar beurteilt. Die Entsorgungspflichtigen haben für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT die möglichen Veränderungen der Biosphäre innerhalb des Betrachtungszeitraums für ein SMA- und ein HAA-Lager aufzuzeigen und in den Dosisberechnungen zu berücksichtigen.

### **Sicherheitstechnischer Vergleich von Standorten**

Für den sicherheitstechnischen Vergleich haben die Entsorgungspflichtigen eine zusammenfassende Gesamtbewertung der Standorte bezüglich der Ergebnisse für den Referenzfall, der Parametervariationen und der qualitativen Bewertung vorzulegen. Die Gesamtbewertung demonstriert das stufengerechte in Etappe 2 SGT erreichte Verständnis der Langzeitsicherheit des Tiefenlagersystems und berücksichtigt die berechneten Dosen. Die Bewertungsergebnisse werden zu einem Gesamturteil über die Eignung der Standorte zusammengezogen. Die Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers für den sicherheitstechnischen Vergleich kann weitere Argumente enthalten, welche die Schlussfolgerungen der provisorischen Sicherheitsanalyse zusätzlich stützen können. Das Ergebnis wird auf der entsprechenden qualitativen Werteskala («sehr geeignet», «geeignet», «bedingt geeignet», «weniger geeignet») dargestellt. Vorgehen und Ergebnis sind im sicherheitstechnischen Bericht zu dokumentieren. Als potenzielle Standorte kommen nur solche in Frage, welche mindestens die Bewertung «geeignet» erreicht haben. Ein Standort kann ausscheiden, falls bei dieser Bewertung eindeutige Nachteile gegenüber den anderen Standorten festgestellt werden (BFE 2008, S. 71).

### **Vorgehen des ENSI bei der Prüfung des Berichts der Nagra**

Das ENSI hat gemäss der im Konzeptteil des SGT vorgesehenen Abklärung vor der Einreichung von NTB 10-01 durch die Nagra am 25. November 2010 eine Grobprüfung des Berichtsentwurfs durchgeführt. Dabei wurde geprüft, ob der Inhalt des Berichts den im Konzeptteil des Sachplans und in ENSI 33/075 festgehaltenen Anforderungen in formaler Hinsicht entspricht. Hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Aussagen prüfte das ENSI zudem, ob die im Bericht zitierten Referenzberichte der Nagra den behördlichen Anforderungen genügen. Die Kommentare des ENSI wurden von der Nagra im Rahmen von Fachsitzungen vorgestellt und von der Nagra bei der Fertigstellung des Berichts berücksichtigt.

In der vorliegenden Stellungnahme prüft das ENSI, ob der bis zum Einreichen der Dokumentation der Nagra für Etappe 2 SGT erreichbare Kenntnisstand von Prozessen und Parametern ausreicht, um belastbare Aussagen für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT machen zu können. Insbesondere werden die Arbeiten für Etappe 2 SGT zur Überprüfung, Vertiefung und Ergänzung der Informationen für die proviso-

rischen Sicherheitsanalysen, für die Beurteilung der technischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich beurteilt. Im Zusammenhang mit der Beurteilung von NTB 10-01 wurden vom ENSI spezifische Fragen formuliert, die von der Nagra anschliessend beantwortet wurden (NAB 11-04). Die entsprechenden Antworten fliessen in die Beurteilung des ENSI ein.

Im Einzelnen prüfte das ENSI folgende Themenbereiche:

- Ableitung der sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter
- Kenntnisstand der Wirt- und Rahmengesteine
- Kenntnisstand der geologisch-tektonischen Verhältnisse
- Kenntnisstand der Langzeitentwicklung (Geodynamik)
- Kenntnisstand der hydrogeologischen Bedingungen
- Kenntnisstand der bautechnischen Machbarkeit
- Kenntnisstand der geochemischen Bedingungen
- Kenntnisstand der Biosphärenmodellierung und der Expositionspfade
- Kenntnisstand der Mechanismen der Radionuklid Ausbreitung

Für das ENSI standen bei der Beurteilung von NTB 10-01 folgende Fragen im Zentrum:

- Wurden die sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter korrekt erfasst?
- Erlauben der aktuelle Wissensstand und die von der Nagra geplanten bzw. begonnenen ergänzenden Untersuchungen belastbare Aussagen für die Durchführung von provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT?

Das ENSI prüft in der vorliegenden Stellungnahme, ob für Etappe 2 SGT zusätzlich zu den von der Nagra begonnenen bzw. vorgeschlagenen Untersuchungen noch weitere Untersuchungen durchzuführen sind und welche Hinweise sich für Untersuchungen für Etappe 3 SGT ergeben.

## 2 Vorgehen bei der Beurteilung der für die provisorischen Sicherheitsanalysen notwendigen Unterlagen

Die in Etappe 2 SGT geforderte provisorische Sicherheitsanalyse hat zum Ziel, über die Wirkung und das Verhalten der einzelnen Barrieren nach ordnungsgemäsem Verschluss des geologischen Tiefenlagers Auskunft zu geben und zu zeigen, ob die berechneten Dosen unterhalb des Dosis-Schutzkriteriums der Richtlinie ENSI-G03 liegen. Die Ergebnisse dienen dem sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten. Der durch den SGT und das ENSI vorgegebene Vergleich von Standorten in Etappe 2 SGT (ENSI 33/075) erfolgt anhand der folgenden Elemente:

- Aufgrund der provisorischen Sicherheitsanalyse werden standortspezifische charakteristische Dosisintervalle ermittelt. Das charakteristische Dosisintervall vereinigt die quantitativen Ergebnisse der Freisetzungsberechnungen für die realistischerweise zu erwartende Entwicklung des geologischen Tiefenlagers (Referenzszenarium) sowie die Resultate der Analyse zur Robustheit des Systems unter Berücksichtigung weiterer durchzuführender Rechenfälle.
- Daneben erfolgt eine qualitative Beurteilung der sicherheitstechnischen Kriterien und weiterer qualitativer Sicherheitsindikatoren.
- Die quantitativen und qualitativen Bewertungen werden anschliessend zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst und fliessen in den sicherheitstechnischen Vergleich ein.

### Angaben der Nagra

#### *Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle*

Zur Beurteilung der Unterlagen für die Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle werden Testrechnungen durchgeführt. Für diese Testrechnungen werden in einem ersten Schritt die vorhandenen Unterlagen zu den geologischen Standortgebieten aus Etappe 1 SGT analysiert. Dort, wo die Bandbreiten für die Sicherheitsanalyse noch nicht quantifiziert wurden oder als eher eng beurteilt werden, werden die Bandbreiten angegeben bzw. erweitert. Dazu wird in drei Schritten vorgegangen:

1. Identifikation der Prozesse und Parameter, die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevant sind und für welche der Kenntnisstand evaluiert wird.
2. Aufzeigen des aktuellen Kenntnisstands über die relevanten Prozesse und Parameter, ausgehend von den von der Nagra für Etappe 1 SGT eingereichten Unterlagen unter Berücksichtigung der ergänzenden Arbeiten für Etappe 2 SGT.
3. Durchführung von Testrechnungen zum Dosisverlauf mit den gewählten Referenzwerten und Bandbreiten sowie Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle.

Im Hinblick auf die mögliche Entwicklung des Kenntnisstands und der zugehörigen Bandbreiten durch zukünftige Untersuchungen (siehe Schritt 2) ist durch die Wahl genügend grosser Bandbreiten sicherzustellen, dass durch zukünftige Untersuchungen entweder der jetzige Informationsstand (Referenzwerte, Bandbreiten) bestätigt wird oder dass der Informationsstand (Referenzwerte, Bandbreiten) genauer wird und die zusätzlichen Informationen eine

Eingrenzung bezüglich alternativer konzeptueller Modelle und/oder eine Verringerung der Parameter-Bandbreiten erlauben. Es ist zu vermeiden, dass durch eine ungeeignete Wahl der Bandbreiten diese später vergrössert werden müssen und sich die Schlussfolgerungen bezüglich «sicherheitstechnischer Eignung» bzw. «sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit» als falsch herausstellen.

#### *Beurteilung der technischen Machbarkeit*

Für die Beurteilung der technischen Machbarkeit wird geprüft, welche verschiedenen Arten bzw. Varianten der bautechnischen Auslegung vorgesehen werden müssen, damit die bautechnische Machbarkeit in den verschiedenen geologischen Standortgebieten gewährleistet werden kann. Dies umfasst die Auslegung der Lagerkammern, die verschiedenen Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten zur optimalen Nutzung des untertägigen Platzangebots und die verschiedenen Möglichkeiten zur Erschliessung der untertägigen Lagerbauten mit Schacht und/oder Rampe. Anschliessend wird analysiert, welche sicherheitstechnischen Auswirkungen die verschiedenen bautechnischen Auslegungsvarianten haben und ob diese aus Sicht der Langzeitsicherheit grundsätzlich akzeptabel sind.

Schliesslich ist zu beurteilen, ob der heutige Kenntnisstand ausreicht, um für die verschiedenen Standortgebiete Varianten zur Auslegung der Anlagen vorzuschlagen und die Möglichkeit für deren zuverlässiger Erstellung belastbar aufzuzeigen sowie die Auswirkungen der verschiedenen Auslegungsvarianten auf die Sicherheit standortspezifisch zu beurteilen. Falls dies mit dem heutigen Kenntnisstand unter Berücksichtigung der erwarteten Neuerkenntnisse aus den Untersuchungen für Etappe 2 SGT möglich ist, sind für Etappe 2 SGT keine über die von der Nagra geplanten Arbeiten hinausgehende Untersuchungen notwendig.

#### *Qualitative Bewertung*

Die in Etappe 2 SGT erforderliche qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit gemäss SGT (BFE 2008, Tabelle 1) orientiert sich am Vorgehen bei der Bewertung der geologischen Standortgebiete in Etappe 1 SGT. Neben den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden dabei auch Aspekte der Langzeitstabilität, der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und der bautechnischen Eignung berücksichtigt. Für die qualitative Bewertung wird auf die in Etappe 1 SGT verwendeten Indikatoren abgestützt. Grundsätzlich werden die zugehörigen, in NTB 08-03 bzw. NTB 08-05 beschriebenen Bewertungsskalen verwendet; diese werden aber punktuell entsprechend den Hinweisen in den Behördengutachten zu Etappe 1 SGT angepasst.

Die für die Analyse der Sicherheit und der Beurteilung der technischen Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter werden, wo immer möglich, den in Etappe 1 SGT verwendeten Indikatoren zugeordnet. Dies erlaubt es, bei ausgewählten Kriterien bzw. Indikatoren auch Resultate und Auswertungen der quantitativen Analysen zur Sicherheit und zur Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit in die qualitative Gesamtbewertung und den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte einfließen zu lassen.

Der Kenntnisstand für die qualitative Bewertung muss ausreichen, um einerseits die Indikatoren zu bewerten, so wie dies in Etappe 1 SGT erfolgt ist, und um andererseits die Bewertung mit zusätzlichen Argumenten basierend auf den quantitativen Analysen zur Sicherheit (Ana-

lyse des Systemverhaltens, Auswertung der Dosisberechnungen) und technischen Machbarkeit zu ergänzen. Für die Beurteilung des Kenntnisstands kann bei der Bewertung der Indikatoren auf die Erfahrungen in Etappe 1 SGT bzw. auf die diesbezüglichen Abklärungen in NTB 10-01 abgestützt werden.

### **Beurteilung des ENSI**

Das von der Nagra festgelegte Vorgehen folgt den im Sachplan und in ENSI 33/075 festgelegten Vorgaben, die sich sowohl auf eine quantitative Betrachtung (mittels provisorischer Sicherheitsanalysen) sowie eine qualitative Bewertung (vgl. Etappe 1 SGT) abstützen. Das von der Nagra im Detail beschriebene Vorgehen ist aus Sicht des ENSI zielführend.

Für das ENSI sind zusätzliche Untersuchungen für Etappe 2 SGT dann notwendig, wenn durch zusätzliche Untersuchungen Verkleinerungen bzw. Vergrösserungen der Bandbreiten möglich sind, die einen bezüglich des sicherheitstechnischen Vergleichs anderen Entscheid bewirken können. Bei der Notwendigkeit zusätzlicher Daten ist dabei zu unterscheiden zwischen effektiv durch Datenerhebungen verbesserungsfähigen Parametern und inhärenten Eigenschaften, für die auch mit grossem Untersuchungsaufwand die Ungewissheiten nicht verkleinert werden können.

#### *Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle*

Die drei von der Nagra aufgezeigten Schritte zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle sind aus Sicht des ENSI vernünftig gewählt. Die Beurteilung der von der Nagra identifizierten Prozesse und Parameter (Schritt 1) erfolgt in Kapitel 3.

Gemäss Nagra sollen die Bandbreiten der relevanten Prozesse und Parameter «alle realistisch denkbaren Ungewissheiten» abdecken. Die Bandbreiten sollen dazu genügend gross gewählt werden, um zu vermeiden, dass sie «sich im Verlauf der zukünftigen Untersuchungen als zu wenig breit bzw. als falsch erweisen und korrigiert werden müssen» (NTB 10-01, S. 12). Dieser Ansatz ist verfahrenstechnisch richtig. Er darf aber nicht dazu führen, dass aufgrund einer mangelnden Datenlage Konservativitäten verwendet werden, welche einen Standort als sicherheitstechnisch schlechter geeignet erscheinen lassen.

#### *Beurteilung der technischen Machbarkeit*

Das Vorgehen der Nagra zur Beurteilung der technischen Machbarkeit ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und zielführend. Das ENSI verweist darauf, dass die Nagra abweichend von dem im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (NTB 02-02) verwendeten Ausbaukonzept in Etappe 1 SGT einen für grosse Tiefenlagen modifizierten Ausbau der HAA-Lagerstollen eingeführt hat (vgl. NTB 10-01, Figur 5.2-1). Die Notwendigkeit dieses Ausbaus wird von der endgültigen Standortauswahl und der daraus resultierenden Tiefe des geologischen Tiefenlagers abhängen. Die bautechnische Machbarkeit wird in Kapitel 8 beurteilt.

#### *Qualitative Bewertung*

Neben der provisorischen Sicherheitsanalyse gehört zum Vergleich der Standortgebiete auch eine qualitative Bewertung (ENSI 33/075) der im SGT und vom ENSI definierten si-

icherheitstechnischen Kriterien (HSK 33/001). Die Bewertungsskala und die Schritte für den sicherheitstechnischen Vergleich sind in ENSI 33/075, Kapitel 5, festgehalten. Das Zusammenfügen der qualitativen Bewertungsergebnisse zum Gesamturteil über die Eignung des Standorts wird in NTB 10-01 nicht dargelegt. Das ENSI geht davon aus, dass die Nagra die Methodik dieses Schrittes vor dem Einreichen der Unterlagen für Etappe 2 SGT aufzeigt.

### 3 Festlegung der relevanten Prozesse und Parameter

#### Angaben der Nagra

Für die Ableitung der für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter greift die Nagra auf die in Etappe 1 SGT in Zusammenhang mit der Ableitung der Anforderungen an die Geologie gemachten Arbeiten zurück. Dies gilt insbesondere für die generelle Beschreibung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts und die für die Gewährleistung der Sicherheit und technischen Machbarkeit relevanten Sicherheitsfunktionen und übergeordneten Prinzipien. Diese bildeten in Etappe 1 SGT den Ausgangspunkt für die Ableitung der den verschiedenen Kriterien zugeordneten Indikatoren, die bei der schrittweisen Festlegung und Bewertung der geologischen Standortgebiete verwendet wurden. Die Ableitung erfolgte über verschiedene Schritte; die dabei erarbeiteten Zwischenresultate sowie die Beschreibung der Barrieren- und Sicherheitskonzepte bilden auch eine geeignete Basis für die Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter. Sie werden anhand des folgenden Vorgehens identifiziert:

- *Sicherheitsfunktionen und Prinzipien* – Den Ausgangspunkt bilden die Sicherheitsfunktionen und Prinzipien. Dabei gilt, dass ein geologisches Tiefenlager (SMA- bzw. HAA-Lager) eine genügende Sicherheit bietet, falls diese Sicherheitsfunktionen wirksam sind und die Prinzipien eingehalten werden.
- *Relevante Elemente des Barrierensystems* – Die Sicherheitsfunktionen werden gewährleistet durch die Elemente des Barrierensystems, wobei meistens mehrere Elemente des Barrierensystems zu einer bestimmten Sicherheitsfunktion beitragen. Mit der Wahl geeigneter Elemente des Barrierensystems wird auch sichergestellt, dass die erwähnten Prinzipien erfüllt sind.
- *Sicherheitsrelevante Eigenschaften* – Damit die Elemente des Barrierensystems die Sicherheitsfunktionen im Betrachtungszeitraum gewährleisten können, müssen sie die entsprechenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften besitzen.
- *Relevante Prozesse und Parameter* – Die Wirkung der sicherheitsrelevanten Eigenschaften wird durch verschiedene Prozesse und Parameter bestimmt. Somit lassen sich die relevanten Prozesse und Parameter direkt aus den sicherheitsrelevanten Eigenschaften der entsprechenden Elemente des Barrierensystems ableiten. Entsprechend der Zielsetzung der Abklärungen der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen liegt der Schwerpunkt bei der Ableitung bei denjenigen Prozessen und Parametern, die entweder geologische Merkmale repräsentieren oder durch solche beeinflusst werden. Dabei werden insbesondere die standortspezifischen geologischen Aspekte betrachtet, weil vor allem diese für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Hinblick auf die Prioritätensetzung in Etappe 2 SGT von Bedeutung sind. Daneben werden auch diejenigen Aspekte zum Verhalten der technischen Barrieren untersucht, die entsprechend den Vorgaben des ENSI in den provisorischen Sicherheitsanalysen mit einzubeziehen sind. Weiter werden bei der Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter auch Erfahrungen aus Sensitivitätsstudien, aus früheren Sicherheitsanalysen sowie aus der Entwicklung von Anlagenkonzepten berücksichtigt. Ein Teil dieser Prozesse und Parameter fließt direkt in die sicherheitstechnischen Modellrechnungen ein oder werden in der standortspezifischen Anlagenplanung berücksichtigt.

Die anderen Prozesse und Parameter werden für die qualitative Bewertung der Standortgebiete verwendet.

- *Indikatoren* – Wie in Etappe 1 SGT bildet die Analyse der sicherheitsrelevanten Eigenschaften auch die Basis zur Festlegung der Indikatoren. Da für die Ableitung der Indikatoren und der relevanten Prozesse und Parameter von den gleichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften ausgegangen wird, ergibt sich eine «Verknüpfung» zwischen Indikatoren und zugehörigen relevanten Prozessen und Parametern. Damit ist auch aufgezeigt, wie die Prozesse und Parameter in die Bewertung der Indikatoren einfließen. Die Indikatoren bzw. die zugehörigen relevanten Prozesse und Parameter werden für die qualitative Bewertung der Standorte und ihren Vergleich verwendet.

Bei der Analyse der Sicherheit werden die Prozesse und Parameter entweder in den begleitenden Systemanalysen verwendet, oder sie fließen direkt in die sicherheitstechnischen Modellrechnungen zur Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle ein. Solche Modellrechnungen werden auch verwendet für Aussagen zum Rückhaltevermögen des Gesamtsystems, zum Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit und zum Langzeitverhalten der technischen Barrieren als Teil der Gesamtbewertung der Standorte und den sicherheitstechnischen Vergleich.

Die identifizierten relevanten Prozesse und Parameter werden nach ihrer Rolle wie folgt gegliedert:

- Prozesse und Parameter, welche direkt als Parameterwerte in den Systemanalysen bzw. in den Dosisberechnungen verwendet werden, mit Bezug zu den technischen Barrieren (PT) bzw. geologischen Barrieren (PG);
- Prozesse und Parameter, welche über Parameterwerte für die Beurteilung der technischen Machbarkeit verwendet bzw. in der standortspezifischen Anlagenplanung berücksichtigt werden (PB);
- Prozesse und Parameter, die ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfließen (PI) und dort bei der Evaluation der zugehörigen Indikatoren verwendet werden.

### **Beurteilung des ENSI**

Gemäss Richtlinie ENSI-G03 hat ein Sicherheitsnachweis eine Bewertung der Methoden der Sicherheitsanalyse und der verwendeten Daten zu enthalten. Die technisch-wissenschaftlichen Daten müssen auf einem Stand sein, der die Beurteilung des Rückhaltevermögens des Barrierensystems eines geologischen Tiefenlagers und der für die Freisetzung von Radionukliden wichtigen Prozesse und Parameter ermöglicht. Die Nagra hat ihre Methodik zur Ableitung von sicherheitstechnisch relevanten Prozessen und Parametern in früheren Arbeiten im Rahmen der Etappe 1 SGT, des Entsorgungsnachweises für hochaktive Abfälle (Projekt Opalinuston) und für schwach- und mittelaktive Abfälle (Projekt Wellenberg) entwickelt und auch im Bericht NTB 10-01 verwendet.

Das ENSI schreibt die Methodik zur Ableitung der sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter nicht vor. Das Vorgehen der Nagra, die relevanten Prozesse und Parameter aus übergeordneten Prinzipien und Sicherheitsfunktionen abzuleiten, ist aus Sicht des ENSI systematisch und sicherheitsgerichtet. Die Nagra stützt sich bei der Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter auf die bestehenden Beschreibungen des Barrieren- und Sicher-

heitskonzepts aus Etappe 1 SGT. Dies ist aus Sicht des ENSI ein geeignetes Vorgehen, um die Vergleichbarkeit der Aussagen in jeder Etappe des SGT zu ermöglichen. Zudem begründet die Nagra nachvollziehbar, weshalb gewisse Prozesse in den Testrechnungen nicht explizit berücksichtigt werden (Systemanalysen in NTB 10-01, Kapitel 6.2) und erfüllt damit den Auftrag gemäss ENSI 33/075, die relevanten Prozesse zu bezeichnen.

In Etappe 2 SGT wird neben den provisorischen Sicherheitsanalysen für die jeweilig bezeichneten Standorte auch ein sicherheitstechnischer Vergleich zwischen den Standorten durchgeführt. Teil dieses Vergleichs ist die sicherheitstechnische Bewertung anhand der im Sachplan aufgeführten 13 sicherheitstechnischen Kriterien. Die Nagra hat alle sicherheitstechnischen Kriterien in der Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter berücksichtigt.

Bei der Analyse der Sicherheit verwendet die Nagra die Prozesse und Parameter entweder in den begleitenden Systemanalysen oder sie fliessen direkt in die sicherheitstechnischen Modellrechnungen zur Ermittlung von Dosisintervallen ein. Die in den Testrechnungen direkt modellierten Prozesse und Parameter betreffen hauptsächlich die Kriterien 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», 3.1 «Charakterisierbarkeit der Gesteine» und 3.3 «Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen» (Tabelle A-1). Das Vorgehen der Nagra ist aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und in Übereinstimmung mit den Anforderungen in ENSI 33/075.

Das ENSI hat die Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter detailliert in ENSI 33/111 beurteilt. Es kommt zum Schluss, dass die Nagra die relevanten Prozesse und Parameter nachvollziehbar und stufengerecht abgeleitet hat. Die von der Nagra aufgeführten Prozesse sind konzeptuell ausreichend, um die für Etappe 2 SGT vorgesehenen provisorischen Sicherheitsanalysen durchführen zu können und zu belastbaren Aussagen zu kommen. Das ENSI beurteilt in den folgenden Kapiteln die Datengrundlagen hinsichtlich der Geologie der Standortgebiete und die in die Testrechnungen eingehenden Referenzwerte und Parameterbandbreiten sowie die den Berechnungen zugrunde liegenden Modelle und Konzepte.

## 4 Charakterisierung der Wirtgesteine

### Angaben der Nagra

Die Vorschläge der geologischen Standortgebiete von Etappe 1 SGT betreffen vier bevorzugte Wirtgesteine bzw. einschlusswirksame Gebirgsbereiche:

- den Opalinuston und seine Rahmengesteine
- die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' (kurz 'Brauner Dogger') und ihre Rahmengesteine
- die Effinger Schichten
- die Mergel-Formationen des Helvetikums

Der Kenntnisstand über die Eigenschaften des Opalinustons sowie der Mergel-Formationen des Helvetikums ist aufgrund früherer gezielter Untersuchungsprogramme (Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston, Rahmenbewilligungsgesuch Wellenberg) umfassender als bei den anderen beiden Wirtgesteinen; es liegen aber von allen Wirtgesteinen quantitative und qualitative Daten von gekernten Tiefbohrungen aus den relevanten Tiefenbereichen (SMA 200–800 m u. T., HAA 400–900 m u. T.) vor. Dies hängt damit zusammen, dass im Rahmen des Untersuchungsprogramms Nordschweiz der Nagra (1982–1994), welches auf das kristalline Grundgebirge ausgerichtet war, auch grosse Bereiche des sedimentären Deckgebirges gekernt sowie hydraulisch getestet und bohrlochgeophysikalisch vermessen wurden und auch Ergebnisse neuerer Bohrungen, vor allem aus Geothermie-Projekten, vorliegen. Diese Bohrungen liegen in oder in unmittelbarer Nähe der Standortgebiete; die bis Redaktionsschluss der Berichte zur Etappe 1 SGT vorliegenden Daten sind in NTB 08-04 umfassend dargestellt und diskutiert. Schliesslich tragen auch die bohrlochgeophysikalischen Logs und hydraulischen Tests aus Erdölbohrungen, Beobachtungen in Tunnels sowie zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Dissertationen mit Aufschlussbeobachtungen und Laboranalysen zur Kenntnis der Wirtgesteine bei. Für grossräumige Fazieskorrelationen werden neben Informationen aus Tiefbohrungen auch solche aus untiefen Bohrungen und Aufschlüssen verwendet (NTB 08-04, Beilagen 5.2-1 und 5.2-2; neue Untersuchungen für Etappe 2 SGT, siehe NTB 10-01, Kapitel 8.3). Schliesslich werden auch die Erfahrungen in anderen Entsorgungsprogrammen und der Erdöl- und Erdgasindustrie genutzt.

Für jedes Wirtgestein stellt die Nagra bezüglich dieser Prozesse und Parameter den aktuellen Kenntnisstand zusammen und legt dar, wo noch ergänzende zusätzliche Untersuchungen für Etappe 2 SGT geplant sind (u.a. Datenkompilationen, Untersuchungen an Fremdbohrungen, Feldarbeiten und Labormessungen). In verschiedenen Hintergrundberichten werden die aktuellen Datensätze in Form von Datenbanken festgehalten. NAB 10-19 gibt einen Überblick über die für die Beschreibung der Gesteinsparameter der verschiedenen Wirtgesteine verwendeten Datenquellen (siehe Figur 4-1).

Standort	Benken	Beznau	Böttstein	Gösgen	Kaisten	Leuggern	Mont Terri	Oftringen	Riniken	Schafisheim	Siblingen	Weiach
Tertiär												
Malm												
Dogger												
Lias												
Keuper												
Muschelkalk												
Buntsandstein												
Perm												
Karbon												

Effinger Schichten												
'Brauner Dogger'												
Opalinuston												

Lokalität	Datenquellen
Benken	Nagra 2001a, Nagra 2003, Meier (in Vorb.)
Beznau	Nagra 1981
Böttstein	NTB 85-02
Gösgen	Waber et al. (in Vorb.)
Kaisten	NTB 86-04
Leuggern	NTB 86-05
Mont Terri	Nagra 1991, Pearson et al. 2003
Oftringen	NAB 08-02, NAB 08-18
Riniken	NTB 86-02, Meier (in Vorb.)
Schafisheim	NTB 86-03, Meier (in Vorb.)
Siblingen	NTB 90-34
Weiach	NTB 86-01, Meier (in Vorb.), Waber (in Vorb.)

Figur 4-1: Übersicht über die vorhandenen Beschreibungen der Gesteinsparameter in der Nordschweiz an den betrachteten Lokalitäten (modifiziert aus NAB 10-19). Graue bzw. blaue Felder verweisen auf vorhandene Daten in den entsprechenden stratigraphischen Zeitepochen (oben) bzw. Wirtgesteinen (unten).

Für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT sind weitere vertiefende Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus den Tiefbohrungen der Nordschweiz (z.B. Chlorid-Profile) sowie Untersuchungen an Oberflächenaufschlüssen sowie aus Bohrungen von Geothermie-Projekten vorgesehen bzw. schon im Gange. Weiter werden nach Möglichkeit auch Bohrungen Dritter zum Erhalt zusätzlicher Informationen genutzt.

### Beurteilung des ENSI

Bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers sind die für die Barrierenwirkung massgebenden Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von zentraler Bedeutung. Zu den wichtigsten sicherheitsrelevanten Prozessen und Parametern bezüglich der Barrierenwirkung des Wirtgesteins führt die Nagra die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit (PG-6) unter Berücksichtigung der sedimen-

tären Architekturelemente (PG-11), die Art der Transportpfade (PG-9), die Transmissivität von Störungszonen (PG-14), das Selbstabdichtungsvermögen (PI-6), die Diffusionskoeffizienten (PG-22), welche durch die Porosität (PG-10) bestimmt werden sowie die für das Sorptionsvermögen des Wirtgesteins massgebenden geochemischen Bedingungen (Mineralogie, PG-15, insbesondere Gehalt an Tonmineralien, pH- und Redoxbedingungen, PG-16 bzw. -17, Porenwasserzusammensetzung, PG-18) auf.

Aus Sicht des ENSI ist das von der Nagra dargestellte Vorgehen nachvollziehbar und zielführend, um die für die provisorischen Sicherheitsanalysen Etappe 2 SGT erforderlichen Daten erarbeiten zu können. Die Datenlage wird wirtgesteinsspezifisch in den folgenden Kapiteln 4.1 bis 4.4 beurteilt. Die Beurteilung der hydrogeologisch wichtigen Parameter Porosität und grossräumige hydraulische Durchlässigkeit erfolgt in den Kapiteln 4.5 und 4.6. Der Einfluss der Dekompaktion wird in Kapitel 4.7 beurteilt. Die Aspekte des Gastransports werden in Kapitel 4.8 beurteilt. Zu den geochemischen Bedingungen in den Wirtgesteinen äussert sich das ENSI in Kapitel 9.

## **4.1 Opalinuston**

### **Angaben der Nagra**

Der Kenntnisstand über die Eigenschaften des Opalinustons und seiner Rahmengesteine ist aufgrund einer langjährigen intensiven Forschungstätigkeit im Nagra-Programm hoch (siehe Figur 4-1). Neben den Untersuchungen in den Tiefbohrungen und den seismischen Untersuchungen in der Nordschweiz (2D- und 3D-Seismik) wird im Rahmen des internationalen Mont Terri Projekts seit 1996 ein breit angelegtes Untersuchungsprogramm untertage durchgeführt. Im Mont Terri werden kontinuierlich neue Erkenntnisse betreffend Gastransport, Selbstabdichtung, Porenwasserchemie, Diffusionsprozesse, Bautechnik und technische Barrieren gewonnen. Die Ergebnisse dieser Experimente werden laufend in technischen Berichten des Mont Terri Projekts und in Fachzeitschriften publiziert.

Spezielle Fragen zum Opalinuston wurden im Rahmen von Dissertationen, zahlreichen regionalen Studien (z.B. zu Daten aus Eisenbahn- und Strassentunnels) sowie Laboruntersuchungen bearbeitet. Weiter können auch die Erfahrungen mit Tongesteinen im Ausland verwendet werden, insbesondere die Arbeiten in Frankreich an den Tongesteinen des Callovo-Oxfordien, welche dem Opalinuston ähnlich sind.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI hat sich im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston (HSK 35/99) und in Etappe 1 SGT (ENSI 33/070) sowie mit eigenen Forschungsarbeiten im Mont Terri intensiv mit dem Wirtgestein Opalinuston auseinandergesetzt. Die marinen Ablagerungsverhältnisse zur Zeit der Bildung des Opalinustons vor 175 Millionen Jahren haben dazu geführt, dass die Ausbildung dieser Schicht über grosse Bereiche zwischen Mont Terri und Zürcher Weinland weitgehend homogen ist. Die Unterschiede zwischen sandiger und toniger Fazies beschränken sich auf geringe Unterschiede im Ton- und Kalzitgehalt und damit verbunden auf Unterschiede in den bautechnischen Parametern des Gesteins. Die im Mont Terri ausgeprägte Faziesverteilung im Dekameterbereich ist in allen Standortgebieten

vorhanden, wie auch die lithologische Variabilität im mm- bis cm-Bereich. Aufgrund der im grossskaligen Bereich geringen Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung ist die Annahme eines homogen porösen Gesteins in der Sicherheitsanalyse aus Sicht des ENSI nachvollziehbar und korrekt.

Die im Opalinuston vorhandenen Mengen an Tonmineralen (40–80%) erlauben die Annahme guter Sorptionseigenschaften und eines guten Selbstabdichtungsvermögens, wie es die Nagra in diversen Versuchen am Felslabor Mont Terri und an Bohrkernen nachgewiesen hat. Der Mittelwert des Tonmineralgehalts des Opalinustons der Bohrung Benken beträgt aufgrund von Labormessungen an 22 Kernproben  $54.4 \pm 10.3$  Gew.-% (NAB 10-19). Dieser Wert deckt sich mit dem anhand von geophysikalischen Logs über die ganze Opalinustonabfolge ermittelten Mittelwert des Tonmineralgehalts von 55.6 Gew.-%, was zeigt, dass die Laboranalysen als repräsentativ betrachtet werden können.

Das ENSI beurteilt die Datenlage zum Kenntnisstand der Nagra für den Opalinuston hinsichtlich der angesprochenen Prozesse und Parameter als ausreichend für die Durchführung der standortspezifischen provisorischen Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT.

## 4.2 'Brauner Dogger'

### Angaben der Nagra

Die Informationen zur lithologisch-faziellen Ausbildung des 'Braunen Doggers' in den zwei Standortgebieten Zürich Nord-Ost<sup>1</sup> und Nördlich Lägeren basieren auf drei gut untersuchten Tiefbohrungen in der Nordschweiz (Weiach, Benken, Herdern-1) innerhalb bzw. in der direkten Umgebung der geologischen Standortgebiete sowie auf Informationen aus untiefen Bohrungen sowie Aufschlüssen nordwestlich der Standortgebiete. Weitere untiefe Bohrungen und die Bohrung Riniken liegen im Übergangsbereich zur westlich angrenzenden Hauptrogenstein-Fazies, welche den Westrand des Verbreitungsgebiets des 'Braunen Doggers' bildet.

Es bestehen Ungewissheiten betreffend Mächtigkeit, Ausbildung und lateraler Ausdehnung von sandigen und kalkigen, z.T. auch eisenoolithischen Einschaltungen (Sandkalkabfolgen), welche als potenziell wasserführend betrachtet werden, wenn auch in sehr beschränktem Masse. Die quantitativen hydrogeologischen Informationen stammen aus den drei oben genannten Bohrungen, wobei nur in einer (Benken) die ganze Abfolge getestet wurde. Es gibt keine Untertagebauten, in welchen der 'Braune Dogger' in relevanter Fazies ausgebildet ist.

Für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT sind weitere Untersuchungen zur Klärung der Rolle der potenziell wasserführenden sedimentären Architekturelemente vorgesehen (Untersuchungen an Oberflächenaufschlüssen in Süddeutschland, Chloridprofile an Bohrkernen). Soweit erhältlich, werden auch Informationen aus Bohrungen Dritter (z.B. Erdwärmesonden-Bohrungen, kurz: EWS-Bohrungen) zur Verbesserung der Datenbasis zur Fazieskorrelation genutzt. Falls die zurzeit laufende tiefe Geothermiebohrung Schlattigen bzgl. der geplanten Datenerhebung erfolgreich ausgeführt werden kann, werden auch dort

---

<sup>1</sup> Ehemalige Bezeichnung: Zürcher Weinland

der 'Braune Dogger' und seine unteren Rahmengesteine bzw. der Opalinuston gekernt und detailliert untersucht (Bohrlochtests, Bohrkernanalysen).

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI hat die Aussagen der Nagra zum 'Braunen Dogger' in Zusammenarbeit mit zwei externen Experten (Dr. R. Burkhalter, swisstopo, und Dr. P. Bitterli) und der KNE überprüft. Der 'Braune Dogger' (bzw. westlich der Aare eine auf die unteren Schichtglieder reduzierte Serie davon) gehört in allen Standortgebieten der Nordschweiz zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich. In den Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren wird der 'Braune Dogger' ausserdem als Wirtgestein für ein SMA-Lager vorgeschlagen. Dies erklärt, wieso die Nagra in ihrer Darstellung des Kenntnisstands vor allem die Situation in diesen beiden Gebieten darstellt. Der Kenntnisstand soll nach Meinung des ENSI jedoch unabhängig von dieser Fokussierung regional erarbeitet werden, da die im 'Braunen Dogger' vorhandenen Fazieswechsel standortgebiet-übergreifend, d.h. in einem grösseren geologischen Kontext, verstanden werden müssen.

Die Nagra fasst den Aspekt der Fazieswechsel unter den Parametern Variabilität der Gesteinseigenschaften (PI-5) und, damit verbunden, Variabilität der hydrogeologischen Parameter (PG-6, PG-9, PG-11) zusammen. ENSI und KNE begrüssen, dass die Nagra in den von ihr für Etappe 2 SGT vorgeschlagenen Untersuchungen (NTB 10-01, Kapitel 8.3) schwerpunktmässig die Gesteine des 'Braunen Doggers' betrachten und dazu die lateralen Fazies- und Mächtigkeitsänderungen der Sandkalkabfolgen innerhalb des 'Braunen Doggers' vertieft untersuchen will. Dabei sind aus Sicht des ENSI und deren Experten die Aussagen über die geplanten Untersuchungen wenig konkret. Die Qualität der Untersuchungen hängt stark von den Ausführungen im Detail ab. Neben Untersuchungen an Bohrkernen sind nach Meinung des ENSI insbesondere auch die an der Oberfläche aufgeschlossenen Abfolgen mit einzubeziehen. Dabei sind nicht nur die süddeutschen Aufschlüsse zu berücksichtigen, sondern ebenso Aufschlüsse in der Nordschweiz (z.B. Klingnau/Acheberg, Lägeren, Aufschlüsse rund um das Standortgebiet Bözberg).

Ergänzend zu den Arbeiten zur Lithostratigraphie sollten auch Untersuchungen zur Biostratigraphie durchgeführt werden (z.B. Studien gestützt auf Palynomorphe und Makrofossilien, (Burkhalter et al. 1997). Solche Arbeiten sollten erlauben, die laterale Zuordnung der Sandkalkbänke und Eisenoolithhorizonte zu verfeinern. Ohne Kenntnis der biostratigraphischen Einordnung ist eine stratigraphische Gliederung des 'Braunen Doggers' allein durch lithologische Vergleiche mit Ungewissheiten behaftet. Gestützt auf eine regional umfassende Faziesanalyse und unter Einbezug von damaligen Meeresspiegelschwankungen soll die Ablagerungsgeschichte in einem regionalen Ablagerungsmodell festgehalten werden. Diese Modelle sollen zur Überarbeitung und Aufdatierung der in Nagra (2001) entwickelten Faziesverteilungskarten verwendet werden. ENSI und KNE gehen davon aus, dass die gesammelten Informationen in ein genetisches regionales Faziesmodell einfliessen, das erlaubt, bzgl. des vertikalen und lateralen Auftretens der Sandkalke und Eisenoolithhorizonte zur Konzeptualisierung des Gesteins für die provisorische Sicherheitsanalyse wichtige Randbedingungen zu setzen.

*Forderung 1*

Das ENSI fordert von der Nagra für Etappe 2 SGT ein regional ausgerichtetes Untersuchungsprogramm zum 'Braunen Dogger', das neben der Lithostratigraphie auch die Biostratigraphie untersucht und sich neben bestehenden Bohrungen auch auf die im süddeutschen und Nordschweizer Raum vorhandenen Aufschlüsse abstützt. Früher entwickelte Faziesverteilungskarten sind zu überarbeiten und aufzudatieren, um daraus für die Konzeptualisierung des 'Braunen Doggers' umfassendere Unterlagen zu erhalten.

Die hydraulischen Eigenschaften des 'Braunen Doggers' hängen stark von der Beschaffenheit der darin vorkommenden Sandkalke ab. Diese sollten daher sorgfältig, d.h. sowohl lateral als auch vertikal auf ihre primäre (z.B. Korngrößenverteilung, diagenetische Zementierungsprozesse) und sekundäre Porosität (z.B. frühe und späte Klüfte) untersucht werden. Dazu könnten z.B. einige gut aufgeschlossene Profile durchgehend und lateral beprobt werden. Mit vertiefenden Untersuchungen zur Litho- und Biostratigraphie soll ein verfeinertes sedimentologisch-genetisches Modell entwickelt und damit die Prognostizierbarkeit der Sandkalkbänke des 'Braunen Doggers' hinsichtlich ihrer regionalen Variabilität und potenziellen hydraulischen Wirkung weiter verbessert werden.

In NTB 10-01, Tabelle 4.3-1, legt die Nagra dar, welche Prozesse und Parameter sie als wirtgesteinsspezifisch ansieht. Das ENSI hat die entsprechenden Prozesse und Parameter bezüglich der zum 'Braunen Dogger' gemachten Aussagen überprüft. Es stellt fest, dass vielfach wirtgesteinsspezifische Werte vorhanden sind. Die nur spärlich vorhandenen hydraulischen Durchlässigkeitswerte (PG-6) werden vom ENSI in Kapitel 4.6 beurteilt. Durch Analogieschlüsse und/oder konzeptuelle Überlegungen hergeleitete Parameter finden sich zum Einfluss der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit (PG-7, Anlehnung an Erfahrungen aus den Effinger Schichten), zur Art der Transportpfade (PG-9, Verwendung von konzeptuellen Modellen), zur Transmissivität von Störungszonen (PG-14, Annahme von gegenüber Opalinuston 100-fach höheren Werten, Beurteilung in Kapitel 7), zum Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas (PG-25, Verweis auf Opalinuston als abdeckender Fall, Beurteilung in Kapitel 4.8), zu den Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften (PB-7, Beurteilung in Kapitel 8), zur Geochemie (Porenwasser, Porosität, Diffusions- und Sorptionskoeffizienten, vgl. Beurteilung in Kapitel 9). Analogieschlüsse zum Opalinuston mögen dabei angesichts der im Opalinuston nicht vorkommenden Sandkalklagen zu eher optimistischen Resultaten führen, eine Analogie mit den Effinger Schichten (bzgl. Einfluss Dekompaktion) wird von der Nagra selbst als «eher pessimistisch» (NTB 10-01, S. 74) eingestuft. Das ENSI ist der Ansicht, dass die Menge der von der Nagra herangezogenen Analogieschlüsse überschaubar ist und dabei kein Überhang optimistischer oder pessimistischer Annahmen vorhanden ist, so dass für die Testrechnungen gesamthaft von einer realistischen Einschätzung für das Wirt- oder Rahmengestein 'Brauner Dogger' ausgegangen werden kann. Zum Einsatz von Analogieschlüssen liegt seitens Nagra jeweils ein gutes Konzeptverständnis vor.

Bei den hydraulischen Parametern umfassen die von der Nagra aufgrund konzeptueller Überlegungen eingesetzten Parameter für die in NTB 10-01 vorgelegten Testrechnungen sehr wichtige Parameter. Der von der Nagra angekündigten Datenerhebung für die in Etappe 2 SGT vorzunehmenden provisorischen Sicherheitsanalysen, z.B. aus der bereits laufenden Bohrung in Schlattigen, kommt daher grosses Gewicht zu. Aus Sicht des ENSI werden die von der Nagra angekündigten Datenerhebungen als zielführend angesehen.

**Forderung 2**

Die für den 'Braunen Dogger' in NTB 10-01 verwendeten Analogien und Vergleiche zur Beschreibung der sicherheitsrelevanten Parameter Porosität, Diffusions- und Sorptionskoeffizienten sind für Etappe 2 SGT durch Parameterwerte zu ersetzen, die sich auf wirtgesteinspezifische Messwerte abstützen.

Zusammenfassend beurteilt das ENSI den von der Nagra dargestellten Kenntnisstand zum Wirtgestein 'Brauner Dogger' als korrekt. Zusammen mit den von der Nagra noch geplanten Untersuchungen und den vom ENSI geforderten Ergänzungen wird der erreichbare Kenntnisstand für Etappe 2 SGT und den darin erfolgenden sicherheitstechnischen Vergleich als genügend angesehen.

### 4.3 Effinger Schichten

#### Angaben der Nagra

Die Effinger Schichten wurden durch die Nagra erstmals im Rahmen der Sedimentstudie als potenzielles Wirtgestein für hochaktive Abfälle evaluiert. Damals lagen mit wenigen Ausnahmen (Bohrung Weiach) quantitative hydrogeologische Daten nur aus oberflächennahen Bohrungen vor, und die Formation wurde für das HAA-Lager aufgrund der potenziell wasserführenden Kalkbankabfolgen zu Gunsten des Opalinustons zurückgestellt.

Seither wurden die Kenntnisse über die Eigenschaften der Effinger Schichten signifikant verbessert. Neben Forschungsarbeiten zur Stratigraphie der Effinger Schichten erfolgte eine hydrogeologische Charakterisierung der Effinger Schichten in Untertagebauten aufgrund von Wasserzuflussbeschreibungen sowie aufgrund hydraulischer Tests bzw. Fluid-Logging in zwei EWS-Bohrungen in Küttigen, in der Bohrung Gösgen und in der EWS-Bohrung Oftringen. Der wichtigste Datensatz stammt aus der Bohrung Oftringen, in welcher die Effinger Schichten in einem relevanten Tiefenbereich (420–642 m) sowohl in ungestörter Lagerung als auch von einigen kleinen Störungszonen durchsetzt hydraulisch getestet wurden. Zudem lieferten Untersuchungen an Porenwässern wertvolle Erkenntnisse zur Zirkulation der Grund- und Porenwässer. Eine integrale Darstellung der Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten – ohne Berücksichtigung der neuesten Daten aus den EWS-Bohrungen Küttigen und Oftringen – enthält auch verschiedene bisher nicht veröffentlichte Daten aus oberflächennahen Bohrungen und Untertagebauten. Die Verteilung und laterale Korrelation der potenziell wasserführenden Kalkbankabfolgen in den Bohrungen der Nordschweiz sind aufgrund bohrlochgeophysikalischer Logs dokumentiert. Neue stratigraphische, hydrogeologische und hydrochemische Daten, welche erst nach Abschluss der Berichte zu Etappe 1 SGT vorlagen, stammen aus einer Kernbohrung bei Gösgen und einer EWS-Bohrung in Aarau.

Für Etappe 2 SGT sind weitere Untersuchungen im Gange bzw. geplant, welche insbesondere die laterale Korrelation von Kalkbankabfolgen betreffen, denen bei der Platzierung der Lagerkammern soweit möglich ausgewichen werden soll.

## Beurteilung des ENSI

Ähnlich wie beim 'Braunen Dogger' sind die Effinger Schichten durch eine markante lithologische Variabilität gekennzeichnet. Im Unterschied zum 'Braunen Dogger' beschränkt sich diese Variabilität nicht auf einzelne Sandkalkbänke oder -abfolgen, sondern weist bereits im dm-Bereich eine Wechsellagerung von tonigen Mergeln und mergeligen Kalken auf. Dazu kommt das Auftreten von kalkreicheren Abschnitten, so genannten Kalkbankabfolgen. Das grossräumige Faziesmuster der Effinger Schichten ist bekannt, die Kenntnisse mit prognostischem Potenzial über die Variabilität im Skalenbereich eines SMA-Lagers werden von der Nagra zurzeit mit Hilfe weiterer Aufschlussuntersuchungen, Auswertungen von Bohrlochdaten und Datensätze zur Oberflächenmorphologie erarbeitet. Diese Untersuchungen werden aus Sicht des ENSI im Hinblick auf Etappe 2 SGT als zielführend angesehen, um die für die provisorische Sicherheitsanalyse vorgesehene Konzeptualisierung mit den notwendigen Bandbreiten zu versehen.

Die Nagra fasst die in den Effinger Schichten ausgeprägt vorhandene lithologische Variabilität unter den Parametern Variabilität der Gesteinseigenschaften (PI-5) und, damit verbunden, Variabilität der hydrogeologischen Parameter (PG-6, PG-9, PG-11) zusammen. ENSI und KNE begrüssen, dass die Nagra in den von ihr für Etappe 2 SGT vorgeschlagenen Untersuchungen (NTB 10-01, Kapitel 8.3) schwerpunktmässig die Gesteine der Effinger Schichten betrachten und die lateralen Fazies- und Mächtigkeitsänderungen der Kalkbankabfolgen vertieft untersuchen will. Zum Vorkommen der Kalkbankabfolgen fehlen jedoch für die Effinger Schichten sedimentologisch-genetische Untersuchungen, die die regionale Variabilität der einzelnen Schichten und deren Mächtigkeiten beschreiben würden und daraus die entsprechenden Bandbreiten für die Konzeptualisierung der Effinger Schichten für die provisorische Sicherheitsanalyse liefern würden.

### *Forderung 3*

Die Nagra hat für die laterale Ausdehnung und das vertikale Auftreten der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten ein sedimentologisch-genetisches Modell zu entwickeln, aus dem die Bandbreiten für die Konzeptualisierung der Effinger Schichten für die provisorischen Sicherheitsanalysen abgeleitet werden können.

In NTB 10-01, Tabelle 4.3-1, legt die Nagra dar, welche Prozesse und Parameter sie als wirtgesteinsspezifisch ansieht. Das ENSI hat die entsprechenden Prozesse und Parameter bezüglich der zu den Effinger Schichten gemachten Aussagen überprüft. Es stellt fest, dass zu diesem Wirtgestein mit wenigen Ausnahmen wirtgesteinsspezifische Messdaten vorhanden sind. Zurzeit liegen zur grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit (PG-6) nur wenige Messdaten vor; diese werden in Kapitel 4.6 beurteilt. Durch Analogieschlüsse und/oder konzeptuelle Überlegungen hergeleitete Parameter finden sich zu den Parametern Art der Transportpfade (PG-9, Verwendung von konzeptuellen Modellen), zur Transmissivität von Störungszonen (PG-14, Verwendung des höchsten gemessenen Wertes aus einer offenen, aber kleinen Scherzone, Beurteilung in Kapitel 7), zum Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas (PG-25, Beurteilung in Kapitel 4.8), zu den Parameter zur Geochemie (Diffusions- und Sorptionskoeffizienten, Beurteilung in Kapitel 9).

Der Wissensstand zu den Effinger Schichten wurde mit den Bohrungen von Oftringen, Küttigen und Gösigen sowie zusätzlichen Daten aus Erdsondebohrungen in den letzten Jahren

erheblich verbessert. So liegen für die meisten Prozesse und Parameter wirtgesteinsspezifische Daten vor. Hinsichtlich weniger Parameter ist die Datenlage der Effinger Schichten beschränkt. Hier greift die Nagra für ihre Testrechnungen in NTB 10-01 unter Verwendung von Analogieschlüssen auf Daten des Opalinuston (z.B. bei der Transmissivität von Störungszonen, vgl. NTB 10-01, Tabelle 4.3-3) zurück. Wegen des deutlich geringeren Tongehaltes der Effinger Schichten sind solche Analogieschlüsse, z.B. für das Selbstabdichtungsvermögen, aus Sicht des ENSI jedoch nur beschränkt möglich.

#### *Forderung 4*

Die Nagra hat deshalb das Selbstabdichtungsvermögen der Effinger Schichten für Etappe 2 SGT besser zu begründen, z.B. indem sich die verwendeten Analogien und Vergleiche auf wirtgesteinsspezifische Messwerte abstützen.

Das ENSI stellt weiter fest, dass sich die Analogieschlüsse für die Effinger Schichten auf wenige Fälle beschränken. Ein direkter Analogieschluss mit dem Opalinuston mag angesichts der im Opalinuston nicht vorkommenden Wechsellagerung und der speziell zu betrachtenden Kalkbankabfolgen zu eher optimistischen Resultaten führen. Die Nagra hat aber die entsprechenden Werte transparent und aus Sicht des ENSI begründet festgelegt. Das ENSI ist der Ansicht, dass die von der Nagra verwendeten Analogieschlüsse (als Folge beschränkter Daten) überschaubar ist und damit kein Übergewicht von zu konservativen oder zu optimistischen Betrachtungen vorhanden ist, welches für dieses Wirtgestein generell zu einer zu optimistischen oder zu pessimistischen Bewertung führen würde.

Zusammenfassend beurteilt das ENSI den von der Nagra dargestellten Kenntnisstand zu den Effinger Schichten als korrekt. Zusammen mit den von der Nagra noch geplanten Untersuchungen und den vom ENSI geforderten Ergänzungen wird der erreichbare Kenntnisstand für Etappe 2 SGT und den darin erfolgenden sicherheitstechnischen Vergleich als genügend angesehen.

## **4.4 Mergel-Formationen des Helvetikums**

### **Angaben der Nagra**

Die Mergel-Formationen des Helvetikums (insbesondere Palfris-Formation, Vitznau-Mergel und Amden-Formation) wurden bereits in einer frühen Phase der SMA-Standortevaluation als mögliche Wirtgesteine betrachtet und auch im Rahmen von Dissertationen untersucht. Detaillierte hydrogeologische und bautechnische Daten lagen erstmals vom Bau des Seelisbergtunnels vor. Gezielte geowissenschaftliche Untersuchungen im Hinblick auf die Eignung der Gesteine für ein SMA-Tiefenlager begannen 1987 mit mehreren Bohrungen in den Annexbauwerken des Seelisbergtunnels (potenzieller Standort Oberbauenstock). Ein umfangreiches Untersuchungsprogramm von der Oberfläche aus erfolgte anschliessend im potenziellen Standortgebiet Wellenberg. Es umfasst 7 Tiefbohrungen, mehrere reflexions- und refraktionsseismische Messkampagnen, Piezometer- und flache Aufschlussbohrungen sowie eine Reihe geologischer und hydrogeologischer Feldstudien. Die Ergebnisse sind in einem Synthesebericht zusammengestellt, und es existieren zahlreiche detaillierte geowissenschaftliche Referenzberichte, in welchen die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen um-

fassend dargestellt und diskutiert sind. Zudem wurde eine umfassende Sicherheitsanalyse durchgeführt. Nach Abschluss dieser Arbeiten wurden nachträglich noch Forschungsarbeiten publiziert, in welchen einzelne Aspekte vertieft analysiert wurden (Herkunft Erdgas, Radionuklidtransport, Unterdrücke).

Ergebnisse von hydrogeologischen Untersuchungen in neuen Untertagebauten (zusammenfassender Überblick in NTB 08-04) haben die Ergebnisse der Standortuntersuchungen am Wellenberg im Wesentlichen bestätigt.

Weil die bestehenden Untersuchungen am Wellenberg sehr umfassend sind, sind für Etappe 2 SGT nur noch Untersuchungen in geringerem Umfang vorgesehen (Auswertung neuer Daten von Untertagebauten, Überprüfung und gegebenenfalls Neuinterpretation der bestehenden tektonischen Profile).

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI hat das Wirtgestein der Mergel-Formationen des Helvetikums in seinem Gutachten zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Wellenberg bereits eingehend beurteilt (HSK 30/9). Die Nagra hatte sich damals auf Daten aus einem intensiven Untersuchungsprogramm inklusive sieben Bohrungen abgestützt (NTB 96-01). Im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsgesuch hatte die Nagra auch eine vollständige Sicherheitsanalyse durchgeführt (NTB 94-06). Das ENSI beurteilt daher die Datenlage für dieses Gestein als ausreichend für die Durchführung der standortspezifischen provisorischen Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT.

Die Nagra plant, auch zu diesem Standortgebiet neue geologische Informationen in ihre Überlegungen mit einzubeziehen. Dies betrifft insbesondere neue Forschungsergebnisse zur Tektonik des Helvetikums und die Entwicklung eines neuen geologischen 3D-Standortmodells, das erlauben wird, die räumlichen Verhältnisse besser zu verstehen. Aus Sicht des ENSI kommt die Nagra damit ihrer Pflicht nach, ihre Evaluation jeweils am aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik auszurichten. Das ENSI beurteilt die geplanten Ergänzungen als zielführend, um in Etappe 2 SGT provisorische Sicherheitsanalysen und einen sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

## **4.5 Porositäten der Wirtgesteine**

### **Angaben der Nagra**

Von allen Wirtgesteinen liegen umfangreiche Porositätsmessungen vor. In den letzten Jahren wurde auch ein vertieftes Verständnis hinsichtlich diffusionszugänglicher Porosität bzw. Fliessporosität für verschiedene gelöste Stoffe entwickelt.

Die vorhandenen Unterlagen werden als genügend beurteilt, um den Geosphärentransport in den Testrechnungen zu konzeptualisieren und zu parametrisieren. Für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT werden ergänzende Porositätsmessungen an Bohrkernen des 'Braunen Doggers' durchgeführt.

## Beurteilung des ENSI

Die Fließporosität der Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten ist von Bedeutung, weil für den Stofftransport trotz der geringen hydraulischen Durchlässigkeit neben der Diffusion auch die Advektion (Transport gelöster Stoffe mit dem Wasser) wichtig ist. Dies zeigt sich beim Vergleich der Referenzfälle mit den Fällen bei erhöhtem Wasserfluss (Advektion) aus den Figuren A7-1 bis A7-12 (NTB 10-01). Diese Wirtgesteine werden im Referenzfall als homogen-porös angesehen, während der Stofftransport in den Mergel-Formationen des Helvetikums entlang von Klüften stattfindet und nicht von der Fließporosität der Gesteinsmatrix abhängt.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Bandbreiten der Porositäten (Faktor 2 bis 4) viel kleiner sind als die Bandbreiten der hydraulischen Durchlässigkeiten (ca. Faktor 10 bis 50). Die Abhängigkeit der Fließporosität von den geologischen Randbedingungen (Tongehalt, Versenkungstiefe) ist gut bekannt und es liegen zahlreiche qualitativ hochwertige Messwerte vor. Somit können zuverlässige Werte für die Fließporosität bestimmt werden. Vor diesem Hintergrund sind aus Sicht des ENSI die Kenntnisse über die Fließporosität aller Wirt- und Rahmengesteine ausreichend für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT.

Den Einfluss der Porosität auf die Diffusion beurteilt das ENSI in Kapitel 9.

## 4.6 Hydraulische Durchlässigkeiten der Wirtgesteine

Die hydraulische Durchlässigkeit der Wirt- und Rahmengesteine ist für ihre hydraulische Barrierenwirkung besonders wichtig. Sie hängt von der Gesteinsbeschaffenheit (Tonmineralgehalt, Porengeometrie, Wechsellagerungen) und der geologisch-tektonischen Situation der vorgeschlagenen Standortgebiete (Versenkungsgeschichte, tektonische Überprägung) ab. Im Folgenden geht das ENSI vor allem auf Aspekte ein, die von Nagra und ENSI unterschiedlich beurteilt werden.

### Angaben der Nagra

#### *Opalinuston*

Für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons mit > 400 m Überdeckung wird ein Referenzwert von  $K_h=1\cdot 10^{-13}$  m/s und ein oberer Eckwert von  $K_h=5\cdot 10^{-13}$  m/s verwendet. Der Referenzwert entspricht Messungen in der Sondierbohrung Benken mit einer Überdeckung von Top Opalinuston von rund 540 m. Die geschätzten Bestwerte hydraulischer Tests (horizontale Durchlässigkeit bei einer Überdeckung von > 400 m) betragen  $1\cdot 10^{-14}$  m/s bis  $6\cdot 10^{-14}$  m/s.

Für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons mit < 400 m Überdeckung wird ein Referenzwert von  $K_h=5\cdot 10^{-13}$  m/s und ein oberer Eckwert von  $K_h=1.5\cdot 10^{-12}$  m/s verwendet. Die Werte sind konsistent mit Durchschnittswerten aus dem Felslabor Mont Terri, welches eine Gesteinsüberdeckung von 250 m bis 300 m hat.

Die Parameterwerte (inkl. Bandbreiten) für die hydraulische Durchlässigkeit der Wirtgesteine sind breiter gewählt als die gemessenen Werte aus Tiefbohrungen. Die Bandbreiten sind so

gross, dass sie sowohl die unterschiedliche Tiefenlage innerhalb eines Standortgebiets als auch mögliche Unterschiede zwischen einzelnen Standortgebieten abdecken.

Die Nagra leitet aus den Werten für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit über den im Labor gemessenen Anisotropiekoeffizienten die vertikalen Parameterwerte ab (Faktor 5).

#### *'Brauner Dogger'*

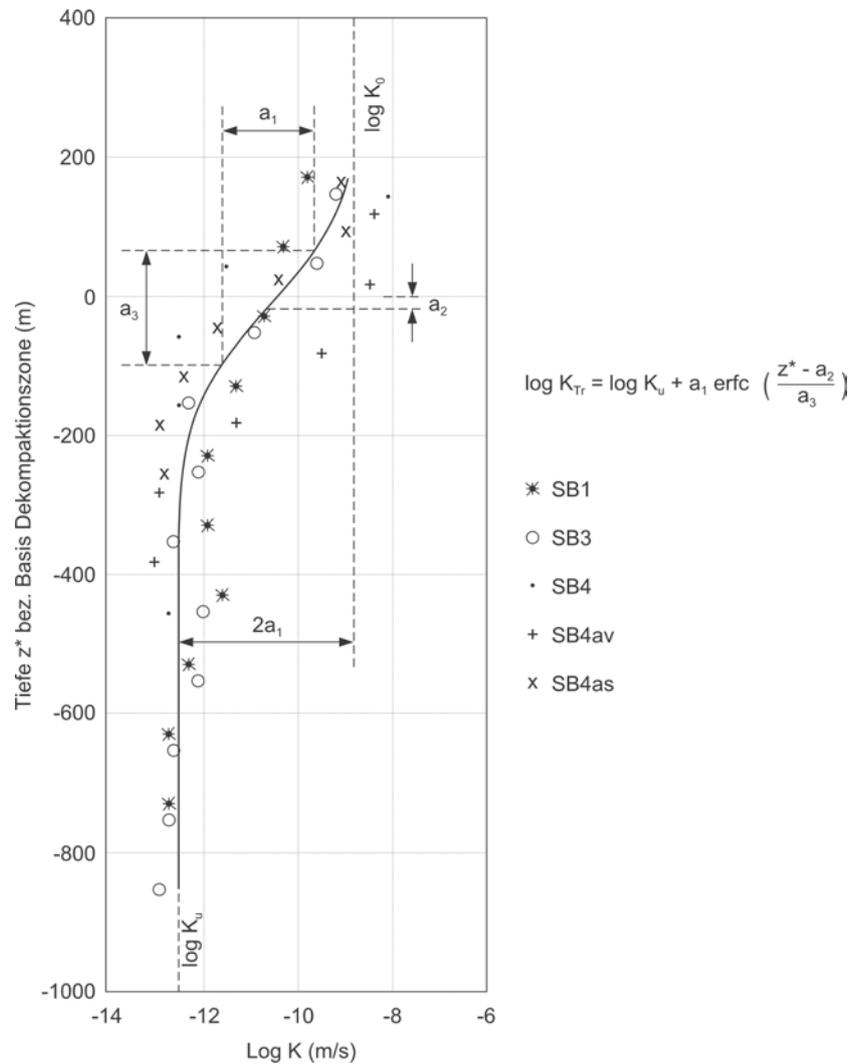
Die Lithologie der bis 30 m mächtigen Württembergica-Parkinsoni-Schichten ist dem Opalinuston so ähnlich, dass eine vergleichbare hydraulische Durchlässigkeit erwartet wird. Im Referenzfall werden die Sandkalkabfolgen als hydraulisch geringdurchlässig betrachtet. Die Werte der tonreichen Lagen und der Sandkalkabfolgen sowie der Anisotropiefaktor entsprechen den Referenzwerten des Opalinustons bei einer Überdeckung < 400 m. Die oberen Eckwerte der tonreichen Abfolgen entsprechen dem «What if?»-Fall des Opalinustons. Alternativ werden die Sandkalkabfolgen als geklüftetes Medium mit einer horizontalen Durchlässigkeit von  $K_h=1\cdot 10^{-10}$  m/s konzeptualisiert.

#### *Effinger Schichten*

Weil eine erhebliche Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Durchlässigkeit von sehr kalkig ausgebildeten Abfolgen erhöht sein kann, insbesondere diejenige der Gerstenhübel-Schichten, wird bereits im Referenzfall von einer (reduzierten) maximalen Transportlänge von 50 m in einem geringdurchlässigen Abschnitt der Effinger Schichten ausgegangen. Der Referenzwert  $K_h=1\cdot 10^{-11}$  m/s deckt die Ergebnisse von 18 Tests in den Bohrungen Oftringen, Küttigen und Gösgen ab (inkl. Maximalwert eines Tests in einer klüftigen Kalkbank in der Bohrung Oftringen). Weil die Wechsellagerung der Effinger Schichten viel ausgeprägter ist als im Opalinuston, wird ein grösserer Anisotropiekoeffizient (10 statt 5) angenommen.

#### *Mergel-Formationen des Helvetikums*

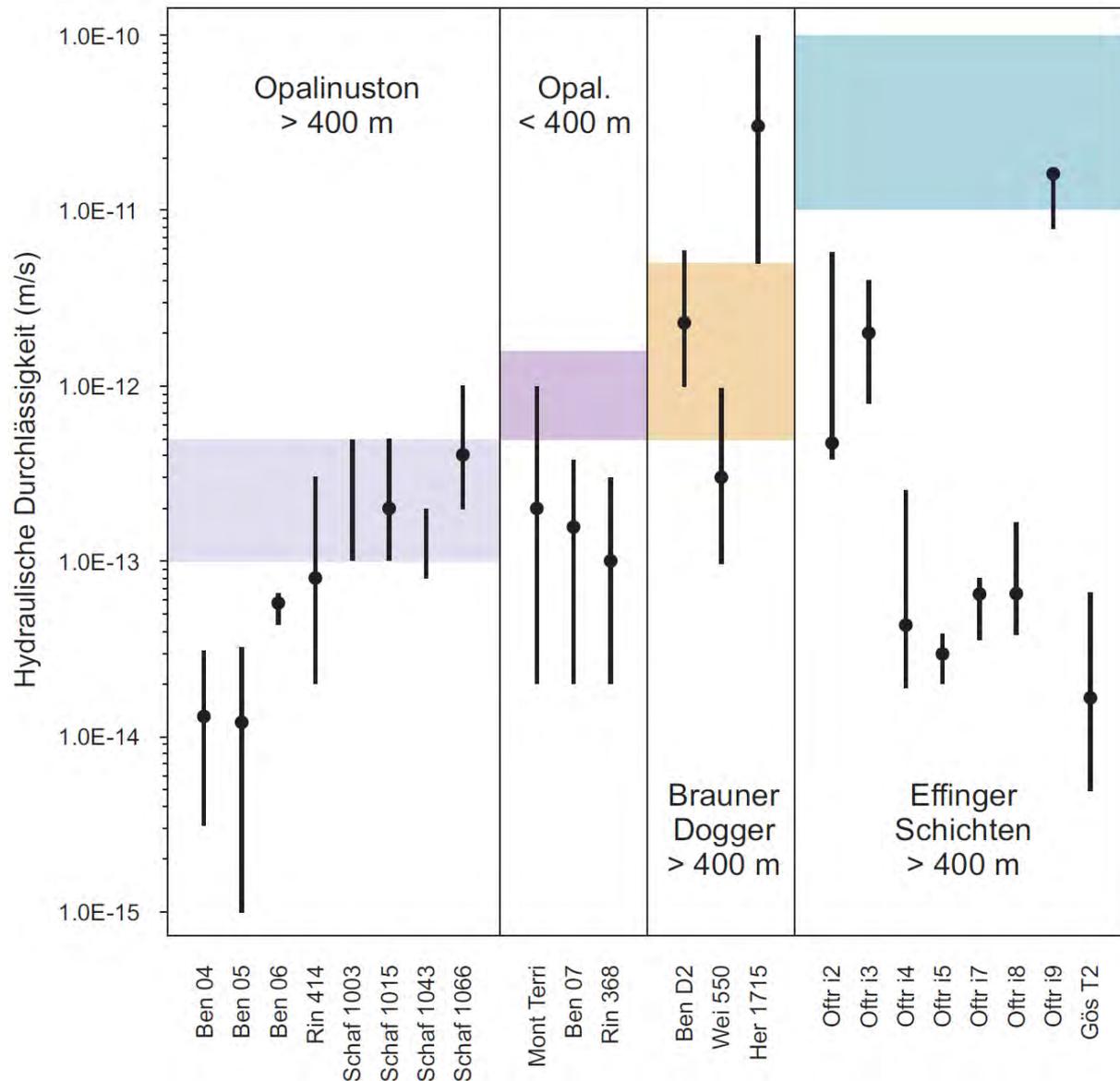
Die Nagra geht im Referenzfall von einer oberen und einer unteren Lagerebene aus. Bei der Festlegung der Referenzwerte für den Wellenberg (oberer Bereich etwa auf Kote Talebene:  $K_h=K_v=1\cdot 10^{-11}$  m/s, unterer Bereich:  $K_h=K_v=3\cdot 10^{-13}$  m/s) und der Bandbreiten (obere Eckwerte für den oberen Bereich:  $K_h=K_v=3\cdot 10^{-11}$  m/s, für den unteren Bereich:  $K_h=K_v=1\cdot 10^{-12}$  m/s) wendet die Nagra wie in der Geosynthese NTB 96-01 und der Sicherheitsanalyse (NTB 94-06) eine tiefenabhängige Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeiten an (Figur 4-2).



Figur 4-2: Tiefenabhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit im Standortgebiet Wellenberg bezogen auf die Tiefe der Dekompaktionszone (aus NTB 96-01, S. 338).

### Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die vorhandenen Messwerte hydraulischer Tests, mit welchen in homogenporösen Gesteinen die horizontale hydraulische Durchlässigkeit bestimmt wird, zusammengestellt und mit den Referenzwerten und oberen Eckwerten verglichen (Figur 4-3).



Figur 4-3: Vereinfachte Darstellung der Ergebnisse hydraulischer Tests in den Wirtgesteinen Opalinuston, 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten. Vertikale Balken: Umfang der Einzeldaten mit Punkt als abgeleitetem Mittelwert. Horizontale Farbbänder: Von der Nagra gewählte Bandbreiten (Referenzwert bis oberer Eckwert) für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit der tonreichen Abschnitte, d.h. ohne Berücksichtigung der Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger' bzw. der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten (Daten aus NTB 00-01, NTB 10-01 und NIB 94-69). Ben = Benken, Rin = Riniken, Schaf = Schafisheim, Wei = Weiach, Her = Herdern, Ofr = Oftringen, Gös = Gösigen.

### Opalinuston

Aus Sicht des ENSI hat die Nagra die oberen Eckwerte für den Opalinuston vernünftig gewählt. Die oberen Eckwerte bestimmen bei sonst gleichen Parametern die maximalen Dosen, die mit den Testrechnungen ermittelt wurden (vgl. Kapitel 11). Dadurch ist ein belastbarer Vergleich verschiedener Standortgebiete möglich.

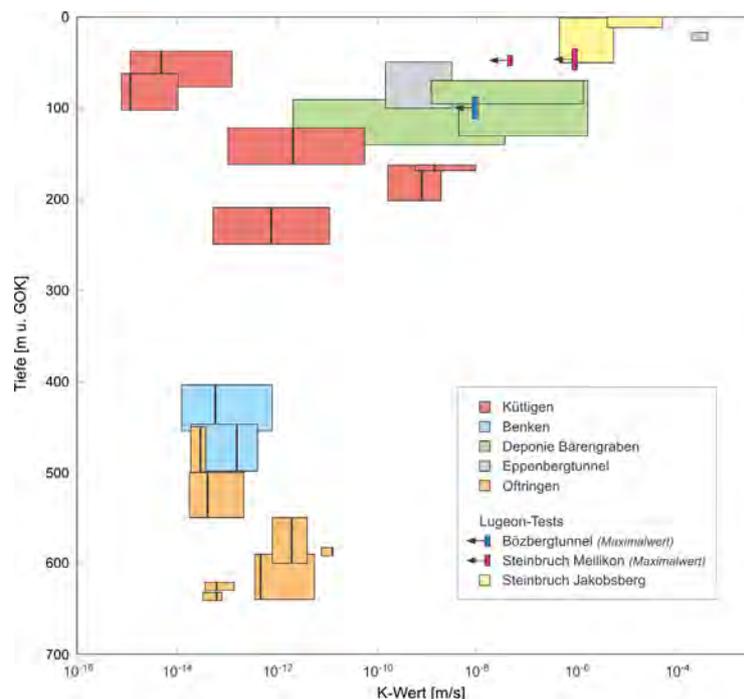
Die von der Nagra vorsichtig gewählten Referenzwerte (Figur 4-3) bestimmen die Untergrenze der Dosisintervalle und wirken sich nicht auf den Vergleich verschiedener Standortgebiete aus.

### 'Brauner Dogger'

Die Nagra argumentiert für den 'Braunen Dogger' mit Analogieschlüssen zum Opalinuston. Aus Sicht des ENSI sollten die oberen Eckwerte die Resultate der zuverlässigen hydraulischen Tests abdecken, bis weitere, standortspezifische Kenntnisse eine Verkleinerung der Bandbreiten erlauben (Figur 4-3). Zusätzliche Messwerte zur hydraulischen Durchlässigkeit können aus der Geothermiebohrung Schlattingen erwartet werden, wo ein umfangreiches Testprogramm vorgesehen ist (NAB 10-25).

### Effinger Schichten

Für die Effinger Schichten trifft die Nagra für den Referenzwert der horizontalen hydraulischen Durchlässigkeit mit  $1 \cdot 10^{-11}$  m/s eine hinsichtlich der Sicherheit konservative Annahme, denn mit einer Ausnahme (Oftringen, Intervall 9) wiesen alle Tests in einer Tiefe > 300 m unter Terrain geringere hydraulische Durchlässigkeiten auf (siehe auch Figuren 4-3 und 4-4).



Figur 4-4: Hydraulische Durchlässigkeit der Effinger Schichten (aus NTB 08-04, S. 162).

Auch der obere Eckwert ist mit  $1 \cdot 10^{-10}$  m/s vorsichtig gewählt, um den Ungewissheiten bezüglich des Auftretens von Kalkbankabfolgen Rechnung zu tragen. In der Bohrung Oftringen wurden diese Kalkbankabfolgen nicht angetroffen. Sie können aber im Standortgebiet Jura-Südfuss aufgrund der lateralen Variabilität dieser Schichten nicht ausgeschlossen werden. Daher ist dieses konservative Vorgehen der Nagra für das ENSI nachvollziehbar.

Für das ENSI ist der von der Nagra für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten gewählte Ansatz vereinfacht, mit den von der Nagra ergänzenden Untersuchungen für Etappe 2 SGT aber genügend.

#### *Forderung 5*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT die Referenzwerte der hydraulischen Durchlässigkeiten aus Daten und/oder Analogien standortspezifisch herzuleiten. Die oberen Eckwerte der hydraulischen Durchlässigkeiten sollen mindestens alle unter vergleichbaren Randbedingungen durchgeführten hydraulischen Tests abdecken.

#### *Mergel-Formationen des Helvetikums*

Das ENSI hat den Referenzwert der hydraulischen Durchlässigkeit des oberen Lagerbereichs im Standortgebiet Wellenberg, welcher der Lagerebene aus dem Rahmenbewilligungsgesuch von 1994 (GNW 1994) entspricht, in seinem Gutachten HSK 30/9 als plausibel beurteilt.

Der untere Lagerbereich (unterhalb der Sohle des Engelbergertals) ist nach NTB 96-01, Figur 7.4-5 weniger von Dekompaktion betroffen. Ab einer Tiefe von ca. 200 m unterhalb der Dekompaktionszone kann das ENSI den Referenzwert aus dem Parametermodell in Figur 4-2 ( $K_v$ ) nachvollziehen. Das ENSI erwartet, dass die Nagra die genaue Lage des unteren Bereichs in Etappe 2 SGT angibt.

Die oberen Eckwerte sind auf Basis der hydraulischen Tests nachvollziehbar (Figur 4-2). Der eigentliche Nachweis kann aber erst mit dem Bau eines Sondierstollens erbracht werden. Sollten höhere Durchlässigkeiten vorgefunden werden, so müsste die Sicherheitsanalyse zeigen, wie weit diese höheren Werte noch zulässig sind. Allenfalls müsste das Endlager oder Teile davon tiefer angelegt werden (HSK 33/9).

## **4.7 Einfluss der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit**

### **Angaben der Nagra**

Die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund von Dekompaktionseffekten (Entlastung von überkonsolidierten Gesteinen in Oberflächennähe) ist durch zahlreiche Bohrungen belegt, hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist in den verschiedenen Wirtgesteinen unterschiedlich ausgebildet. Die Beobachtungen sind konsistent mit unabhängigen hydrochemischen Evidenzen. Am geringsten wirken sich Entlastungseffekte im Opalinuston aus (signifikant bis in Tiefen von einigen Dekametern, geringfügig bis max. 200 m), am stärksten in den Mergel-Formationen des Helvetikums (je nach Topographie bzw. Erosionsgeschichte bis 600 m).

In den Effinger Schichten wurden bisher hydraulische Entlastungseffekte bis in Tiefen von 200 m nachgewiesen. Neue Erfahrungen in Erdwärmesondenbohrungen zeigen Wasserzutritte bis 244 m Tiefe. Die Zutritte unterhalb 200 m liegen im Bereich von Kalkbankabfolgen oder im Übergangsbereich Geissberg-Schichten – Effinger Schichten.

Für den 'Braunen Dogger' fehlen direkte Beobachtungen bezüglich Dekompaktionseffekten. Aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit wurden und werden weiterhin analoge verschärfte Anforderungen wie für die Effinger Schichten verwendet (Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > 300 m unter Terrain), was tendenziell als eher pessimistisch bewertet wird.

Die vorhandenen Durchlässigkeits-Tiefen-Profile werden für die Beurteilung der erwarteten Dekompaktionseffekte als genügend beurteilt, um die Bedeutung der Dekompaktion zu analysieren.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI erachtet die heute vorhandenen Kenntnisse des Einflusses der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit für den Opalinuston (zahlreiche Daten aus verschiedenen Gebieten), die Effinger Schichten (zahlreiche Daten für das in Frage kommende Standortgebiet am Jura-Südfuss) und die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg (Untersuchungen zum Rahmenbewilligungsgesuch, vgl. Figur 4-2) als ausreichend für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT.

Für den 'Braunen Dogger' fehlen vergleichbare Daten. Die von der Nagra verwendete pessimistische Einschätzung (Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > 300 m unter Terrain) bietet den notwendigen Schutz des Wirtgesteins vor Dekompaktionseffekten (ENSI 33/070).

#### *Forderung 6*

Für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT trägt der 'Braune Dogger' auch als Rahmengestein in geringeren Tiefen zur Barrierenwirkung bei. Die Nagra hat den Einfluss der Dekompaktion auch für die Rahmengesteine zu berücksichtigen.

## **4.8 Verhalten der Wirtgesteine bezüglich Gas**

### **Angaben der Nagra**

Die Gasbildung und deren Auswirkung auf die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers für BE, HAA, LMA und SMA im Opalinuston wurde im Rahmen des Projekts Entsorgungsnachweis, respektive im NTB 08-07, detailliert untersucht. Dazu konnte neben einem Gastest in der Bohrung Benken vor allem auf Untersuchungen im Felslabor Mont Terri abgestützt werden. Diese Untersuchungen sowie Laborarbeiten und Studien zum Gastransport im Opalinuston wurden weiter geführt. Es wurde aufgezeigt, durch welche Prozesse das Gas durch das Wirtgestein transportiert wird und dass diese Prozesse die Langzeit-Barrierenwirkung des Wirtgesteins nicht signifikant beeinträchtigen. Für realistische Gasbildungs-raten wird erwartet, dass die Gasfreisetzung über klassischen Zweiphasenfluss (vernachlässigbare Deformation des Porenraums) erfolgt; eine allfällige dilatanzkontrollierte Gasausbreitung (pathway dilation: Zweiphasenfluss mit mikroskopischer Deformation des Porenraums) bleibt räumlich beschränkt. Die Bildung von Gasfracs kann bei den betrachteten Gasbildungs-raten ausgeschlossen werden. Es wurde auch gezeigt, dass das Verdrängen von Porenwasser mit Radionukliden als Folge der Gasbildung die Langzeitsicherheit

nicht signifikant beeinflusst. Auch der Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase stellt die Langzeitsicherheit nicht in Frage.

Die vorhandenen Berechnungen zeigen, dass die Auswirkungen der Gasbildung (keine signifikante Änderung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins, geringe Dosen als Folge der Verdrängung von Nahfeldporenwässern bzw. durch Transport von volatilen Radionukliden in der Gasphase) klein sind und in den Testrechnungen nicht explizit zu berücksichtigen sind.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI hat in Etappe 1 SGT die Auswirkungen der Gasbildung und des -transports aus einem SMA-, respektive HAA-Lager kommentiert (ENSI 33/070). Es kam zum Schluss, dass die Konzepte zur Beherrschung der gasinduzierten Phänomene in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung stufengerecht vertieft werden müssen. Dabei sind auch in NTB 08-07 weitgehend ausgeklammerte Fragen wie bauliche Realisierbarkeit, Langzeitstabilität, Kompatibilität mit den generischen Sicherheitsbetrachtungen und die Konsistenz der verschiedenen Annahmen für Materialien, deren Eigenschaften, Einbauzustände etc. zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Realisierung eines SMA- oder HAA-Lagers sind deshalb von der Nagra die wirtgesteinsspezifischen relevanten Prozesse zu untersuchen und die für eine Modellierung des Gastransports nötigen Parameter zu bestimmen.

Die Überprüfung der verwendeten Konzepte und der Resultate der Nagra durch eigene Berechnungen des ENSI zu Etappe 1 SGT haben bestätigt, 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. Entsprechende Beurteilungen für ein HAA-Lager in Opalinuston liegen auch aus dem Entsorgungsnachweis vor (HSK 35/99). Für das Wirtgestein Opalinuston wird der vorhandene Kenntnisstand daher als ausreichend für Etappe 2 SGT angesehen.

Die Nagra hat sich bezüglich Gasbildung und Gastransport in ihren Unterlagen zur Etappe 1 SGT darauf abgestützt, dass eine Betrachtung der Prozesse des Gastransports im Opalinuston aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit abdeckend für alle anderen Wirtgesteine ist. Das ENSI hat diese Betrachtungsweise in Etappe 1 SGT beurteilt und akzeptiert. Für Etappe 2 SGT ist eine Verfeinerung der Betrachtung im Sinne eines sicherheitstechnischen Vergleichs der verschiedenen Wirtgesteinsoptionen anzustreben. Bei einer Weiterverfolgung von SMA-Lagerprojekten in den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger', den Effinger Schichten und den Mergel-Formationen des Helvetikums in Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI, dass die Nagra für diese Wirtgesteine experimentell die Gaseintrittsdrücke in den verschiedenen Lithologien und entlang der Lithologiegrenzen bestimmt, um detaillierte Gastransportmodellierungen für den gesamten Wirtgesteinskörper durchführen zu können.

Die Nagra beschreibt für den Gastransport im Opalinuston vier konzeptuell vorkommende Prozesse (Diffusion, Zweiphasen-Fluss, Dilatanz, Bildung von Makrorissen, vgl. NTB 02-03). Das ENSI zweifelt, ob der Prozess der Dilatanz (pathway dilation) in den Sandkalken des 'Braunen Doggers' sowie den Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten wirksam ist. In den sand- oder kalkreicheren Lagen treten vermehrt vertikale Klüfte auf. Bezüglich deren Funktion beim Gastransport sind auch die Trennflächen zwischen lithologisch unterschiedlichen

Lagen zu betrachten. In den Mergel-Formationen des Helvetikums sind die Geometrien der unterschiedlichen Lithologien und die daraus resultierenden potenziellen Gaswege aufgrund der starken Tektonik komplex. Für 'Braunen Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums ist darüber hinaus unklar, inwiefern das von der Nagra für den Gastransport herangezogene EGTS («engineered gas transport system») relevant ist und allenfalls durch wirtgesteinsspezifische Prozesse (z.B. erhöhte Wasserflüsse entlang der Sandkalkbänke) beeinflusst wird. Dazu erwartet das ENSI, dass die Nagra für die verschiedenen Lithologien des 'Braunen Doggers' (Tone und Sandkalke), der Effinger Schichten (Mergel und Kalkmergel) und Mergel-Formationen des Helvetikums (Mergel und zerscherte Kalkbänke) entsprechende Gastransportkonzepte entwickelt und die Konzepte anhand von Experimenten abstützt.

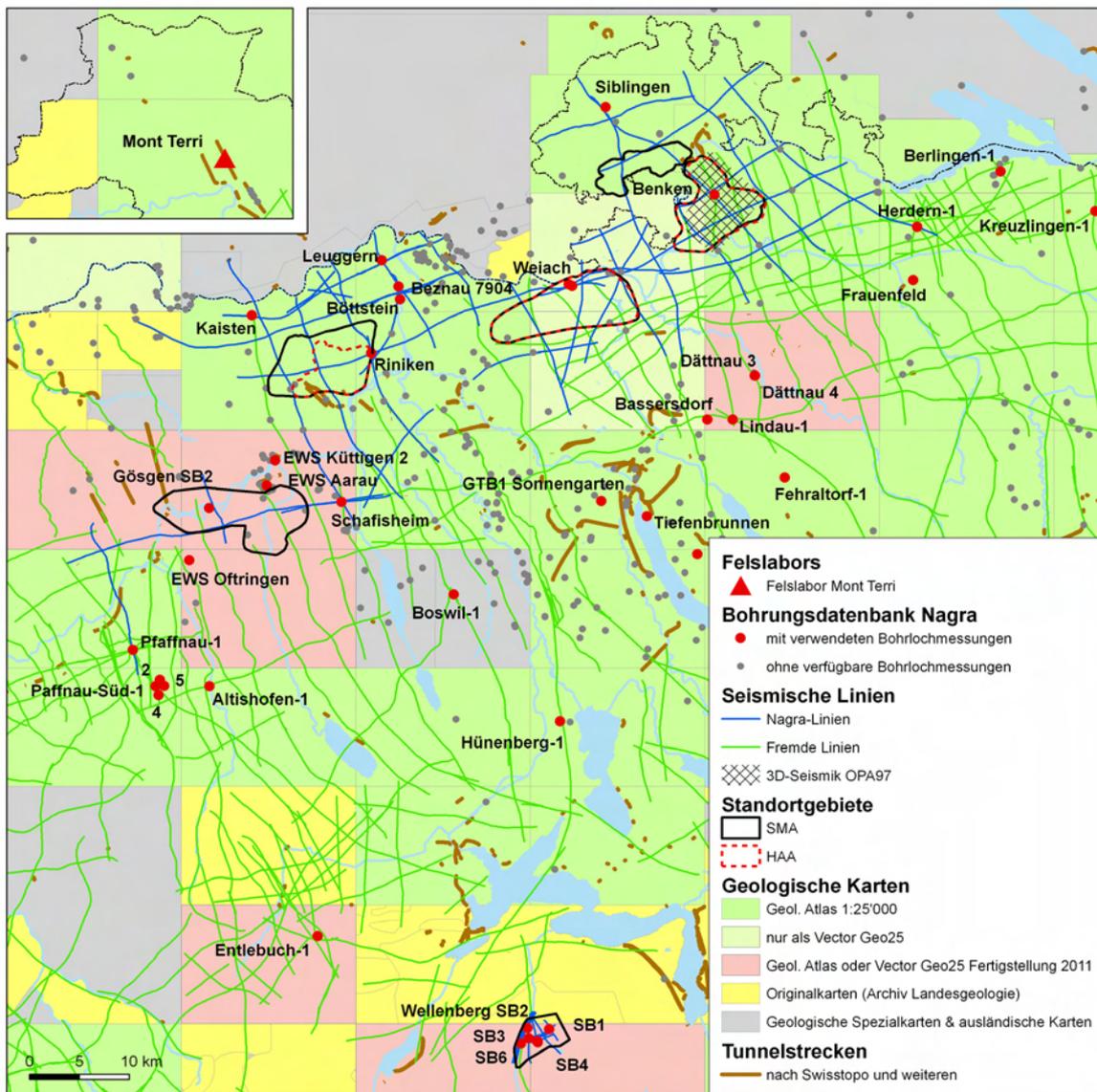
*Forderung 7*

Im Sinne der stufengerechten Vertiefung der Kenntnisse hat die Nagra für Etappe 2 SGT wirtgesteinsspezifische Konzepte zum Gastransport in den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums vorzulegen und zu zeigen, wie das «engineered gas transport system» durch wirtgesteinsspezifische Prozesse beeinflusst wird.

## 5 Geologisch-tektonische Verhältnisse der Standortgebiete

### Angaben der Nagra

Im NTB 10-01 (Kapitel 4) fasst die Nagra den geologischen Kenntnisstand über Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in den vorgeschlagenen Standortgebieten sowie Informationen zu Nutzungskonflikten und ausgewählten Zustandsparametern zusammen. Sie stützt sich dabei auf geologische Karten, seismische Daten, Bohrungen und Tunnels sowie auf umfangreiche publizierte oder unpublizierte Fachliteratur (Figur 5-1).



Figur 5-1: Übersicht der vorhandenen Datenquellen (aus NTB 10-01, S. 45).

Für alle Standortgebiete existieren geologische Karten (meist im Massstab 1:25 000). Sie geben einerseits Hinweise auf tektonische Störungen, und andererseits lassen sich ausge-

hend vom Ort des Ausstreichens einzelner Schichtgrenzen Angaben zur Tiefenlage dieser und von darunter liegenden Schichten ableiten. Besonders aussagekräftig sind die geologischen Karten in Bereichen, in denen mesozoische oder frühtertiäre Schichten an der Oberfläche aufgeschlossen sind (Standortgebiete Wellenberg, Bözberg und Südranden, sowie Teile des Standortgebiets Jura-Südfuss). Im Bereich der Molasse und dort, wo an der Oberfläche quartäre Schichten anstehen (Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren) ergeben sich aus den Kartenwerken hingegen kaum Informationen zur Geometrie der mesozoischen oder frühtertiären Schichten.

Alle Standortgebiete in der Nordschweiz (Südranden, Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren, Bözberg und Jura-Südfuss) werden durch ein Netz von seismischen 2D-Linien durchzogen (Figur 5-1). In oder in unmittelbarer Nähe aller Standortgebiete gibt es Tiefbohrungen, an welchen die Tiefenlage der seismischen Reflektoren kalibriert wurde. Neben Angaben zur Tiefenlage ermöglichen die seismischen Daten das Kartieren von grösseren Störungen, und sie geben auch ein Bild über Lagerungsverhältnisse der Schichten. Im Gebiet Zürich Nord-Ost existiert zusätzlich eine hochauflösende 3D-Seismik. Diese erlaubt eine genauere Kartierung der Schichtgrenzen und Störungen und macht eine Detektion von Störungen mit kleinen Versätzen möglich. Im Standortgebiet Wellenberg liefern die vorhandenen Seismikdaten wenige Informationen. Hier basiert das Wissen im Wesentlichen auf der Oberflächengeologie sowie auf den Ergebnissen mehrerer vertikaler und geneigter Tiefbohrungen.

Daneben enthält die Fachliteratur viele Hinweise betreffend Geometrie und Tektonik (Daten und Interpretation mit Hilfe von geologischen Konzepten), welche bereits in Etappe 1 SGT diskutiert wurden und auch in Zukunft beigezogen werden (unter Berücksichtigung neuerer Arbeiten und Konzepte).

Für die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen in Etappe 2 SGT evaluiert die Nagra den für die provisorischen Sicherheitsanalysen erforderlichen geologischen Kenntnisstand im Wesentlichen anhand folgender Prozesse bzw. Parameter, die für die Sicherheit bzw. bautechnische Machbarkeit relevant sind:

- PG-1 Tiefenlage im Hinblick auf erosive Freilegung
- PG-2 Glazial übertiefte Felsrinnen
- PG-3 Tiefenlage im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion
- PG-5 Mächtigkeit
- PG-32 Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins
- PG-33 Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins
- PG-34 Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie
- PB-2 Gebietsbegrenzende geologische Elemente
- PB-3 Anordnungsbestimmende geologische Elemente
- PB-5 In-situ-Temperatur
- PB-6 In-situ-Gebirgsspannungen

Für Etappe 2 SGT will die Nagra in allen Standortgebieten die Tiefenlage und Mächtigkeit des Wirtgesteins sowie Lage, Orientierung, Frequenz und Kinematik von Störungen durch

verschiedene Methoden überprüfen. Die ergänzenden Untersuchungen umfassen für die Standortgebiete in der Nordschweiz insbesondere eine neue Datenaufarbeitung und Auswertung der Reflexionsseismik, die Ergänzung und Neuauswertung der Gravimetriedaten, die Auswertung von Fernerkundungsdaten (u.a. Lineamentstudien und Auswertung von LIDAR-Daten), kinematische Bilanzierungen sowie strukturgeologische Feldbegehungen. Weiter ist geplant, in einer die HAA-Gebiete Bözberg und Nördlich Lägeren umfassenden Region für Etappe 2 ein zusammenhängendes Netz von zusätzlichen 2D-Seismiklinien zu messen (vgl. NAB 11-04). Die Messungen dienen dazu, für das HAA-Lager die regionale tektonische Situation im Hinblick auf die Bewertung geometrischer Aspekte für die Anordnung der HAA-Lagerstollen detaillierter zu erfassen. Weiter werden die Messungen auch den Kenntnisstand bezüglich Verbreitung glazial übertiefer Felsrinnen verbessern sowie zur Planung und Fokussierung der geplanten 3D-Seismik verwendet.

Die geologischen Profilschnitte im Standortgebiet Wellenberg sollen aufgrund der neuen tektonischen Karte des Helvetikums überarbeitet und im 3D-Modell Wellenberg berücksichtigt werden.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI beurteilt die Angaben in NTB 10-01 zum geologischen Kenntnisstand bezüglich Geometrie und Strukturen des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches in den vorgeschlagenen Standortgebieten als nachvollziehbar und plausibel. Weit ausführlichere geologische Angaben finden sich für jedes Standortgebiet in den Nagra Technischen Berichten NTB 08-03 und NTB 08-04, welche vom ENSI im Rahmen seiner Begutachtung des Vorschlags geologischer Standortgebiete Etappe 1 SGT überprüft und als nachvollziehbar und vollständig beurteilt wurden (ENSI 33/070).

Für die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT orientiert sich die Nagra an den für die Sicherheit relevanten Prozessen und Parametern, wie sie bereits in Etappe 1 SGT anhand sicherheitstechnischer Kriterien und Indikatoren in den generischen Sicherheitsbetrachtungen dargelegt wurden. Das ENSI beurteilt die zum geologischen Kenntnisstand aufgeführten Prozesse und Parameter als korrekt und vollständig. Das Vorgehen der Nagra erfüllt die in ENSI 33/075 festgehaltenen Vorgaben.

Im Folgenden geht das ENSI im Detail auf die einzelnen Standortgebiete ein und prüft, ob mit den ergänzenden geologischen Untersuchungen ausreichend belastbare Ergebnisse bezüglich Geometrie und Strukturen erwartet werden dürfen, wie sie für die provisorischen Sicherheitsanalysen gefordert werden. Belastbar heisst, dass die Aussagen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Ungewissheiten in Daten und Prozessen gültig sind.

#### *SMA-Standortgebiet Südranden*

Das Standortgebiet Südranden ist durch die detaillierten geologische Karten von Hantke (1967) und Hofmann (1981) sowie durch die geologische Karte der zentralen Nordschweiz (NTB 84-25) hinsichtlich der oberflächennahen Verhältnisse gut bekannt. Es gibt im Kartenbild keine Störung, und einige kleine aufgelassene Steinbrüche im Malmkalk zeigen kaum Deformation. Seismische 2D-Profile der Nagra-Messkampagne 1991 von sehr guter Auflösung und kalibriert an vier Referenzbohrungen (Siblingen, Benken, Weiach, Herdern) bele-

gen die ruhigen Lagerungsverhältnisse im Standortgebiet (Tafeljura). Diese Daten, die geplante Neuprozessierung älterer 2D-Seismiklinien der Erdölindustrie und der Einbezug der umfangreichen geologischen Bohrlochinformationen der nahe gelegenen Bohrung Benken erlauben zuverlässige Aussagen über Tiefenlage, Mächtigkeit und das Platzangebot für ein SMA-Lager im Opalinuston im Standortgebiet Südranden.

Bezüglich Verteilung und Geometrie glazial übertiefter Felsrinnen in der weiteren Umgebung des Standortgebiets plant die Nagra eine Überarbeitung der Felsoberflächenkarte unter Berücksichtigung einer ergänzten Bohrungsdatenbank und neu ausgewerteter Seismik- und Gravimetriedaten. Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen für Etappe 2 SGT als zielführend und ausreichend, um die bezüglich des Betrachtungszeitraums von 100 000 Jahren langfristige Entwicklung unter Berücksichtigung der nördlich bzw. westlich an das Standortgebiet angrenzende, geringfügig glazial übertieften Klettgau-Rinne bzw. das Wangental in die Sicherheitsbetrachtungen einbeziehen zu können.

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die von der Nagra dargestellten verfügbaren geologischen Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen der Nagra ausreichen, um für das Standortgebiet Südranden provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich für ein SMA-Lager durchführen zu können.

#### *SMA/HAA-Standortgebiet Zürich Nord-Ost*

Das Standortgebiet Zürich Nord-Ost (ehemals «Zürcher Weinland») ist durch detaillierte geologische Karten (Hantke 1967; Hofmann 1967; Hübscher 1961; NTB 84-25) hinsichtlich der oberflächennahen Verhältnisse gut untersucht. Auf den geologischen Karten sind im Standortgebiet keine Störungen verzeichnet. Seismische 2D-Profile der Nagra-Messkampagne 1991 und die hochauflösende 3D-Seismik, kalibriert an der Referenzbohrung Benken, belegen die erwarteten ruhigen Lagerungsverhältnisse im Standortgebiet (Tafeljura). Sie lassen nur im Bereich der Nordostgrenze des Standortgebiets eine geringe tektonische Überprägung erkennen (Wildensbucher Flexur Nagra 2004; NTB 08-04). Insgesamt erlauben die vorgelegten geologischen Daten zuverlässige Aussagen über Tiefenlage, Mächtigkeit und das Platzangebot für ein SMA- und ein HAA-Lager in den jeweils vorgeschlagenen Wirtgesteinen des Standortgebiets ('Brauner Dogger' bzw. Opalinuston).

Glaziale Tiefenerosion betrifft das Standortgebiet potenziell mehr als andere Gebiete, da der südlichste Teil des Standortgebiets in den Bereich der von der Thurtal-Rinne nach West-Nordwest abzweigenden, leicht übertieften Marthalen-Rinne hineinreicht. Das Prozessverständnis der glazialen Tiefenerosion ist deshalb aus Sicht des ENSI stufengerecht weiter zu vertiefen. Die von der Nagra dazu vorgesehenen ergänzenden Untersuchungen hinsichtlich Verbreitung, Geometrie, Sedimentinhalt und Entstehungsgeschichte dieser Rinnen beurteilt das ENSI als zielführend.

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die von der Nagra dargestellten verfügbaren geologischen Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen der Nagra ausreichen, um für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich für SMA- und HAA-Lager durchführen zu können.

### *SMA/HAA-Standortgebiet Nördlich Lägeren*

Das Standortgebiet Nördlich Lägeren ist durch detaillierte geologische Karten (Hantke 1967; NTB 84-25) hinsichtlich der oberflächennahen Verhältnisse gut bekannt. Auf den Karten sind innerhalb des Standortgebiets keine relevanten Störungen beobachtet worden. Seismische 2D-Profile der Nagra-Messkampagne 1991, kalibriert an der Referenzbohrung Weiach, sowie ältere Seismiklinien der Erdölindustrie zeigen jedoch, dass das zur Vorfaltenzone gehörende Standortgebiet tektonisch teilweise stärker überprägt und zergliedert ist als das nord-östlich im Tafeljura liegende Standortgebiet Zürich Nord-Ost. Die seismischen Profile zeigen lokal diffuse Bereiche mit Anzeichen kompressiver und transpressiver Strukturen, die die Platzierung eines Lagers einschränken könnten. Da die Qualität der Auswertung der älteren Erdölseismik beschränkt ist, hat die Nagra eine Neuaufbereitung und Neuauswertung dieser Daten in Auftrag gegeben.

Für eine detailliertere Auflösung der tektonischen Strukturen im HAA-Standortgebiet Nördlich Lägeren plant die Nagra ergänzende zusätzliche Seismik-Messlinien mit höherer Auflösung, die mit dem 2D-Seismik-Messnetz des Standortgebiets Bözberg verbunden werden (NAB 11-04). Gemäss Auskunft der Nagra gehören dazu auch die notwendigen Aufzeitbohrungen zur Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten der Quartärbedeckung (NAB 11-04). Das ENSI erachtet diese zusätzlichen seismischen Messungen für das Verständnis der tektonischen Verhältnisse als notwendig und ist mit dem von der Nagra dargelegten Vorgehen einverstanden. Durch die Bohrung Weiach ist die geologische Information im Standortgebiet zuverlässig bekannt und die Kalibrierung der neuen Seismik sichergestellt.

Nicht abschliessend geklärt ist aus Sicht des ENSI, inwiefern im 'Braunen Dogger' über die Ost-West-Erstreckung des Standortgebiets sicherheitsrelevante Fazieswechsel stattfinden. Gemäss NTB 08-04, Figur 4.3-11, liegt der westlichste Teil des Standortgebiets Nördlich Lägeren bereits im Bereich der Übergangsfazies, d.h. es muss damit gerechnet werden, dass massigere Sandkalke vorkommen. Die Nagra hat in NTB 10-01 für die westlichen und östlichen Bereiche des SMA-Standortgebiets keine unterschiedliche Konzeptualisierung vorgenommen.

#### *Forderung 8*

Die Nagra hat aufgrund der bis zur Etappe 2 SGT noch erfolgenden Untersuchungen zu prüfen und darzulegen, inwiefern eine unterschiedliche Konzeptualisierung des 'Braunen Doggers' für den westlichen und östlichen Teil des Standortgebiets Nördlich Lägeren erfolgen muss.

Das ENSI empfiehlt der Nagra für Etappe 3 SGT bei der Weiterverfolgung der Option 'Brauner Dogger' für ein SMA-Lager im westlichen Standortgebiet Nördlich Lägeren eine auf den Westen des Standortgebiets bezogene Eichbohrung, die die fazialen Wechsel im 'Braunen Dogger' genauer abklärt.

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die vorgelegten geologischen Informationen zusammen mit den geplanten weiteren geologischen Untersuchungen und dem ergänzenden 2D-Seismik-Messnetz ausreichen, um belastbare Aussagen über Tiefenlage, Mächtigkeit und das Platzangebot für ein SMA- und ein HAA-Lager zu liefern und für das Standortgebiet Nördlich Lägeren provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

### *SMA/HAA-Standortgebiet Bözberg*

Das Standortgebiet Bözberg ist durch detaillierte geologische Karten von Diebold et al. 2006 und NTB 84-25 hinsichtlich der oberflächennahen Verhältnisse sehr gut bekannt. Es gibt im Kartenbild zwei relevante Störungen, die die Grenzen des Standortgebiets definieren, im Süden die Hauptüberschiebung des Faltenjuras, im Norden die Mandacher Überschiebung. Seismische 2D-Profile der Nagra-Messkampagne 1982–1983, kalibriert an der Referenzbohrung Riniken am Ostrand des Standortgebiets, belegen eine geringe tektonische Überprägung des Standortgebiets durch den alpinen Fernschub (Vorfaltenzone NTB 08-04). Danach können ungestörte Bereiche von Bereichen mit Anzeichen erhöhter tektonischer Überprägung unterschieden werden. Das ENSI geht davon aus, dass kleinere tektonische Störungen im Opalinuston in Form von Aufschiebungen oder Rampenstrukturen vorhanden sein können. Mit der seitens Nagra in Arbeit befindlichen Neuaufbereitung und Neuauswertung der seismischen Daten werden tektonische Störungen besser zu beurteilen sein. Für eine detailliertere Auflösung der tektonischen Strukturen im HAA-Standortgebiet Bözberg plant die Nagra ergänzende zusätzliche Seismik-Messlinien mit höherer Auflösung, die mit dem 2D-Seismik-Messnetz des Gebiets Nördlich Lägeren verbunden werden (NAB 11-04). Dazu sind auch die notwendigen Aufzeitbohrungen zur Bestimmung der seismischen Geschwindigkeiten der Quartärbedeckung eingeplant.

Da das HAA-Standortgebiet Bözberg von den HAA-Gebieten die geringste Gesteinsüberdeckung aufweist und das Gebiet wegen der hügeligen Topographie das grösste Potenzial für lokale Erosionsvorgänge hat, plant die Nagra, die langfristige Landschaftsentwicklung des Bözberggebiets mit numerischen Modellen zu untersuchen. Das ENSI begrüsst dieses Vorgehen, eine detailliertere Beurteilung erfolgt in Kapitel 6.

In seiner Beurteilung kommt das ENSI zusammenfassend zum Schluss, dass die vorgelegten Daten zusammen mit den geplanten weiteren geologischen Untersuchungen und dem ergänzenden 2D-Seismik-Messnetz ausreichend belastbare Aussagen über Tiefenlage, Mächtigkeit und das Platzangebot für ein SMA- und ein HAA-Lager im Standortgebiet Bözberg liefern, um provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

### *SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss*

Das Standortgebiet Jura-Südfuss liegt in der östlichen Subjurassischen Zone und ist tektonisch teilweise stark überprägt. Der Opalinuston im nordwestlichen Teil des Standortgebiets weist nordwestgerichtete flache Auf- und Überschiebungen und Rücküberschiebungen auf (NTB 08-04, Beilage 5.2-11). Wie im ENSI-Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete (ENSI 33/070) dargelegt, beurteilt das ENSI wegen der in der Subjurassischen Zone zu erwartenden stärkeren tektonischen Zergliederung das Platzangebot untertags in diesem Standortgebiet nur als bedingt günstig. Die Effinger Schichten sind im Bereich der Born-Engelberg-Antiklinale durch steile Störungen, meist Aufschiebungen, gestört. Diese Struktur scheint gegen Osten zu enden, aber es gibt im entscheidenden Abschnitt des Bereichs mit Effinger Schichten keine quer zur Born-Engelberg-Antiklinale verlaufende Seismiklinie, so dass das östliche Ende der tektonischen Überprägung durch die Antiklinale nicht bekannt ist (NTB 08-04, S. 342).

Das ENSI teilt die Einschätzung der Nagra, dass die bisherigen reflexionsseismischen Ergebnisse auf Bereiche geringer tektonischer Überprägung zwischen auslegungsbestimmenden Störungen hindeuten und die Lagerkavernen eines SMA-Lagers entsprechend flexibel ausgelegt und platziert werden können (NTB 08-04). Durch die Neuauswertung der seismischen Daten, wie sie die Nagra gegenwärtig durchführt, sollen die tektonischen Strukturen besser zu beurteilen sein.

Das ENSI kam nach der Beurteilung der Datenlage in Etappe 1 SGT zum Schluss, dass der Verlauf der Born-Engelberg-Antiklinale im Standortgebiet Jura-Südfuss nicht geklärt ist. Die Nagra hat in ihren Unterlagen zu Etappe 2 SGT deshalb den Fall zu berücksichtigen, bei dem diese Antiklinale quer durch die Gebiete mit Effinger Schichten in günstiger Tiefenlage verläuft. Darzulegen sind insbesondere die Platzverhältnisse, die Wasserfliesswege und die notwendigen Sicherheitsabstände beim Bau eines SMA-Lagers in den Effinger Schichten.

#### *Forderung 9*

Die Nagra hat die Platzverhältnisse, den Einfluss der tektonischen Überprägung auf die Wasserfliesswege und die notwendigen Sicherheitsabstände beim Bau eines SMA-Lagers in den Effinger Schichten hinsichtlich einer möglichen Verlängerung der Born-Engelberg-Antiklinale abzuklären und auch diejenigen seismischen Linien zu berücksichtigen, die in diesen Teil des Standortgebiets hineinreichen (83-NS-22, SEAG U83-11, 83-SE-12).

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die vorgelegten Daten (einschliesslich der Bohrbefunde aus den Bohrungen Oftringen und Gösgen) zusammen mit den von der Nagra geplanten und seitens ENSI geforderten weiteren Abklärungen belastbare Aussagen über Tiefenlage, Mächtigkeit und das Platzangebot für ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss liefern, um provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

#### *SMA-Standortgebiet Wellenberg*

Im Unterschied zu den bisher besprochenen Standortgebieten weist der Wellenberg bezüglich tektonischer Überprägung, Geometrie und Strukturen viel komplexere und deutlich ungünstigere Verhältnisse auf. Das Standortgebiet Wellenberg beinhaltet eine sehr mächtige tektonische Akkumulation von geringdurchlässigen Mergel-Formationen des Helvetikums (Palfris-Formation und Vitznau-Mergel der Drusberg-Decke sowie tertiäre Tonmergel der Axen-Decke). Der Kenntnisstand der räumlichen geologischen Verhältnisse stützt sich neben der strukturgeologischen und geologischen Detailkartierung auf insgesamt sieben Tiefbohrungen mit umfangreichen geologischen, mineralogischen und geochemischen Untersuchungen ab und ist entsprechend sehr umfassend (NTB 96-01). Mittels der Bohrungen konnte der Verlauf der Überschiebungsflächen zwischen Axen- und Drusbergdecke aufgezeigt werden, der den Wirtgesteinskörper in einzelne Deckenelemente (Schuppen) aufteilt. Ob Fremdgesteinsschollen längs dieser Überschiebungsbahnen ins Wirtgestein eingeschleppt wurden, wie sie westlich (Wyss Stein) und östlich (z.B. Maisander) des Standortgebiets Wellenberg beobachtet werden, bleibt eine offene Frage. Wie die HSK in ihrem Gutachten 1996 (HSK 30/9) festhält, kann diese Frage wegen der sehr komplexen tektonischen Verhältnissen mit Erkundungen von der Oberfläche her kaum geklärt werden, dazu wären aufwändige

untertägige Sondierungen (Sondierstollen) notwendig. Dieser Aspekt ist bei der Bewertung der Explorierbarkeit zu berücksichtigen.

Seit diesen Untersuchungen wurden von der Uni Bern weitere Forschungsarbeiten zur Tektonik des Helvetikums durchgeführt, welche in Form einer tektonischen Karte 1:100 000 mit Erläuterungen publiziert wurden (Piffner et al. 2010, Erläuterungen in Vorbereitung). Die Nagra plant, im Hinblick auf Etappe 2 SGT die neuesten Erkenntnisse in ihre Profilschnitte des Standortgebiets Wellenberg aufzunehmen und das geologische 3D-Modell des Wellenbergs (NAB 09-31) entsprechend zu überarbeiten. Das ENSI erwartet, dass die Nagra dabei auch die bestehenden Ungewissheiten neu analysiert und berücksichtigt.

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die vorgelegten Informationen zusammen mit der geplanten Überarbeitung des geologischen 3D-Modells Wellenberg und der Analyse der bestehenden Ungewissheiten eine ausreichende Entscheidungsbasis zur Beurteilung der geometrischen und strukturellen Verhältnisse liefern werden, um provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

#### *Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen und Geothermie*

Die Grundlagen zur Beurteilung potenzieller Nutzungskonflikte bezüglich Kohlenwasserstoffressourcen, Salzvorkommen und geothermischen Verhältnisse in den vorgeschlagenen Standortgebieten hat die Nagra im Rahmen der Arbeiten zu Etappe 1 SGT bereits flächendeckend erarbeitet. In NTB 10-01 legt die Nagra zusätzlich eine Karte der Mineral- und Thermalwasservorkommen im Abstand bis 10 km zu den Entwürfen der Planungssperimeter der vorgeschlagenen Standortgebiete gemäss ARE (2009) vor. Im Hinblick auf Etappe 2 SGT plant die Nagra, die Datensätze zu Rohstoffvorkommen und Geothermie zu überprüfen und zu konsolidieren. Die Nagra weist ferner auf den potenziellen Nutzungskonflikt bei grossflächigem, tief greifendem Gesteinsabbau (z.B. Kalke und Mergel der Zementindustrie) hin, der im Extremfall zu einer Dekompaktion des Wirtgesteins führen kann. Mitten im Standortgebiet Bözberg ist am Homberg ein solcher Abbau in Abklärung.

Das ENSI beurteilt die dargelegten Informationen und die geplanten Ergänzungen zu möglichen Nutzungskonflikten in den verschiedenen Standortgebieten als nachvollziehbar und zielführend, um belastbare Aussagen im Hinblick auf die erforderlichen qualitativen Sicherheitsbewertungen bzw. den sicherheitstechnischen Vergleich der Standortvorschläge in Etappe 2 SGT machen zu können. Das Vorgehen zu den Nutzungskonflikten wird im Konzeptteil des SGT geregelt. In Etappe 2 SGT werden die Standorte der Oberflächenanlagen und der Zugangsbauwerke zum Tiefenlager konkretisiert. Mit dem Kriterium 2.4 des Sachplans (BFE 2008, HSK 33/001) werden die nutzungswürdigen Rohstoffe und die sich daraus allfällig ergebenden Nutzungskonflikte beurteilt.

Das ENSI empfiehlt, dass die Nagra für Etappe 3 SGT mit einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse aufzeigt, welche Abstände eines Tiefenlagers (inklusive seiner Oberflächenanlagen und seiner Zugangsbauwerke) zu einem Trinkwasser führenden Gesteinskörper oder zu Mineral- und Thermalwasservorkommen zu beachten sind, um die in der Richtlinie ENSI-G03 festgehaltenen Schutzkriterien einzuhalten. Im Rahmen der Sicherheitsanalysen in Etappe 3 SGT ist im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch auch der Einfluss allfälliger Nutzungen des Untergrunds (unbeabsichtigtes Anbohren u.a. durch Erdwärmeson-

den oder Grundwasserfassungen) auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers aufzuzeigen und zu quantifizieren. Daraus abgeleitet ergeben sich Hinweise auf die zu treffenden Schutzmassnahmen bei der späteren Standortfestlegung (Rahmenbewilligung mit provisorischem Schutzbereich gemäss KEG/KEV).

#### *Ausgewählte Zustandsparameter*

Die Nagra fasst unter diesem Begriff standortspezifisch den aktuellen Kenntnisstand über die In-situ-Temperaturbedingungen und Gebirgsspannungsverhältnisse im Hinblick auf die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der SMA- und HAA-Lagerbauwerke zusammen. Für Etappe 2 SGT werden die Daten neu kompiliert und aufgrund von neuen Bohrdaten und Daten aus der Seismologie (Herdflächenlösungen) erweitert.

Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als nachvollziehbar und stufengerecht. Zum Kenntnisstand und den ergänzenden Untersuchungen zur bautechnischen Machbarkeit äusserte sich das ENSI in Kapitel 8.

#### **Zusammenfassende Beurteilung des ENSI**

Zusammenfassend kommt das ENSI in seiner Beurteilung zum Schluss, dass die verfügbaren geologisch-tektonischen Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen der Nagra und den seitens ENSI geforderten Ergänzungen ausreichen, um in Etappe 2 SGT für alle Standortgebiete provisorische Sicherheitsanalysen durchführen zu können. Die ergänzenden Untersuchungen schliessen u.a. das 2D-Seismik-Messnetz, welches eine Region mit den Standortgebieten Bözberg und Nördlich Lägeren umfasst, die Überarbeitung des geologischen 3D-Modells Wellenberg und weitere Abklärungen zu den Platzverhältnissen im Standortgebiet Jura-Südfuss ein.

Im Hinblick auf Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI:

#### *Eichbohrung in den westlichen Bereichen Nördlich Lägeren*

Das ENSI empfiehlt der Nagra für Etappe 3 SGT bei der Weiterverfolgung der Option 'Brauner Dogger' für ein SMA-Lager im westlichen Standortgebiet Nördlich Lägeren eine auf den Westen des Standortgebiets bezogene Eichbohrung, die die faziellen Wechsel im 'Braunen Dogger' genauer abklärt.

#### *Abstände zu Mineral- und Thermalwasservorkommen*

Das ENSI empfiehlt, dass die Nagra für Etappe 3 SGT mit einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse aufzeigt, welche Abstände eines Tiefenlagers zu einem Trinkwasser führenden Gesteinskörper oder zu Mineral- und Thermalwasservorkommen zu beachten sind, um die in der Richtlinie ENSI-G03 festgehaltenen Schutzkriterien einzuhalten.

#### *Nutzungskonflikte*

Im Rahmen der Sicherheitsanalysen in Etappe 3 SGT ist im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch der Einfluss allfälliger Nutzungen des Untergrunds (unbeabsichtigtes Anbohren

u.a. durch Erdwärmesonden oder Grundwasserfassungen) auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers aufzuzeigen und zu quantifizieren.

## 6 Langzeitentwicklung

### Angaben der Nagra

Die wichtigsten Grundlagendaten zur geologischen Langzeitentwicklung betreffen die Themenkomplexe Geodynamik, Neotektonik und Erosion. Betreffend Neotektonik sind, neben der damit verbundenen Hebung und Erosion, vor allem potenzielle differenzielle Bewegungen im Lagerbereich relevant (im Hinblick auf die Schädigung der technischen Barrieren und die potenzielle Entstehung neuer Wasserwegsamkeiten). Da sich gemäss den anerkannten konzeptuellen Modellvorstellungen grössere Bewegungen im Betrachtungszeitraum bevorzugt an bestehenden grösseren Störungen abspielen, ist dabei in erster Linie die Verteilung von existierenden grösseren Störungen relevant.

Neben den allgemeinen geologischen und tektonischen Arbeiten tragen zahlreiche Arbeiten zum heutigen neotektonischen Verständnis bei (Auswertung der registrierten Erdbeben, geodätische Messungen, Spannungsmessungen, geomorphologische Studien, paläoseismologische Studien und Beckenmodellierungen). Eine Zusammenfassung der neotektonischen Situation in der Schweiz unter Berücksichtigung der oben genannten Datensätze findet sich in NTB 08-04 (Kapitel 2.7), basierend auf NTB 99-08. Die Daten erlauben eine Differenzierung der neotektonischen Situation zwischen den verschiedenen geologischen Grossräumen bzw. tektonischen Regimes und lassen zum Beispiel auf eine höhere neotektonische Aktivität entlang der Alpenfront (Standortgebiet Wellenberg) im Vergleich zu den Standortgebieten in der Nordschweiz schliessen.

Die Landschaftsentwicklung in der Nordschweiz und die darauf basierende Ableitung von langfristigen Erosionsraten sowie zukünftigen Erosions-Szenarien wird in NTB 99-08 diskutiert. Die wichtigsten Grundlagendaten dazu stellen alte Aufschotterungsflächen dar, in welche sich die Täler sukzessive eingetieft haben. Weitere wichtige Hinweise für Abschätzungen von langfristigen Erosionsraten sind Untersuchungen der Versenkungsgeschichte anhand von Apatit-Spaltspurdaten, Vitritreflexions-Messungen und Biomarker-Analysen. Diese Daten können mit rezent gemessenen Hebungsdaten anhand von Präzisionsnivelements verglichen werden.

Betreffend glaziale Tiefenerosion sind die Verteilung und Tiefe der vorhandenen übertieften Felsrinnen wichtig. Eine generelle Übersicht über Verteilung, Morphologie und Alter von übertieften Felsrinnen in und um die Alpen findet sich in Preusser et al. (2010). Eine Karte der Basis der Lockergesteine in der Nordschweiz und im angrenzenden Molassebecken wurde im Rahmen von Etappe 1 SGT kompiliert. Detaillierte Isohypsenkarten und Profile durch übertiefte Täler mit relativen Altersangaben finden sich in Graf (2010). Die ältere Vergletscherungsgeschichte (Zeit der höheren und tieferen Deckenschotter) wird in Graf (2009) diskutiert. Die jüngere Entwicklung (Zeit der Ablagerung der Hoch- und Niederterrassen) wird in Graf (2010) detailliert abgehandelt. In der neuen Karte «Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM), 1:500 000» von Schlüchter et al. (2009) sind Informationen aus zahlreichen quartärgeologischen Forschungsarbeiten im Sinn eines Gesamtbilds der Eisverbreitung zurzeit des Maximalstands der letzteiszeitlichen Vergletscherung kompiliert.

Für Etappe 2 SGT sind standortübergreifende ergänzende Untersuchungen geplant, u.a. bezüglich Verteilung, Höhenlage und Alter der Deckenschotter zur Bestimmung der Entwicklung der Erosionsbasis während der letzten ca. 2 Millionen Jahre und eine Verdichtung geo-

dätischer Messungen zur Beurteilung rezenter Krustenbewegungen. Mit Hilfe eines hochauflösenden Geländemodells von swisstopo sollen Spuren neotektonischer Aktivität gesucht und allenfalls mittels Geländeuntersuchungen validiert werden.

Geplant sind ergänzende Untersuchungen betreffend Verbreitung, Morphologie und Alter von glazialen Talfüllungen und quartären Terrassen. Dazu sind in Etappe 3 SGT auch eine Forschungsbohrung in einer übertieften Felsrinne und die Datierung der Sedimentfüllung vorgesehen. Die Top-Fels-Karte soll aufdatiert werden. Subglaziale Erosionsprozesse sollen zur Verbesserung des Prozessverständnisses modelliert werden. Im Standortgebiet Bözberg wird zusätzlich das Erosionspotenzial in Zusammenhang mit der lokalen Topographie mittels numerischer Modelle der Landschaftsentwicklung untersucht.

In Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst wird das Schwachbebennetz in der Nordschweiz verdichtet, was eine genauere Lokalisierung der Erdbebenherde und eine zuverlässigere Bestimmung der Herdflächenlösungen erlauben soll. Zusammen mit den GNSS-Messungen (Global Navigation Satellite System) liefern diese Daten mittelfristig zusätzliche Informationen zur geodynamischen und neotektonischen Situation in der Nordschweiz.

### **Beurteilung des ENSI**

Für die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen orientiert sich die Nagra bezüglich geologischer Langzeitentwicklung im Wesentlichen an den folgenden für die provisorische Sicherheitsanalyse relevanten Prozessen und Parametern:

- PG-2 Glazial übertiefte Felsrinnen
- PG-4 Zeitliche Entwicklung der regionalen Erosionsbasis
- PG-28 Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie
- PG-30 Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung
- PI-2 Geodynamische und neotektonische Aktivität

Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als sicherheitsgerichtet. Es erfüllt die in ENSI 33/075 festgehaltenen Vorgaben und Anforderungen.

Der von der Nagra dargelegte Kenntnisstand bezüglich geologischer Langzeitentwicklung ist umfassend und in verschiedenen technischen Berichten der Nagra dokumentiert (z.B. NTB 08-04; NTB 99-08). ENSI und KNE stellen fest, dass einige jüngere Arbeiten aus der Fachliteratur nicht referenziert werden (darunter Bernet et al. 2009; Cederbom et al. 2008; Champagnac et al. 2009; Schlunegger und Mosar 2010; Willenbring und von Blanckenburg 2010; Willet und Schlunegger 2009; Willett 2010). ENSI und KNE bemerken dazu, dass in den letzten Jahren eine Anzahl Studien publiziert worden sind, die sich mit den Zusammenhängen zwischen Klima, Erosion und Hebung/Tektonik auseinandergesetzt haben. Ob die Erosion schubweise (Cederbom et al. 2008) oder kontinuierlich (Mazurek et al. 2006) erfolgte, wird in der Fachliteratur noch kontrovers diskutiert. Ergänzende Apatit-Spaltspuranalysen sowie aktuellere thermische Modellierungen könnten zur Klärung dieser Frage beitragen. Das ENSI geht davon aus, dass die Nagra für Etappe 2 SGT die Erkenntnisse dieser Arbeiten bei der Beurteilung der geologischen Langzeitentwicklung berücksichtigt.

Die Prozesse werden vom ENSI wie folgt beurteilt:

- PG-2: Hinsichtlich glazialer Tiefenerosion gibt es Hinweise, dass die alpenfernen Enden der glazial übertieften Felsrinnen mit Sedimenten etlicher glazialer Zyklen verfüllt sind (Dr. von Moos AG 2009) und die Ablagerungen an der Basis typischerweise mindestens 150 000 bis 200 000 Jahre alt sind (Anselmetti et al. 2010) und deren Übertiefung > 200 000 Jahre alt ist. Daten aus den Alpen (Häuselmann et al. 2007) weisen auf eine Haupt-Übertiefungsphase in den Alpen vor 700 000 bis 400 000 Jahren hin. Rinnenverlagerungen sind in der geologischen Vergangenheit nachweisbar aufgetreten (Dr. von Moos AG 2010) und können grundsätzlich auch zukünftig erfolgen, wenn der Abstand zu einer anderen Rinne hinreichend gross ist und eine Folge von Ablagerungs- und Einschneidungs-Ereignissen die Bildung einer neuen Rinne fördert. Das ENSI sieht das Risiko einer Rinnenneubildung und zukünftiger Rinnenübertiefung im Felsuntergrund in den vorgeschlagenen Standortgebieten als gering an. Die bestehenden Thurtal- und Glatttal-Rinnen sind aufgrund ihrer Nähe zu den von der Nagra vorgeschlagenen Standortgebieten gesondert zu bewerten.

Bei einer Weiterverfolgung der Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Nördlich Lägeren in Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI eine Bohrung in der übertieften Thurtal-Rinne südlich des Standortgebiets Zürich Nord-Ost. Die Thurtal-Rinne sowie der nördlich abzweigende kurze Ast der Marthalen-Rinne liegen unmittelbar südlich des Standortgebiets Zürich Nord-Ost. Die Datierung der in der Thurtal-Rinne vorhandenen Verfüllung sowie ergänzende Datierungen an Sedimenten der von der Thurtal-Rinne nach Norden abzweigenden Basadingen-Rinne (inkl. der Ittinger Schotter) erachtet das ENSI als wichtig, um das notwendige Prozessverständnis der glazialen Tiefenerosion in den kommenden Realisierungsschritten zu erreichen und wichtige Informationen zum langfristigen glazialen Ausräumen existierender Rinnen oder zur Verlagerung von Rinnen zu erhalten. Für die Glatttal-Rinne hat das ENSI bereits in seinem Gutachten zur Etappe 1 SGT (ENSI 33/070, S. 159) festgehalten, dass die glaziale Tiefenerosion in der Verlängerung der Glatttal-Rinne in das östliche Standortgebiet Nördlich Lägeren aufgrund der grossen Tiefenlage des Wirtgesteins Opalinuston für unproblematisch angesehen wird. Gleichwohl empfiehlt das ENSI zur Vertiefung des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion in der Nordschweiz für Etappe 3 SGT die Bildungsgeschichte der Glatttal-Rinne in die ergänzenden Untersuchungen mit einzubeziehen.

- PG-4 und PG-28: Die Landschaftsentwicklung in der Nordschweiz wurde vom ENSI in einer kürzlichen Arbeit neu bewertet (ENSI 33/50). Die Neubewertung bestätigt die bisherigen Vorstellungen zur Entwicklung der letzten 2.5 Millionen Jahre. Die in den nächsten Million Jahren von der Nagra erwarteten grossräumigen Erosionsraten im Alpenvorland von bis zu 0.2 mm/Jahr werden für die Flusstäler (lineare Einschneidung) als realistisch angesehen.

Das ENSI begrüsst, dass die Nagra für das HAA-Standortgebiet Bözberg eine Studie zur geomorphologischen Langzeitentwicklung durchführen will. Im HAA-Standortgebiet Bözberg ist die Überlagerung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Wirtgestein und Rahmengesteine) in Teilen des Gebietes eher knapp, so dass langfristig auch mit

alpenfern moderaten Erosionsraten eine Ausdehnung der Dekompaktionszone in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinein wahrscheinlich ist.

Eine solche Studie kann aus Sicht des ENSI diverse sicherheitsrelevante Aspekte beleuchten: (1) Sie zeigt auf, inwiefern fluviale und flächige Erosion zusammenwirken und auf eine Hochzone wie den Bözberg Einfluss nehmen. (2) Sie erlaubt, abzuschätzen, inwiefern sich die regionalen hydrogeologischen Muster in begrenzenden Aquiferen und die Porenwasserzusammensetzungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ändern und damit die darin wirksame Diffusion beeinflussen. (3) Sie zeigt auf, inwiefern sich die Exfiltrationspfade über den notwendigen Betrachtungszeitraum ändern. (4) Sie generiert allenfalls Voraussagen, die anhand der vorhandenen Sedimente überprüft werden können, um damit die Modelle zu validieren.

Die gewonnene Information ist aus Sicht des ENSI für alle HAA-Standortgebiete wichtig. Eine Durchführung solcher Studien für alle SMA-Standortgebiete ist nicht sinnvoll, da der Betrachtungszeitraum für diese Gebiete deutlich zu kurz ist, um grosse Effekte zu erwarten. Die durchschnittlich erwartete Erosion für den Betrachtungszeitraum von 100 000 Jahren liegt im Dekameter-Bereich. Für das SMA-Standortgebiet des Wellenbergs ist aufgrund der inneralpinen Lage des Standortgebiets eine solche Studie jedoch sinnvoll. Sie wurde aber von der Nagra bereits früher vorgelegt (NTB 93-34). Dass die Erosionsstudie nur für das Standortgebiet Bözberg durchgeführt werden soll, ist aus Sicht des ENSI für den in Etappe 2 SGT durchzuführenden Vergleich unter den HAA-Standortgebieten hinderlich. Hingegen würden vergleichende Betrachtungen in allen drei HAA-Standortgebieten erlauben, die Einzelstudien zu einem Gesamtbild zu verbinden, da die HAA-Standortgebiete alle entlang des Rheins liegen und insbesondere von der zeitlichen Entwicklung der dortigen Erosion abhängig sind.

#### *Forderung 10*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT für alle drei HAA-Standortgebiete vergleichende Betrachtungen zur geomorphologischen Entwicklung im Betrachtungszeitraum durchzuführen und zu dokumentieren.

- PG-30: Aus Sicht des ENSI ist die Wiederkehr einer Phase starker glazialer Tiefenerosion nicht ausschliessbar. Eine so starke Vorlandvereisung wäre dem natürlichen Klimazyklus folgend jedoch erst in mehr als 100 000 Jahren zu erwarten (Archer und Ganopolski 2005; Haeberli 2004), so dass die SMA-Standortgebiete kaum davon betroffen wären. Aufgrund anthropogener Einflüsse könnte sich dessen Eintreffen allenfalls verzögern (Archer und Ganopolski 2005). Eine ausreichende Tiefe eines HAA-Lagers und ein hinreichender Abstand zu glazial übertieften Rinnen (NTB 08-03, NTB 08-04) ist aus Sicht des ENSI einzuhalten (ENSI 33/070). Die aktuelle Entwicklung von Forschung und Wissen auf dem Gebiet der Klimaentwicklung erfolgt rasch. Das ENSI geht davon aus, dass die Nagra die aktuellen Erkenntnisse zur Klimaentwicklung in Etappe 2 SGT berücksichtigt.
- PI-2: Die geodynamische und neotektonische Situation und die Bewertung möglicher zukünftiger tektonischer Bewegungen werden von der Nagra detailliert dargestellt. Nördlich der Jura-Hauptüberschiebung konnten mit Fernerkundungsmethoden in den bis zu

2 Millionen Jahre alten Schottern der Nordschweiz in den vorgeschlagenen Standortgebieten keine tektonischen Verstellungen beobachtet werden (Fraefel 2008; Kock 2008). Nach Ansicht des ENSI zeichnet sich aufgrund der vorliegenden Unterlagen und eigener Analysen ein Trend ab, nach welchem infolge zunehmender Abtragung in den Alpen in den letzten Millionen Jahren die Deformation im Alpenvorland abgenommen und sich vom Faltenjura zum Alpenrand hin verschoben hat. Die von der Nagra geplanten bzw. begonnenen ergänzenden Untersuchungen in Zusammenarbeit mit dem Schweizerischen Erdbebendienst (Schwachbebennetz) und der swisstopo (GNSS-Messungen) sind geeignet, diese Aspekte weiter zu klären und genügen für Etappe 2 SGT.

Im Folgenden beurteilt das ENSI die Prozesse der Langzeitentwicklung für jedes Standortgebiet spezifisch:

#### *SMA-Standortgebiet Südranden*

Die gute Erhaltung von altquartären Deckenschottern (Graf 2009) im Südranden lässt zuverlässige Aussagen zur regionalen Hebung und Flusserosion zu, die wiederum eine gute Prognose der zu erwartenden Landschaftsentwicklung ermöglichen. Das ENSI beurteilt deshalb den diesbezüglichen Kenntnisstand als für Etappe 2 SGT genügend.

Der Prozess der glazialen Tiefenerosion betrifft das Standortgebiet Südranden im erforderlichen Betrachtungszeitraum von 100 000 Jahren kaum. Die nördlich angrenzende, vermutlich im Mittelpleistozän glazial überprägte Klettgau-Rinne wurde in der letzten Eiszeit nicht vom Gletschereis erreicht. Einzig die Schmelzwasserrinne des Wangentals an der Westgrenze des geologischen Standortgebiets könnte als vorgeprägte Schwächezone für glaziale Tiefenerosion relevant sein. Das östliche Ende der Klettgau-Rinne ist bei Neuhausen seit der vorletzten Eiszeit weitgehend blockiert, so dass ein nächster Gletschervorstoss mit grosser Wahrscheinlichkeit dem Rhein nach Süden folgen und damit das Standortgebiet Südranden nicht direkt beeinflussen würde.

#### *HAA/SMA-Standortgebiet Zürich Nord-Ost*

Die regionalen Erosionsraten wurden mit 100 – 200 m pro Million Jahre (NTB 99-08) aus Sicht des ENSI von der Nagra genügend konservativ abgeschätzt (ENSI 33/070), so dass auch nach 1 Million Jahren im Standortgebiet eine genügende Überlagerung gegeben sein wird.

Die glaziale Tiefenerosion entlang der Thurtal-Rinne südlich des geologischen Standortgebiets betrifft einen Bereich, in dem sich das Wirtgestein 600 m unterhalb der Felsoberkante der Rinne, also 900 m unter Terrain, befindet (NTB 08-04). Die Thurtal-Rinne wurde im östlichen und mittleren Abschnitt während der letzten Eiszeit komplett, im westlichen Teil nur teilweise ausgeräumt (verfestigte Seeablagerungen im tieferen Teil der Bohrprofile, Dr. von Moos AG 2005). Die Übertiefung an ihrem westlichen Ende scheint später erfolgt zu sein als die der nördlich gelegenen Rinnen (Müller 1996), was im Hinblick auf Etappe 3 SGT durch eine Forschungsbohrung und Datierungen der Ablagerungen zu überprüfen wäre (siehe PG-2). Die von der westlichen Thurtal-Rinne nach West-Nordwest abzweigende Marthalen-Rinne ist relativ flach, und das Wirtgestein befindet sich hier 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 mit-

telpleistozänes, nicht genau bekanntes Alter (Dr. von Moos AG 2009). 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. Grundsätzlich wäre bei gleichzeitiger Blockierung der Hochrhein-Rinne bei Schaffhausen und der Thurtal-Rinne vor dem Hochrhein die Bildung einer neuen Schmelzwasserrinne durch das 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 (ENSI 33/070, S. 156). Aus Sicht des ENSI wird das Wirtgestein auch bei Annahme einer verzögerten, besonders starken Vorlandvereisung durch überlagernde, generell schwer erodierbare Malmkalke vor glazialer Tiefenerosion im Fall einer Durchschneidung der Molassebedeckung geschützt. Daher ist die vorhandene Mindestüberdeckung von 500 m aus Sicht des ENSI genügend und der Wissensstand für Etappe 2 SGT ausreichend.

Im Zusammenhang mit der fluviatilen Erosion entlang des Rheins erachtet das ENSI parallel zur laufenden Forschungsstudie bezüglich Landschaftsentwicklung im Standortgebiet Bözberg eine vereinfachte Studie zum Standortgebiet Zürich Nord-Ost für sinnvoll. Die Frage der fluviatilen Erosion entlang des Rheins, gekoppelt mit der langfristigen Rückwärtswanderung des Einschnitts des Rheins in den Malm (Rheinfall) und die Mobilisierung der Schuttmassen des Bodensees, dürften für die geomorphologische Entwicklung der nördlichen und westlichen Teile des Standortgebiets und damit allenfalls für die Platzierung der untertägigen Anlagen von Bedeutung sein (siehe Forderung 10 des ENSI).

#### *SMA/HAA-Standortgebiet Nördlich Lägeren*

Die von der Nagra angegebene Erosionsrate von bis zu 200 m über 1 Million Jahre ist aus Sicht des ENSI für die Flusstäler realistisch geschätzt (ENSI 33/50). Da die verfestigten Höheren Deckenschotter insbesondere im westlichen Teil des geologischen Standortgebiets und östlich davon verbreitet erhalten sind, ist die grossräumige flächige Abtragung bis zu einer Grössenordnung geringer. Die in Etappe 1 SGT vorgenommene sehr günstige Bewertung der Nagra hinsichtlich flächenhafter Erosion ist daher aus Sicht des ENSI nachvollziehbar (ENSI 33/070).

Glaziale Tiefenerosion in der Verlängerung des Glatttals wird aufgrund der generell grossen Tiefenlage des Wirtgesteins von Nagra und ENSI als unproblematisch angesehen. Ein unterstützender Hinweis ist aus den Datierungen der Forschungsbohrung am Mammutfundort Niederwenigen südlich des Standortgebiets verfügbar (Anselmetti et al. 2010), wonach in der relativ flachen Rinne Ablagerungen mit Altern von über 150 000 Jahren vorhanden sind und die Rinnenbildung im Wehntal vermutlich weit über 200 000 Jahre alt ist.

Auch zum Standortgebiet Nördlich Lägeren ist das ENSI der Ansicht, dass eine vereinfachte Studie zur Landschaftsentwicklung parallel zur Forschungsstudie im Standortgebiete Bözberg erfolgen sollte. Auch hier ist die geomorphologische Entwicklung der fluviatilen Erosion des Rheins über den HAA-Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre zu evaluieren, und allenfalls ist die Platzierung der untertägigen Anlagen entsprechend anzupassen (siehe Forderung 10 des ENSI).

### *SMA/HAA-Standortgebiet Bözberg*

Die regionale Hebungsrate bzw. fluviale Eintiefungsrate von < 200 m über 2 Millionen Jahre bzw. von < 150 m über die letzte Million Jahre in Bezug auf das untere Aaretal (ENSI 33/50) weist auf eine langsamere regionale Hebung als in den übrigen HAA-Standortgebieten hin. Seitens der Nagra soll durch eine Modellierung eine Einebnung des Standortgebiets als Szenarium untersucht werden. Nach Einschätzung des ENSI ist eine solche Modellierung der landschaftlichen Entwicklung für das Standortgebiet Bözberg sinnvoll, auch wenn aus Sicht des ENSI eine Einebnung selbst unter Annahme starker subtropischer Verwitterung und verdoppelten Niederschlags innerhalb 1 Million Jahre wenig wahrscheinlich ist. Das ENSI beurteilt die von der Nagra für Etappe 2 SGT geplanten Modellierungen zur möglichen Landschaftsentwicklung des Bözbergs trotzdem als stufengerecht, um dem quantitativen (vgl. die langfristige Entwicklung der Dekompaktionszone in der provisorischen Sicherheitsanalyse) und qualitativen Vergleich zwischen den HAA-Standortgebieten besser Rechnung tragen zu können.

### *SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss*

Hinsichtlich flächiger und fluvialer Erosion ergibt sich aus möglicherweise differenziellen tektonischen Hebungen im Bereich der Subjurassischen Zone grundsätzlich ein erhöhtes Potenzial, das infolge des Fehlens Höherer oder Tieferer Deckenschotter im Standortgebiet für lange Betrachtungszeiträume aber nur schlecht eingegrenzt werden kann. Aktuelle Hebungsraten (NAB 07-13) geben keine Hinweise für Werte über 0.4 mm/Jahr, um die sich die Aare im Standortgebiet entsprechend einschneiden würde. Da es innerhalb oder in der Nähe des Standortgebiets keine glazial übertieften Felsrinnen (d.h. Quartärmächtigkeit mehr als 100 m) gibt und die beiden Wirtgesteine Opalinuston und Effinger Schichten eine Felsüberdeckung von mehr als 300 m aufweisen, teilt das ENSI die Einschätzung der Nagra, dass für den massgeblichen Betrachtungszeitraum von 100 000 Jahren für das SMA-Lager im Standortgebiet Jura-Südfuss von einem genügenden Schutz vor Erosion ausgegangen werden kann und keine weiteren Untersuchungen für Etappe 2 SGT notwendig sind.

### *SMA-Standortgebiet Wellenberg*

Die in den Alpen im Vergleich zum nördlichen Vorland generell stark erhöhten Erosionsraten und die erhöhte Seismizität stellen im geologischen Standortgebiet Wellenberg gegenüber den anderen vorgeschlagenen SMA-Standortgebieten einen deutlichen sicherheitstechnischen Nachteil dar. Die ausgeprägte Topographie kann langfristig durch Hangrutschungen oder anderen tief greifende Massenbewegungen die Beständigkeit der Standorteigenschaften verringern (Dekompaktion). Das Engelbergertal wurde in der geologischen Geschichte mehrfach glazial übertieft, weshalb die Nagra eine Tieferlegung des SMA-Lagers weit unter das Niveau der Talsohle vorsieht. Die Aspekte der geologischen Langzeitbeständigkeit hat die Nagra im Rahmen des SMA-Projekts Wellenberg untersucht und analysiert (NTB 93-34; NTB 94-06; NTB 96-01).

In seinem Gutachten zur Etappe 1 SGT hat das ENSI die Langzeitstabilität des Alpenraums für SMA-Lager bezüglich Hebungsraten, Erosion, Seismizität und Neotektonik als kritisch beurteilt. Hinsichtlich des Standortgebiets Wellenberg stellt das ENSI deshalb folgende Forderung:

**Forderung 11**

Die Nagra hat für das Standortgebiet Wellenberg die Aspekte Hebung, Seismizität, Neotektonik und glaziale Tiefenerosion unter Einbezug aller seit der Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs neu erfassten Ergebnisse bei der Beurteilung der Langzeitentwicklung zu berücksichtigen. Darunter fallen geodätische und seismische Daten, durch Unwetter ausgelöste und durch paläoseismische Untersuchungen erkannte seismische Ereignisse und Erkenntnisse aus neu zusammengestellten geologischen Profilen in Pfiffner et al. (2010). Die seit dem Rahmenbewilligungsgesuch geänderte Tiefenlage des Lagers ist zu berücksichtigen.

**Zusammenfassende Beurteilung des ENSI**

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass die von der Nagra dargelegten Informationen zur geologischen Langzeitentwicklung, ergänzt mit der neusten Literatur zu Hebung, Erosion und Klimaentwicklung und zusammen mit den geplanten ergänzenden Untersuchungen und seitens ENSI geforderten Ergänzungen ausreichend belastbare Aussagen erwarten lassen, um die in Etappe 2 SGT geforderten provisorischen Sicherheitsanalysen für die einzelnen Standortgebiete durchführen zu können.

Bei einer Weiterverfolgung eines Lagerprojekts im HAA-Standortgebiet Zürich Nord-Ost empfiehlt das ENSI in Etappe 3 SGT eine Forschungsbohrung in der Thurtal-Rinne südlich des Standortgebiets Zürich Nord-Ost einschliesslich Datierungen der dort vorhandenen Verfüllung und von Sedimenten der von der Thurtal-Rinne nach Norden abzweigenden Basadinen-Rinne.

Das ENSI empfiehlt zur Vertiefung des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion in der Nordschweiz für Etappe 3 SGT, die Bildungsgeschichte der Glatttal-Rinne in die ergänzenden Untersuchungen mit einzubeziehen.

## 7 Hydrogeologie

Die hydraulische Barrierenwirkung der Wirt- und Rahmengesteine ist für die Langzeitsicherheit eines geologischen Tiefenlagers essenziell, denn Radionuklide werden hauptsächlich mit dem Tiefengrundwasser transportiert. Daher wird der Beurteilung der hydrogeologischen Prozesse und Parameter in den vorgeschlagenen Standortregionen eine zentrale Bedeutung beim sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT zukommen. Das ENSI beurteilt die Kenntnisse zu den hydrogeologischen Prozessen und Parametern und zu den hydrogeologischen Verhältnissen in den Standortgebieten im Hinblick auf die Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen entsprechend ausführlich.

Die hydraulische Durchlässigkeit als charakteristische Eigenschaft der Wirtgesteine beurteilt das ENSI in Kapitel 4. Hydrogeologische Prozesse und Parameter spielen ausserdem für den Grundwasserschutz und die bautechnische Machbarkeit eine wichtige Rolle, weil Zugangsbauwerke im Allgemeinen wasserführende überlagernde Gesteinsformationen durchqueren müssen. Die bautechnische Machbarkeit beurteilt das ENSI in Kapitel 8. Im Hinblick auf den Stofftransport bestehen vielfältige Wechselwirkungen mit geochemischen Prozessen und Parametern, welche das ENSI in Kapitel 9 beurteilt.

Im Hinblick auf die Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen nimmt das Standortgebiet Wellenberg eine Sonderstellung ein. Mit dem Gesuch zur Erteilung einer Rahmenbewilligung (GNW 1994) und dem Gutachten der Aufsichtsbehörde (HSK 30/9) liegt ein Kenntnisstand vor, der in weiten Teilen über die Erfordernisse für Etappe 2 SGT hinausgeht. Das ENSI legt den Schwerpunkt seiner Beurteilung auf die Standortgebiete in der Nordschweiz und beurteilt den Kenntnisstand für das Standortgebiet Wellenberg nur, wo die Planung inzwischen geändert wurde (z.B. tiefer liegende Lagerkammern).

### 7.1 Prozesse und Parameter

Für die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen in Etappe 2 SGT evaluiert die Nagra den für die provisorischen Sicherheitsanalysen erforderlichen hydrogeologischen Kenntnisstand im Wesentlichen anhand folgender Prozesse bzw. Parameter, die für die Sicherheit relevant sind:

- PG-8     Hydraulischer Gradient
- PG-9     Art der Transportpfade
- PG-14    Transmissivität von Störungszonen
- PB-10    Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen
- PI-4     Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation

#### *Genereller Überblick des Kenntnisstands*

#### **Angaben der Nagra**

Die Hydrogeologie der Tiefenaquifere der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland (inkl. genutzte Mineralquellen und Thermen) wurde bereits in zahlreichen früheren Ar-

beiten von der Nagra und von Dritten dargestellt. Wichtige Grundlagen im gebietsübergreifenden Massstab bilden die geologischen und hydrogeologischen Karten der Schweiz. Für die oberflächennahen Aquifere bestehen kantonale Kartenwerke (Grundwasserkarten, Grundwasserschutzzonenkarten, Karten im Internet).

Eine Synthese der Hydrogeologie der sedimentären Tiefenaquifere der Nordschweiz (Sedimentstudie) wurde in jüngeren Berichten vertieft. Die Hydrochemie der Tiefengrundwässer der Nordschweiz und angrenzender Gebiete in Süddeutschland wurde dargestellt und für die einzelnen Tiefenaquifere vertieft. Basierend auf isotopenhydrologischen Methoden wurden die Fliesssysteme der Tiefenaquifere der Nordschweiz interpretiert. Eine aktualisierte regionale Auswertung erfolgte im Rahmen der Geosynthese Zürich Nord-Ost. Ein grossräumiges hydrodynamisches Modell wurde verwendet und später weiterentwickelt. Die Fliesssysteme im Oberen Malm und im Oberen Muschelkalk wurden mit regionalen Grundwassermodellen beschrieben. Jüngere Arbeiten zur Hydrogeologie der Tiefenaquifere im angrenzenden Süddeutschland umfassen insbesondere ein Projekt des Landesamtes für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg zu hydrogeologischen und geothermischen Grundlagen zur Nutzung der tiefen Geothermie/Hydrogeothermie und die Darstellung der hydrogeologischen Einheiten in Baden-Württemberg. Eine hydrogeologische Analyse der Tiefenaquifere im Oberen Malm liegt vor.

### **Beurteilung des ENSI**

Wegen der dichten Besiedelung und verkehrstechnischen Nutzung dieses Raums ist die Erkundung der Grundwasserverhältnisse seit jeher von Interesse, z.B. im Rahmen der Grundwassergewinnung, des Grundwasserschutzes, des Tunnelbaus und der Thermal- und Mineralwassernutzung. Im vergangenen Jahrzehnt sind grenzüberschreitende Untersuchungen hinzugekommen. Aus Sicht des ENSI hat die Nagra einen umfassenden und aktuellen Überblick des Kenntnisstands dargelegt.

#### *Hydraulischer Gradient (PG-8)*

### **Angaben der Nagra**

Der Wasserfluss wird primär durch die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins bzw. die Transmissivität von Störungszonen bestimmt. Bei Berücksichtigung der Ungewissheiten spielt der hydraulische Gradient eher eine untergeordnete Rolle. Allgemein sind die Gradienten in gering durchlässigen Gesteinen gross, in durchlässigen Gesteinen in Gebieten mit relativ flacher Topographie wie der Nordschweiz eher klein. Aus diesem Grund werden für die Testrechnungen der Sicherheitsanalyse die Gradienten in den gering durchlässigen Einheiten der Nordschweiz gleich 1 m/m gesetzt und für horizontale Architecturelemente mit erhöhter Durchlässigkeit bzw. Transmissivität (z.B. Kalkbankabfolgen) gleich 0.1 m/m. Für den Wellenberg wird ein einheitlicher Wert von 0.4 m/m verwendet.

Ungewissheiten ergeben sich auch aus der zukünftigen Veränderung der heutigen Gradienten aufgrund von Erosion und Verlegung der Vorflutssysteme. Die für Etappe 2 SGT vorgesehenen hydrogeologischen Modelle werden unter anderem zur Evaluation der hydraulischen Gradienten im Tiefenlager verwendet werden; die Resultate aus diesen Arbeiten werden in die provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 SGT einfließen.

## Beurteilung des ENSI

Unter natürlichen Bedingungen sind hydraulische Gradienten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zwischen Tiefenaquiferen geringen zeitlichen Schwankungen unterworfen und können allenfalls durch lagerbedingte Einflüsse (z.B. Druckaufbau bei der Entstehung von Gas, Veränderungen des Porenraums durch chemische Prozesse) kurzzeitig bzw. lokal beeinflusst werden. Die hydraulischen Gradienten können zuverlässig und mit geringen Fehlern bestimmt werden. Es ist aus Sicht des ENSI deshalb nachvollziehbar und zielführend, für die Abklärung notwendiger ergänzender Untersuchungen von einem in allen Standortgebieten mit Ausnahme des Wellenbergs konstanten Schätzwert von 1 m/m (vertikal im Bereich geringdurchlässiger Gesteine) bzw. 0.1 m/m (horizontal im Bereich durchlässigerer Gesteine) auszugehen.

### *Forderung 12*

Eine standortspezifische Konkretisierung der Annahmen zu hydraulischen Gradienten hat im Rahmen der von der Nagra geplanten Synthesearbeiten (hydrogeologische Modelle) für Etappe 2 SGT zu erfolgen.

Auch am Wellenberg wurde trotz dessen im Alpenraum ausgeprägten Reliefs ein hydraulischer Gradient in derselben Grössenordnung (0.4 m/m) bestimmt und vom ENSI bestätigt (HSK 30/9).

Die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit beurteilt das ENSI in Kapitel 4.6.

### *Art der Transportpfade (PG-9)*

## Angaben der Nagra

Zur Ausbildung potenzieller Transportpfade im Opalinuston und in den Mergel-Formationen des Helvetikums liegen detaillierte Beschreibungen und daraus abgeleitete konzeptuelle Modelle vor. Die Effinger Schichten und der 'Braune Dogger' werden für die Testrechnungen im Referenzfall als homogen-poröse Medien konzeptualisiert. Zusätzlich werden alternative resp. «What if?»-Fälle mit Klüften bzw. mit transmissiven Störungen betrachtet, welche auch die tonreicheren Abfolgen durchschlagen. Die kalkig-sandigen sedimentären Architekturelemente sind in diesen alternativen Fällen resp. «What if?»-Fällen als geklüftete Medien konzeptualisiert.

Die vorhandenen Unterlagen werden als geeignete Grundlage beurteilt für die Testrechnungen. Für die Effinger Schichten und den 'Braunen Dogger' werden für Etappe 2 SGT im Rahmen von Studien an Aufschlüssen und Vergleichen mit Bohrkernen die konzeptuellen Modelle verfeinert.

## Beurteilung des ENSI

Das ENSI erachtet die konzeptuellen Vorstellungen und Kenntnisse über die Art der Transportpfade der Wirt- und Rahmengesteine als vereinfacht, jedoch ausreichend für die Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen.

**Forderung 13**

Das ENSI fordert für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT, dass die ergänzenden Untersuchungen der Nagra (u.a. Aufschlusskartierungen, Laboranalysen, Bohrkernuntersuchungen) für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten eine genauere Beschreibung der sedimentären Architekturelemente (Korrelation, Verzahnung, laterale Faziesänderungen, Ausbildung von Klüften) erlauben.

*Transmissivität von Störungszonen (PG-14)***Angaben der Nagra**

Für den Opalinuston und die Mergel-Formationen des Helvetikums gibt es relativ viele Testergebnisse aus Bereichen mit Störungszonen. Im 'Braunen Dogger' wurden in den Tiefbohrungen bisher keine Störungszonen erbohrt, aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit der tonreichen Abfolgen mit dem Opalinuston sind die Ergebnisse aus dem Opalinuston aber auf die entsprechenden Bereiche im 'Braunen Dogger' übertragbar. In den Effinger Schichten wurden bisher nur kleine Störungen erbohrt und getestet. Wegen des verglichen mit dem Opalinuston geringeren Tonmineralgehalts bzw. geringeren Selbstabdichtungsvermögens werden in den Testrechnungen für vertikale Störungen in den Effinger Schichten, denen bei der Platzierung der Lagerkammern nicht ausgewichen werden kann, signifikant höhere Transmissivitätswerte als für den Opalinuston angenommen.

Die vorhandenen Unterlagen werden als genügend beurteilt, um in den Testrechnungen den Einfluss von Störungszonen auf die Sicherheit zu analysieren. Für Etappe 2 SGT werden die Transmissivitätswerte von Störungen in den verschiedenen Wirtgesteinen konsolidiert.

**Beurteilung des ENSI**

Das ENSI schliesst sich aufgrund der vorliegenden Daten (Beobachtungen in Tunnels und Bohrungen) der Ansicht der Nagra an, dass nach heutigem Wissen Störungszonen in den tonreichen Abfolgen des 'Braunen Doggers' analog zum Opalinuston nicht wasserführend sind. Mit dem «What if?»-Fall 8.1 einer alle Lagerkammern schneidenden wasserführenden Störungszone weist die Nagra nach, dass die sicherheitstechnische Eignung eines Standortgebiets selbst durch eine wasserführende Störungszone nicht in Frage gestellt wird.

Aus Sicht des ENSI ist es gerechtfertigt, für die Effinger Schichten aufgrund des geringeren Kenntnisstands vorsichtigere Annahmen für die alternativen Rechenfälle zu treffen.

*Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen (PB-10)***Angaben der Nagra**

Die Hydrogeologie und Hydrochemie der Mineralquellen und Thermen der Nordschweiz wurden bereits in früheren Berichten und Publikationen dargestellt. Dem potenziellen Konflikt zwischen der Nutzung von Mineralquellen und Thermen und dem Bau der Zugangsbauwerke soll durch folgende Massnahmen begegnet werden:

- Durch eine geeignete Auswahl der Oberflächenstandorte (Einbezug in die raumplanerischen Kriterien, Interessensabwägung),
- durch eine angepasste Wahl der Linienführung der Zugangsbauwerke (Rampe, Schacht),
- durch technische Massnahmen (Abdichtungen).

Durch eine geeignete Kombination dieser Massnahmen können nachteilige Auswirkungen auf Mineralquellen und Thermen vermieden werden. Für Etappe 2 SGT werden Konzepte für den Schutz von Mineralquellen und Thermen erarbeitet. Das Thema der Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen ist auch ein Kriterium der Raumplanung und wird in Etappe 2 SGT explizit berücksichtigt.

### **Beurteilung des ENSI**

Die Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen sind bei der Platzierung der geologischen Tiefenlager im sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 2 SGT zu berücksichtigen. Den Hinweis auf die bisher durchgeführten und weiter geplanten Arbeiten sowie auf die Möglichkeiten, den Konflikten zu begegnen, beurteilt das ENSI als angemessen.

### *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation (PI-4)*

#### **Angaben der Nagra**

Als unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation werden natürliche Tracerprofile durch die Wirtgesteine und die umgebenden Gesteinsabfolgen, Hinweise auf Grundwasser-Stockwerkbau (d.h. eigenständige Ausbildung der Grundwassersysteme ober- und unterhalb von Grundwasserstauern) sowie anomale hydraulische Drücke betrachtet.

Natürliche Tracerprofile liegen aus allen Wirtgesteinen vor. Diese sind konsistent mit den sehr geringen Durchlässigkeiten, welche zur Auswahl dieser Wirtgesteine geführt haben und sind ebenfalls konsistent mit der dekompaktionsbedingten Durchlässigkeitserhöhung im oberflächennahen Bereich. Für Etappe 2 SGT wird die Datenbasis noch erweitert, indem an älterem Kernmaterial aus Zeiten vor der Entwicklung dieser Methode Chloridprofile gemessen werden.

In der Nordschweiz und am Wellenberg ist ein grossräumig ausgebildeter Stockwerkbau nachgewiesen. Für Etappe 2 SGT werden die seit der letzten hydrogeologischen Synthese in Fremdbohrungen erhobenen hydrogeologischen und hydrochemischen Daten in den bestehenden Datensatz integriert und ausgewertet.

Die Messung hydraulischer Drücke ist in sehr geringdurchlässigen Gesteinen messbedingt mit grösseren Ungewissheiten behaftet. Es liegen aus allen Wirtgesteinen Messungen aus Tiefbohrungen vor. Diese werden für Etappe 2 SGT gesamthaft ausgewertet und bewertet.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI misst den unabhängigen Evidenzen der Langzeitisolation grosse Bedeutung zur Extrapolation auf lange Zeiträume und Abstützung von Messwerten zu. Die aus Tracerprofi-

len abgeleiteten Diffusionskoeffizienten sollten mit den in den Dosisberechnungen verwendeten Werten konsistent sein.

#### *Forderung 14*

Die Nagra hat ihre ergänzenden Untersuchungen (Messung von weiteren Chloridprofilen an bestehendem Kernmaterial, Integration neuer hydrogeologischer und hydrochemischer Daten zum Nachweis des Stockwerkbaus, gesamthafte Auswertung von Druckmessungen in den Wirtgesteinen) im sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 2 SGT unter Einbezug der Rahmengesteine ober- und unterhalb der Wirtgesteine zu berücksichtigen.

## 7.2 Hydrogeologische Verhältnisse der Standortgebiete

Die Grundwasserleiter ober- und unterhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind für die Bestimmung der vertikalen hydraulischen Gradienten in den Wirt- und Rahmengesteinen wichtig. Das ENSI hat aus den Profilen in NTB 10-01, Anhang A3.5.1 bis A3.5.5 folgende Zuordnung abgelesen (Tabelle 7-1):

Tabelle 7-1: Grundwasserleiter der Nordschweiz und ihr Vorkommen in den möglichen Standortgebieten.

	Südranden	Zürcher Nord-Ost	Nördlich Lägeren	Bözberg	Jura-Südfuss
Felsenkalk-Formation	RT	RT	RT		
Villigen- Formation		RT	RT	RT	RT
Hauptrogenstein				RT	RT
Wedelsandstein-Formation	LW	LW			
Arietenkalk	LW	LW	LW	LW	LW
Sandsteinkeuper	LT	LT	LT	LT	LT
Oberer Muschelkalk	RT	RT	RT	RT	RT

RT = Regionaler Tiefenaquifer, LT = Lokaler Tiefenaquifer (NTB 10-01, Anhang A3.5.1 bis A3.5.5) bzw. potenziell wasserführende Schichten (NTB 10-01, S. 87). LW = Lokale Wasserführung möglich, Felder ohne Eintrag: Gestein nicht vorhanden. Der Sandsteinkeuper ist in den Standortgebieten unterschiedlich ausgeprägt und umfasst u.a. die Schilfsandstein-Formation, den Gansinger Dolomit und die Stubensandstein-Formation (NTB 02-03).

In der nachfolgenden Beurteilung der Standortgebiete geht das ENSI auf diese Grundwasserleiter näher ein.

### *SMA-Standortgebiet Südranden*

#### **Angaben der Nagra**

Für das Standortgebiet Südranden sind die hydrogeologischen Einheiten dank den Sondierbohrungen Benken und Siblingen, der Grundwasserbohrung Trasadingen und den Auf-

schlussverhältnissen am Südranden gut bekannt. Die regionalen Tiefenaquifere sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie sind detailliert dargestellt. Ausserdem existieren eine Darstellung der hydraulischen Potenziale im Oberen Malm des Standortgebiets Südranden und eine allgemeine hydrogeologische Beschreibung des Gebiets.

Der Obere Malm bildet den nächstgelegenen Aquifer über dem Opalinuston. Durch die mittleren Malmmergel (Schwarzbach-Formation) ist der Aquifer des Oberen Malms in zwei Stockwerke unterteilt.

Die Effinger Schichten und die Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' wurden in der Bohrung Benken untersucht, es ergaben sich geringe hydraulische Durchlässigkeiten. Dabei ist zu beachten, dass diese Gesteine am Südranden weniger tief liegen und teilweise noch von Dekompaktionseffekten betroffen sein können.

Im Rahmen der Geosynthese Zürcher Weinland (heute Zürich Nord-Ost) wurde eine sandig-kalkige Einschaltung in der Wedelsandstein-Formation als hypothetischer Freisetzungspfad in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt, trotz der beobachteten geringen hydraulischen Durchlässigkeit. Aufgrund der nach heutiger Kenntnis geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt für Etappe 2 SGT) stellen diese keine relevanten Exfiltrationspfade dar.

Der Arietenkalk zeigt in der Bohrung Benken, im Einklang mit Untersuchungen in anderen Tiefbohrungen der Nordschweiz, nur sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten. Der Arietenkalk wird nicht als relevanter Exfiltrationspfad betrachtet. Mit dieser Beurteilung im Einklang stehen die natürlichen Tracerprofile in Benken.

Die Stubensandstein-Formation bildet einen potenziellen Exfiltrationspfad: In der Bohrung Siblingen liegt sie als sandiger Dolomitmergel bis sandiger Dolomit vor und ist mit 4.9 m geringer mächtig als in der Bohrung Benken (11.5 m).

Eine Exfiltration über den Muschelkalk wird aufgrund der in Benken beobachteten Hydrogeologie des Sandsteinkeuper (Durchlässigkeit, Hydrochemie) als wenig wahrscheinlich eingestuft. Für Etappe 2 SGT wird für dieses Gebiet eine vertiefte hydrogeologische Auswertung stattfinden.

### **Beurteilung des ENSI**

Als nächstgelegenen Grundwasserleiter über dem Wirtgestein (Opalinuston) nennt die Nagra den Oberen Malm. Die von der Nagra postulierte Ausbildung zweier Stockwerke (Villigen-Formation und Felsenkalk-Formation) mit der Schwarzbach-Formation als Trennschicht kann das ENSI nicht nachvollziehen. Neue Untersuchungen im Rahmen eines grenzüberschreitenden Projekts (INTERREG IIIA 2008, Karte Aquiferbasis und S. 20–21) deuten darauf hin, dass die Schwarzbach-Formation (Lacunosamergel) erst weiter südlich, unter höherer Überdeckung, als grossräumiger Grundwassergeringleiter ausgebildet ist.

#### *Forderung 15*

Die Nagra hat diese Daten bei der Evaluation der regionalen Grundwasserverhältnisse zu berücksichtigen.

**Forderung 16**

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT abzuklären, ob die sandig-kalkigen Einschaltungen in der Wedelsandstein-Formation im Standortgebiet Südranden als grossräumig durchziehende, laterale Exfiltrationspfade einzustufen sind.

Die Nagra erarbeitet derzeit eine entsprechende Synthese der Faziesverhältnisse, welche bis Etappe 2 SGT vorliegen soll.

Das ENSI kann aufgrund der Messwerte hydraulischer Durchlässigkeiten und der vertikal durchgehenden Tracerprofile in Benken und den in den in NTB 02-03 beschriebenen faziellen Untersuchungen nachvollziehen, dass der Arietenkalk im Bereich des Standortgebiets Südranden keinen lateral durchziehenden Exfiltrationspfad darstellt.

Unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston bildet die Stubensandstein-Formation nach Ansicht der Nagra einen potenziellen Exfiltrationspfad. Das ENSI kann diese Annahme nachvollziehen.

**Forderung 17**

Die Nagra stuft eine Exfiltration über den Oberen Muschelkalk wegen des darüber, näher am Wirtgestein liegenden Aquifers der Stubensandstein-Formation als wenig wahrscheinlich ein. Aus Sicht des ENSI sind beide Exfiltrationsszenarien (via Stubensandstein und via Oberem Muschelkalk) weiterhin zu betrachten, bis ergänzende lokale Untersuchungen spätestens in Etappe 3 SGT eine der Hypothesen bestätigen.

Für Etappe 2 SGT plant die Nagra, eine vertiefte hydrogeologische Auswertung vorzunehmen (NTB 10-01, S.89). Das ENSI erwartet, dass die Nagra darin die neuen Erkenntnisse berücksichtigt. Mit diesen von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen kann nach Ansicht des ENSI ein ausreichender Kenntnisstand für Etappe 2 SGT erreicht werden.

*SMA/HAA-Standortgebiet Zürich Nord-Ost*

**Angaben der Nagra**

Für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost sind die hydrogeologischen Einheiten, die regionalen Fliesssysteme sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie dank der Tiefbohrung Benken und weiteren Untersuchungen in der Region gut bekannt. Zudem existiert ein lokales hydrodynamisches Modell. Die Hydrogeologie des Oberen Malms im Raum Hegau – Schaffhausen wurde im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston detailliert untersucht.

Der Obere Malm bildet den regionalen Tiefenaquifer. Zwischen dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Malm und Top der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' liegen die Effinger Schichten. Ein Test in der Bohrung Benken zeigte sehr geringe Durchlässigkeiten.

Im Rahmen der Geosynthese Zürcher Weinland wurde auch eine sandig-kalkige Einschaltung der Wedelsandstein-Formation als hypothetischer Freisetzungspfad in der Sicherheitsanalyse berücksichtigt, trotz der in der Bohrung Benken beobachteten geringen Durchlässigkeit. Auch aufgrund der nach heutiger Kenntnis geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt für Etappe 2 SGT) stellen diese keinen Exfiltrationspfad dar.

Der Arietenkalk zeigte in der Bohrung Benken, im Einklang mit Untersuchungen in anderen Tiefbohrungen der Nordschweiz, nur sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten. Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad. Mit dieser Beurteilung im Einklang stehen die natürlichen Tracerprofile in Benken.

Der Sandsteinkeuper bildet einen potenziellen Exfiltrationspfad. In der Bohrung Benken wurden erhöhte Durchlässigkeiten in der Stubensandstein-Formation festgestellt, und auch die Analysen des gefördert Grundwassers legen nahe, dass es sich um ein Tiefengrundwasserfließsystem von zumindest lokaler Dimension handelt.

Die Wasserwegsamkeit des Oberen Muschelkalks beruht auf der Klüftung in Verbindung mit einer hohen Gesteinsporosität. Aufgrund der Aquifereigenschaften der Stubensandstein-Formation und dem zwischen Opalinuston und Oberem Muschelkalk liegenden gering durchlässigen Gipskeuper scheint eine Freisetzung über den Muschelkalk wenig plausibel.

### **Beurteilung des ENSI**

Die Nagra verweist für den Oberen Malm als regionalen Tiefenaquifer über den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger' neben der Geosynthese (NTB 02-03) auf die internationale Studie INTERREG IIIA 2008. Die erwähnte Studie deckt zwar das geologische Standortgebiet Zürich Nord-Ost nicht ab. Dennoch teilt das ENSI die Einschätzung der Nagra, dass der Obere Malm den Hauptgrundwasserleiter für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost darstellt.

Neben dem von der Nagra erwähnten hydraulischen Test zeigen die in der Bohrung Benken gemessenen Tracerprofile, dass die Kalkbankabfolgen im Bereich der Effinger Schichten kein Grundwasser führen. Aus diesem Grund werden die Effinger Schichten zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich gezählt. Dasselbe gilt für die sandig-kalkigen Einschaltungen in der Wedelsandstein-Formation.

Das ENSI kann aufgrund der Messwerte hydraulischer Durchlässigkeiten und der vertikal durchgehenden Tracerprofile in Benken und den in NTB 02-03, S. 114 beschriebenen faziellen Untersuchungen nachvollziehen, dass der Arietenkalk in den westlichen und zentralen Bereichen des Standortgebiets Zürich Nord-Ost keinen lateral durchziehenden Exfiltrationspfad darstellt.

#### *Forderung 18*

Falls Einlagerungsbereiche im östlichen Teil des Standortgebiets Zürich Nord-Ost vorgeschlagen werden, ist die potenzielle Wasserführung im Arietenkalk zu berücksichtigen oder anhand weiterer Untersuchungen auszuschliessen.

Weiter unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston bildet die Stubensandstein-Formation nach Ansicht der Nagra einen potenziellen Exfiltrationspfad. Das ENSI kann diese Annahme nachvollziehen.

**Forderung 19**

Die Nagra stuft eine Exfiltration über den Oberen Muschelkalk wegen des darüber, näher am Wirtgestein liegenden Aquifers der Stubensandstein-Formation als wenig wahrscheinlich ein. Aus Sicht des ENSI sind beide Exfiltrationsszenarien (via Stubensandstein und via Oberem Muschelkalk) weiterhin zu betrachten, bis ergänzende lokale Untersuchungen spätestens in Etappe 3 SGT eine der Hypothesen bestätigen.

Für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost liegen vor allem durch die Arbeiten zum Entsorgungsnachweis für HAA umfangreiche geologische Kenntnisse vor. Die Nagra hat den Kenntnisstand zur hydrogeologischen Situation des Standortgebiets Zürich Nord-Ost angemessen dargestellt. Mit den von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen (NTB 10-01, S. 199–200: lokales und regionales hydrogeologisches Modell, Datenaustausch und Abstimmung mit dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg) kann nach Ansicht des ENSI ein für Etappe 2 SGT ausreichender Kenntnisstand erzielt werden.

**SMA/HAA-Standortgebiet Nördlich Lägeren****Angaben der Nagra**

Für das Standortgebiet Nördlich Lägeren sind die hydrogeologischen Einheiten aus der Bohrung Weiach gut bekannt. Die regionalen Fließsysteme sowie die Hydrochemie und Isotopenhydrologie wurden detailliert dargestellt. Weitere Grundlagen zur Hydrogeologie des Oberen Malms wurden im Rahmen der Untersuchung der Grundwasserleiter und Böden im Hochrheintal erarbeitet.

Der Obere Malm bildet den regionalen Tiefenaquifer im Hangenden der Wirtgesteine. Unter dem regionalen Tiefenaquifer Oberer Malm folgen die Effinger Schichten und die in Weiach als Sandmergel ausgebildeten Birnenstorfer Schichten. Ein hydraulischer Test in der Bohrung Weiach wies auf sehr geringe Durchlässigkeiten hin. Zu beachten ist, dass die Mächtigkeit der Effinger Schichten nach Westen im Standortgebiet zunimmt, und dass der Ostrand der Gerstenhübel-Schichten nicht genau bekannt ist.

Oben und unten in der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' finden sich wenige Meter mächtige Einschaltungen von kalkigen Eisenoolithen und Kalksteinen. Die in Weiach teilweise in kalkiger Fazies ausgebildeten Schichten zeigten in der Bohrung eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit. Auch aufgrund der nach heutiger Kenntnis meist geringen lateralen Kontinuität dieser Einschaltungen (laufendes Projekt für Etappe 2 SGT) stellen diese keinen relevanten Exfiltrationspfad dar.

Der Arietenkalk ist als gering durchlässiger, rund 3 m mächtiger Kalk mit Mergelhorizonten ausgebildet. Diese geringe Durchlässigkeit steht im Einklang mit den Testdaten der Bohrungen Benken, Riniken und Schafisheim. Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad.

Der Sandsteinkeuper in Weiach ist deutlich weniger durchlässig als in den Bohrungen Benken und Riniken. Aufgrund seiner potenziell sandigen Lithologie kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass er in einem Teil des Gebiets einen Exfiltrationspfad bildet. Der Obere Muschelkalk bildet den regionalen Tiefenaquifer im Liegenden der Wirtgesteine.

## Beurteilung des ENSI

Das ENSI kann nachvollziehen, dass der Obere Malm den regionalen Tiefenaquifer über den Wirtgesteinen Opalinuston und 'Brauner Dogger' darstellt. Im Bereich der Effinger Schichten können Kalkbankabfolgen lokal Wasser führen. Welche Bedeutung die Gerstenhübel-Schichten, welche vor allem im Westteil des Standortgebiets Nördlich Lägeren zu erwarten sind, als lateral durchziehende Grundwasserleiter für die Exfiltration haben, ist aus Sicht des ENSI noch nicht abschliessend geklärt.

### *Forderung 20*

Aufgrund der geplanten seismischen Untersuchungen der Nagra (Reprozessierung vorhandener Daten und Ergänzung der bestehenden 2D-Seismik) ist eine detailliertere Beschreibung des Vorkommens und der lateralen Kontinuität der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten zu erstellen und ihre hydrogeologische Bedeutung als Rahmengestein für das Standortgebiet Nördlich Lägeren darzulegen.

Die Wedelsandstein-Formation ist im Standortgebiet Nördlich Lägeren nicht ausgebildet. Die laterale Kontinuität verschiedener kalkiger und eisenoolithischer Einschaltungen innerhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' ist Gegenstand eines laufenden Projekts der Nagra. Innerhalb der im Standortgebiet Nördlich Lägeren als Wirtgestein für SMA vorgeschlagenen Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' besteht über die kalkigen und eisenoolithischen Einschaltungen die Möglichkeit präferenzierter, horizontaler Fliesswege in Richtung Vorflut.

### *Forderung 21*

Das ENSI fordert für Etappe 2 SGT, dass die hydraulische Bedeutung und die laterale Kontinuität dieser Einschaltungen so weit geklärt sind, dass eine standortspezifische Konzeptualisierung möglich ist. Um einschätzen zu können, ob mit den Lagerebenen diesen Einschaltungen ausgewichen werden kann, ist auch die Evaluation der vertikalen Frequenz der Kalk-einschaltungen notwendig.

Das ENSI kann aufgrund der Messwerte hydraulischer Durchlässigkeiten und der vertikal durchgehenden Tracerprofile in Benken, Riniken und Schafisheim nachvollziehen, dass der Arietenkalk im Bereich des Standortgebiets Nördlich Lägeren keinen lateral durchziehenden Exfiltrationspfad darstellt.

Unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston bildet der Sandsteinkeuper nach Ansicht der Nagra einen potenziellen Exfiltrationspfad. Das ENSI stimmt dieser Einschätzung zu. Die Nagra sieht den Oberen Muschelkalk als regionalen Tiefenaquifer im Liegenden der Wirtgesteine an. Das ENSI stimmt dieser Einschätzung zu.

Die Nagra hat den Kenntnisstand zur hydrogeologischen Situation des Standortgebiets Nördlich Lägeren angemessen dargestellt. Mit den von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen (NTB 10-01, S. 199-200: lokales und regionales hydrogeologisches Modell, Datenaustausch und Abstimmung mit dem Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Auswertung von Profilen natürlicher Tracer) kann nach Ansicht des ENSI ein für Etappe 2 SGT ausreichender Kenntnisstand erzielt werden.

## *SMA/HAA-Standortgebiet Bözberg*

### **Angaben der Nagra**

Für das Standortgebiet Bözberg sind die hydrogeologischen Einheiten aus der Bohrung Riniken und dank der guten Aufschlussverhältnisse gut bekannt. Bezüglich Oberem und Mittlerem Dogger ist zu beachten, dass Riniken noch im Bereich des Fazieswechsels Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' – Hauptrogenstein-Aquifer liegt. Hydrochemische Daten inklusive Beschreibung des Thermalwassers Schinz nach Bad liegen vor. Zusätzliche hydrogeologische Beobachtungen stammen aus dem Eisenbahn- und dem Autobahntunnel am Bözberg.

Der Obere Malm im südöstlichen Standortgebiet wird durch die Effinger Schichten vom potenziellen Tiefenaquifer Hauptrogenstein (dem untersten Aquifer im Hangenden des Opalinustons) abgeschirmt und deshalb nicht als Exfiltrationspfad erachtet.

Der Hauptrogenstein bildet einen potenziellen Exfiltrationspfad im Hangenden des Opalinustons (Kluft- und evtl. Karstaquifer). Die Durchlässigkeit des Hauptrogensteins ist im Gebiet östlich der Sissle mittelgross bis gering. Dies dürfte auf die mergeligen Einschaltungen zurückzuführen sein.

Die Abfolge der Gesteine zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston ist durch kleinräumige Fazieswechsel charakterisiert. Die Gesteine sind oft mergelig oder tonig ausgebildet, umfassen aber auch Sandkalke oder wenige Meter mächtige Eisenoolithe. Über die Hydrogeologie dieser Gesteine ist wenig bekannt. In der Bohrung Schafisheim erwies sich der unterste Abschnitt der Passwang-Formation als sehr gering durchlässig. Im Hauenstein-Basistunnel waren die Abschnitte in diesen Gesteinen trocken resp. es sind keine nennenswerten Wasserzutritte aufgetreten.

Der Arietenkalk des untersten Lias kann in oberflächennaher Lage einen geringmächtigen Kluftaquifer bilden. In der Bohrung Riniken zeigt sich der Lias, im Einklang mit Befunden der Bohrungen Benken, Weiach und Schafisheim, jedoch als sehr gering durchlässig. Der Arietenkalk bildet keinen relevanten Exfiltrationspfad.

Der Sandsteinkeuper bildet einen Exfiltrationspfad im Liegenden des Opalinustons, die potenziellen Grundwasserleiter sind der Gansinger Dolomit und die Schilfsandstein-Formation. Der Obere Muschelkalk bildet einen weiteren potenziellen Exfiltrationspfad im Liegenden des Opalinustons.

### **Beurteilung des ENSI**

Nach Ansicht des ENSI können die Effinger Schichten auf Basis des heutigen Wissens nicht als durchgängig wirksamer Grundwasserstauer angesehen werden, welche den darüber liegenden Oberen Malm abschirmen: Die Effinger Schichten liegen weitgehend in Tiefen < 300 m und können dort dekompaktiert und allenfalls verkarstet sein. Ausserdem sind im Standortgebiet Bözberg mit den Gerstenhübel-Schichten und anderen Kalkbankabfolgen mehrere Schichten ausgebildet, in denen mit erhöhter Wasserführung gerechnet werden muss, wie dies im Umfeld des Standortgebiets Jura-Südfuss beobachtet wurde (Nagra 2010d). Aus Sicht des ENSI ist anzunehmen, dass die Effinger Schichten vor allem in der

Nähe von Exfiltrationsgebieten durchlässig sind und die beiden Grundwasserleiter Hauptrogenstein und Oberer Malm verbinden.

Nach Ansicht des ENSI wie der Nagra ist der Hauptrogenstein als Exfiltrationspfad anzusehen.

#### *Forderung 22*

Die Nagra hat mit den geplanten Synthesearbeiten (Ergänzung hydrogeologischer Datensätze und Modelle) eine genauere Beschreibung der Verhältnisse in den Aquiferen im Standortgebiet Bözberg zu erstellen.

Die sandig-kalkigen und eisenoolithischen Einschaltungen zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston können aus Sicht des ENSI aufgrund der Beobachtungen in Bohrungen und Tunnels als so gering durchlässig gelten, dass ein grossräumiger, lateraler Stofftransport nicht in Betracht gezogen werden muss. Das ENSI kann aufgrund der Befunde aus den Bohrungen Riniken und Schafisheim nachvollziehen, dass der Arietenkalk im Bereich des Standortgebiets Bözberg keinen lateral durchziehenden Exfiltrationspfad darstellt.

Unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston bilden Schilfsandstein und Gansinger Dolomit (Sandsteinkeuper) nach Ansicht der Nagra potenzielle Exfiltrationspfade. Das ENSI stimmt dieser Einschätzung zu. Die Nagra sieht im Oberen Muschelkalk einen weiteren regionalen Tiefenaquifer im Liegenden der Wirtgesteine. Das ENSI stimmt dieser Einschätzung zu.

Mit den von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen (NTB 10-01, S. 199–200: lokales und regionales hydrogeologisches Modell, Auswertung von Profilen natürlicher Tracer, Ausdehnung der Synthesearbeiten nach Westen) kann nach Ansicht des ENSI ein für Etappe 2 SGT ausreichender Kenntnisstand erzielt werden.

#### *SMA-Standortgebiet Jura-Südfuss*

#### **Angaben der Nagra**

Für das Standortgebiet Jura-Südfuss sind die hydrogeologischen Einheiten aus der rund 4 km im Osten liegenden Bohrung Schafisheim, den Untersuchungen in den Bohrungen Oftringen und Küttigen sowie Beobachtungen an Aufschlüssen im angrenzenden Faltenjura bekannt. Hydrochemische Daten inklusive Beschreibungen der Thermalquelle Lostorf und der im Hauensteinbasistunnel angetroffenen Grundwässer liegen vor.

Im Standortgebiet Jura-Südfuss sind zwei Wirtgesteine in Teilbereichen vorgeschlagen, die sich nicht überlappen. Der Obere Malm (Villigen-Formation) bildet den potenziellen Exfiltrationspfad über dem einen Wirtgestein, den Effinger Schichten.

Der Hauptrogenstein bildet im Jura einen Kluft- und untergeordnet Karstaquifer; über seine Bedeutung als regionaler Tiefenaquifer ist wenig bekannt. Hydraulische Tests liegen aus den Bohrungen Gösgen und Oftringen vor. Die hydraulischen Durchlässigkeiten waren gering. In Gösgen war es möglich, eine Wasserprobe zu fördern.

Die Abfolge der Gesteine zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston ist durch kleinräumige Fazieswechsel charakterisiert. In der Bohrung Schafisheim, wo die Abfolge vergleichsweise tonreich ausgebildet ist, sind 40 m der Rahmengesteine direkt über dem Opalinuston mit

zwei Packertests untersucht worden, die sehr geringe Durchlässigkeiten ergaben. Im Hauenstein-Basistunnel waren die Abschnitte in diesen Gesteinen weitgehend trocken. Diese Beobachtungen zeigen, dass diese Gesteine keine grossräumigen Wasserwegsamkeiten bilden.

Von hydrogeologischer Bedeutung ist der Arietenkalk, der gegen Westen mächtiger wird, von rund 2 m im Profil Schafisheim bis zu 11 m im Sammelprofil Zeglingen – Rohr. Es ist damit fraglich, inwieweit die Beobachtungen in der Bohrung Schafisheim für den Arietenkalk des gesamten Gebiets repräsentativ sind. In der Bohrung Schafisheim zeigt der Lias, obwohl im Arietenkalk mehrere offene Klüfte beobachtet wurden, eine sehr geringe Durchlässigkeit. Im Alten Hauensteintunnel und im Hauenstein-Basistunnel sind im Lias nur geringe Wasserzuflüsse aufgetreten. Diese Beobachtungen legen nahe, dass der Arietenkalk kein bedeutender Exfiltrationspfad ist, allenfalls bildet er eine potenzielle Wegsamkeit zu einer in der Nähe gelegenen transmissiven Störungszone.

Der Keuper ist in der Bohrung Schafisheim nur gering durchlässig. Im Gebiet des Baselbieter und Solothurner Faltenjuras bildet der Gansinger Dolomit einen untergeordneten, geringmächtigen Aquifer. Im Hauensteinbasistunnel trat beim Bau aus dem Gansinger Dolomit etwas Wasser aus. Der obere Mittelkeuper mit Schilfsandstein und Gansinger Dolomit ist ein potenzieller, lokaler Tiefenaquifer.

Der Obere Muschelkalk bildet einen regionalen Tiefenaquifer im Liegenden des Opalinustons. In Lostorf, am Nordrand des Standortgebiets, wurde Muschelkalkwasser für balneologische Zwecke mit mehreren Bohrungen gefasst (derzeit nicht genutzt). Auch im Hauensteinbasistunnel konnten im Oberen Muschelkalk Grundwasserproben entnommen werden.

### **Beurteilung des ENSI**

Für das Standortgebiet Jura-Südfuss existiert noch keine gesamtheitliche Interpretation der Potenzialhöhen und Fliesswege in den Hauptaquiferen Oberer Malm (Villigen-Formation), Hauptrogenstein, Gansinger Dolomit und Oberer Muschelkalk. Die Potenziallinienpläne aus NTB 02-03 (Figur 3.6-5 für den Malm-Aquifer, Figur 3.6-6 für den Sandsteinkeuper und Figur 3.6-7 für den Muschelkalk-Aquifer) decken das Gebiet nicht ab. Die hydraulischen Potenziale und die damit verbundenen vertikalen hydraulischen Gradienten in den Wirtgesteinen sind daher nur aus allgemeinen, geometrischen Überlegungen zur Schichtlagerung und den Aufschlussverhältnissen (inkl. unterhalb des Lockergesteinsaquifers ausstreichenden Festgesteinsaquiferen im Aaretal) abzuleiten.

#### *Forderung 23*

Das ENSI fordert von den geplanten hydrogeologischen Synthesearbeiten (Ergänzung hydrogeologischer Datensätze und Modelle) eine detailliertere hydrogeologische Beschreibung für das Standortgebiet Jura-Südfuss.

Das Wirtgestein Effinger Schichten mit den darüber liegenden Gesteinen des Oberen Malms (Villigen-Formation) als nächstgelegenen Aquifer im Nordwesten des Standortgebiets liegt muldenartig unter der Aare als potenziellem regionalem Vorfluter.

Nach Ansicht des ENSI wie der Nagra bildet der Hauptrogenstein inklusive der Birmenstorfer Schichten am Übergang zum Malm einen Grundwasserleiter zwischen den beiden vorge-

schlagenen Wirtgesteinen Effinger Schichten und Opalinuston. Er ist als Exfiltrationspfad unterhalb der Effinger Schichten bzw. oberhalb des Opalinustons anzusehen.

Die sandig-kalkigen und eisenoolithischen Einschaltungen zwischen Hauptrogenstein und Opalinuston können aus Sicht des ENSI aufgrund der Beobachtungen in Bohrungen und Tunnels als so gering durchlässig gelten, dass ein grossräumiger lateraler Stofftransport nicht in Betracht gezogen werden muss.

#### *Forderung 24*

Unterhalb des Opalinustons wird der Arietenkalk von der Nagra nicht als lateral durchziehender Exfiltrationspfad angesehen. Aus Sicht des ENSI sind die Verhältnisse im Bereich des Standortgebiets (Mächtigkeitzunahme gegen Westen, Klüftung) noch zu wenig bekannt, um diese Aussage belastbar treffen zu können. Der Arietenkalk könnte als nächster, nur ca. 30 m unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston liegender Exfiltrationspfad für die vergleichende Beurteilung des Standortgebiets Jura-Südfuss von Bedeutung sein. Das ENSI fordert, dass die Nagra den Arietenkalk als potenziellen Exfiltrationspfad in den sicherheitstechnischen Vergleich einbezieht, solange nicht weitere Erkenntnisse einen Ausschluss dieses Exfiltrationspfads rechtfertigen.

Darunter bilden Schilfsandstein und Gansinger Dolomit (oberer Mittelkeuper) nach Ansicht der Nagra potenzielle Exfiltrationspfade. Das ENSI stimmt dieser Einschätzung zu. Nach Ansicht des ENSI wie der Nagra bildet der Obere Muschelkalk einen regionalen Tiefenaquifer im Liegenden des Opalinustons.

Insgesamt sind die hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Jura-Südfuss im Vergleich zu den anderen Standortgebieten weniger genau bekannt. Die Nagra hat den Bedarf an weiteren Untersuchungen hierzu erkannt und plant, für Etappe 2 SGT Synthesearbeiten u.a. zu hydraulischen Potenzialen und die Erstellung eines hydrogeologischen Regionalmodells (NTB 10-01, S. 199 und 200). Das ENSI erwartet, dass die Resultate dieser Arbeiten in die Unterlagen der Nagra zum sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 2 SGT einfließen.

Die Nagra hat den Kenntnisstand zur hydrogeologischen Situation des Standortgebiets Jura-Südfuss angemessen dargestellt. Mit den von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen (NTB 10-01, S. 199-200: lokales und regionales hydrogeologisches Modell, Auswertung von Profilen natürlicher Tracer, Ausdehnung der Synthesearbeiten nach Westen) kann nach Ansicht des ENSI ein für Etappe 2 SGT ausreichender Kenntnisstand erzielt werden.

#### *SMA-Standortgebiet Wellenberg*

##### **Angaben der Nagra**

Die hydrogeologischen Kenntnisse im Standortgebiet Wellenberg basieren auf mehreren Tiefbohrungen und sind in der Geosynthese Wellenberg detailliert dargestellt. Die Situation wurde im Rahmen eines hydrodynamischen Modells ausgewertet. Es ist zu beachten, dass nach heutiger Planung die Platzierung des Lagers tiefer zu liegen käme als damals geplant. Für Etappe 2 SGT werden auch die Erkenntnisse aus dem Bau des Bahntunnels Engelberg evaluiert.

Die grossräumige Grundwasserzirkulation (inkl. Langzeitentwicklung der Unterdruckzone) wurde anhand eines Regionalmodells untersucht. Die Modellierungen zeigen einen möglichen Abbau der Unterdruckzone bis in rund 30 000 Jahren. Wird das Lager tiefer platziert, ist davon auszugehen, dass es erst später in das sich aufbauende, von der Topographie gesteuerte Fließsystem gelangt und dass damit die Fließzeiten zum Exfiltrationsgebiet verlängert werden (zusätzlich zum Trend geringerer Durchlässigkeiten mit grösserer Tiefe).

Der heutige Kenntnisstand wird als geeignet beurteilt, um für die Testrechnungen die relevanten Exfiltrationspfade zu identifizieren.

### **Beurteilung des ENSI**

Die regionale Grundwasserströmung wird nach heutiger Kenntnis (Regionalmodell unter Berücksichtigung zahlreicher Untersuchungen inkl. Bohrungen) in den nächsten rund 30 000 Jahren wesentlich von der nachgewiesenen Unterdruckzone bestimmt, aus welcher ein Stoffaustrag stark eingeschränkt ist (Diffusion).

#### *Forderung 25*

Für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT hat die Nagra die Unterlagen auf Basis des bestehenden Regionalmodells aufzudatieren, indem sie die heute geplante, tiefere Platzierung der Lagerebenen berücksichtigt.

Für das Standortgebiet Wellenberg liegen durch die Arbeiten zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager und die nachfolgenden Untersuchungen und Studien umfangreiche geologische Kenntnisse vor, die vom ENSI ausführlich beurteilt wurden (HSK 30/9). Der Kenntnisstand ist für Etappe 2 SGT nach Ansicht des ENSI ausreichend.

## 8 Bautechnische Machbarkeit

### Angaben der Nagra

Für die Beurteilung der technischen Machbarkeit prüft die Nagra unter Berücksichtigung der für die Bautechnik relevanten Prozesse und Parameter (NTB 10-01, Tabelle 3.2-1), welche Auslegung vorgesehen werden muss, damit die bautechnische Machbarkeit in den verschiedenen geologischen Standortgebieten gewährleistet werden kann. Dies umfasst die Auslegung der Lagerkammern, die verschiedenen Möglichkeiten zur Anordnung der untertägigen Lagerbauten zur optimalen Nutzung des untertägigen Platzangebots und die verschiedenen Möglichkeiten zur Erschliessung der untertägigen Lagerbauten mit Schacht und/oder Rampe. Anschliessend wird analysiert, welche sicherheitstechnischen Auswirkungen die verschiedenen bautechnischen Auslegungsvarianten haben und ob diese im Hinblick auf die Langzeitsicherheit grundsätzlich akzeptabel sind. So sieht die Nagra für die Sicherung der HAA-Lagerstollen neu die Verwendung von Spritzbeton vor. Schliesslich prüft die Nagra, ob der heutige Kenntnisstand ausreicht, um für die verschiedenen Standortgebiete Varianten zur Auslegung der Anlagen und deren zuverlässige Erstellung belastbar aufzuzeigen sowie die Auswirkungen der verschiedenen Auslegungsvarianten auf die Sicherheit standortspezifisch zu beurteilen.

Die verschiedenen Auslegungsvarianten berücksichtigen ein sehr breites Spektrum an geologischen Bedingungen und decken die in den verschiedenen Standortgebieten vorkommenden Bedingungen auch für sehr vorsichtig gewählte Annahmen ab. Die Auslegungsvarianten können zuverlässig erstellt werden und stellen die Langzeitsicherheit nicht in Frage. Damit ergeben sich eindeutige, positive Aussagen zur bautechnischen Machbarkeit für alle geologischen Möglichkeiten, auch für Situationen, die ausgehend vom heutigen Kenntnisstand sehr ungünstig gewählt wurden. Das heisst, dass mit dem vorhandenen Kenntnisstand grundsätzlich belastbare Aussagen bezüglich der bautechnischen Machbarkeit gemacht werden können und keine Untersuchungen zur Reduktion der Parameterbandbreiten bzw. der Bandbreiten der Konzeptualisierungen im Hinblick auf Etappe 2 SGT notwendig sind. Die von der Nagra für Etappe 2 SGT begonnenen bzw. geplanten ergänzenden Arbeiten dienen dazu, die Unterlagen für die Beurteilung der technischen Machbarkeit zu überprüfen und wo möglich die Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Die Resultate werden in die in Etappe 2 SGT durchzuführende Beurteilung und den Vergleich der technischen Machbarkeit einfließen.

Die für die verschiedenen Standortgebiete vorhandenen Unterlagen zu den geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in den für die Erschliessung der Lagerebenen zu durchfahrenden Gesteinsformationen beurteilt die Nagra unter Berücksichtigung der Ungewissheiten als genügend, um die technische Machbarkeit der untertägigen Erschliessung aufzeigen zu können. Auch wenn die geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse in den verschiedenen Standortgebieten anspruchsvoll sein können, wird mit den vorhandenen Baumethoden (inkl. Vorauserkundung) und der vorhandenen Flexibilität zur Festlegung der detaillierten Linienführung der untertägigen Erschliessung die technische Machbarkeit positiv beurteilt. Mit den für Etappe 2 SGT begonnenen Arbeiten wird es möglich sein, diese Beurteilung weiter zu konsolidieren. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass die Unterlagen es auch erlauben werden, die in Etappe 2 SGT bezüglich der Hydrogeologie notwendi-

gen Abwägungen in Zusammenhang mit der Anordnung der Oberflächeninfrastruktur durchzuführen.

Von den Wirtgesteinen Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums liegen umfangreiche, für die Effinger Schichten ausreichende geotechnische Datensätze betreffend Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften vor. Die Datenlage wird – insbesondere unter der Annahme, dass ein geeigneter Tunnelausbau verwendet werden kann – als genügend betrachtet für die hier vorgenommene Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit. Vom 'Braunen Dogger' fehlen noch entsprechende Datensätze. Aufgrund der lithologischen Ähnlichkeit mit dem Opalinuston und der vergleichbaren Versenkungsgeschichte lassen sich für die tonigsten Abfolgen im 'Braunen Dogger' vergleichbare Parameter ableiten; wegen der tendenziell karbonat- und sandreicheren Fazies ist lokal mit leicht höheren Gesteinsfestigkeiten zu rechnen. In der Geothermiebohrung Schlattingen ist vorgesehen, für Etappe 2 SGT den Datensatz für den 'Braunen Dogger' durch Laboruntersuchungen an frischen Bohrkernen zu ergänzen. Es wird mit einer grösseren Variabilität der felsmechanischen Parameter als im Opalinuston gerechnet.

Die Nagra beurteilt die heute vorhandenen Unterlagen zur Bautechnik, zusammen mit den ergänzenden felsmechanischen Untersuchungen, insgesamt als genügend, um die für Etappe 2 SGT notwendigen Analysen der bautechnischen Machbarkeit bzw. die bautechnischen Vergleiche durchführen zu können.

### **Beurteilung des ENSI**

Hinsichtlich des Kenntnisstands der bautechnischen Machbarkeit und der Abklärung der Notwendigkeit ergänzender Untersuchungen für Etappe 2 SGT orientiert sich die Nagra im Wesentlichen an folgenden Prozessen und Parametern:

- PB-1 Tiefenlage unter Terrain
- PB-2 Gebietsbegrenzende geologische Elemente
- PB-3 Anordnungsbestimmende geologische Elemente
- PB-5 In-situ-Temperaturen
- PB-6 In-situ-Gebirgsspannungen
- PB-7 Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein
- PB-8 Geotechnisch-hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen
- PT-6 Transportrelevante Eigenschaften Interface HAA-Lagerstollen/Wirtgestein (Auswirkungen Spritzbetonausbau)

Das ENSI beurteilt dieses Vorgehen als zielführend, es erfüllt die in ENSI 33/075 festgehaltenen Vorgaben und Anforderungen.

Seit Einreichen der Vorschläge für die geologischen HAA- und SMA-Standortgebiete in Etappe 1 SGT im Oktober 2008 hat die Nagra den Kenntnisstand betreffend dieser Prozesse und Parameter mit zusätzlichen Untersuchungen und Studien weiter vertieft. Sie hat insbesondere die im ENSI-Gutachten (ENSI 33/070) bzw. im Expertenbericht Amann und Löw (2009) aufgeworfenen Kritikpunkte zur bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen

aufgenommen und berücksichtigt. Die Zusammenstellungen im NTB 10-01 geben diesbezüglich einen guten Überblick, sind jedoch sehr allgemein verfasst, was das Studium der entsprechenden Begleitberichte nötig macht (Nagra 2010e,f,g,h,i).

Im Folgenden geht das ENSI im Detail auf die einzelnen Prozesse und Parameter ein. Für die Beurteilung des dargelegten Kenntnisstands und der ergänzenden Untersuchungen zur Bautechnik stützt sich das ENSI auf die Stellungnahme ihres Experten, der Ingenieurgeologie ETH Zürich, ab (Amann und Löw 2011).

#### *Tiefenlage unter Terrain (PB-1)*

Ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der technischen Machbarkeit ist die Tiefenlage der Lagerstollen unter Terrain und damit der Bezug zur vertikalen Spannungsmagnitude. Zusätzlich zu den in Etappe 1 SGT durchgeführten Untersuchungen zur Tiefenlage werden für Etappe 2 SGT die bereits erhobenen seismischen Daten reprozessiert sowie ein umfangreiches Netz neuer seismischer Linien für die HAA-Gebiete Bözberg – Nördlich Lägeren erstellt. Zudem werden Daten aus neuen EWS-Bohrungen, Aufschluss- und Bohrungsinformationen aus dem süddeutschen Raum, Bohrungen Dritter und geologische 3D-Modelle unter Berücksichtigung der kinematischen Plausibilität zur Prüfung des vorhandenen Datensatzes herangezogen. Am Wellenberg werden die bestehenden tektonischen Modelle unter Zugrundelegung neuester erdwissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst. Nach Auffassung des ENSI ist der erreichbare Kenntnisstand für die bautechnische Beurteilung bezüglich Tiefenlage und Vertikalspannungen genügend.

#### *Gebietsbegrenzende und anordnungsbestimmende geologische Elemente (PB-2)*

Gemäss Nagra wird anordnungsbestimmenden geologischen Elementen, wie zum Beispiel lokalen Störungszonen, sedimentären Architekturelementen oder Fremdgesteinseinschlüssen (Wellenberg) beim Bau der Lagerstollen ausgewichen. Sie bestimmen demnach die Anordnung der Lagerkammern. Inwieweit ein geologisches Element anordnungsbestimmend ist, hängt von den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und den lithofaziellen Variabilitäten ab. Als bedeutende Störungszone beurteilt die Nagra solche Störzonen mit stratigraphischen Versatzbeträgen > 20 m. In Etappe 1 SGT wurden anordnungsbestimmende Störungszonen (insbesondere Dichte und Orientierung) mit Hilfe geologischer Karten, Hinweisen aus Fernerkundungsdaten, Aufschlussbeobachtungen und qualitativer tektonischer Überlegungen (u.a. abnehmende Einengung des Alpenvorlandes von West nach Ost) abgeleitet. Versatzbeträge wurden auf Grundlage der Ausstrichlänge und deren erfahrungsgemässen Korrelierbarkeit mit dem stratigraphischen Versatz abgeschätzt. Zudem kamen reflexionsseismische Daten zur Anwendung. In den Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Südranden erlaubt die Interpretation der 3D-Seismik die Erstellung eines flächendeckenden strukturgeologischen Modells. In den übrigen Standortgebieten der Nordschweiz liegen 2-dimensionale seismische Profile vor.

Für Etappe 2 SGT werden die bisherigen Erkenntnisse zur Geometrie und Frequenz lokaler anordnungsbestimmender Störungszonen durch Analysen von Fernerkundungsdaten, weit über die Standortgebiete hinaus, durch weitere ergänzende Felduntersuchungen und Reprozessierung vorhandener seismischer Daten sowie Retrodeformationen von geologischen 2D-Schnitten und 3-dimensionalen geologischen Modellen ergänzt. Für die Region Bözberg – Nördlich Lägeren ist eine ergänzende 2D-Seismikmesskampagne mit rund 300 km Messli-

nien geplant (NAB 11-04), die eine detailliertere Erfassung lokaler Strukturen ermöglichen wird. Das ENSI beurteilt die von der Nagra vorgeschlagenen weiterführenden Untersuchungen für Etappe 2 SGT für die bautechnische Bewertung als notwendig und zielführend.

#### *In-situ-Temperaturen (PB-5)*

Nach NTB 10-01 sind die Erwartungswerte für In-situ-Temperaturen auf Lagerebenen zwischen 400 bis 900 m aufgrund zahlreicher Tiefbohrungen in der Nordschweiz (Schafisheim, Weiach, Riniken, Benken und der EWS-Bohrung Oftringen) gut bekannt und unterliegen mit Ausnahme weniger Anomalien nur geringen regionalen Schwankungen. Im Wellenberg wurden belastbare Temperaturmessungen in den 7 Tiefbohrungen durchgeführt. Die Übertragung der In-situ-Temperaturen aus nahe gelegenen Bohrungen, wie von der Nagra vorgeschlagen, wird vom ENSI für die bautechnischen Vergleiche in Etappe 2 SGT als zulässig erachtet.

#### *In-situ-Gebirgsspannungen (PB-6)*

Bezüglich der räumlichen Anordnung und Standsicherheit der Lagerstollen und -kammern stellen die Orientierung der maximalen und minimalen horizontalen Spannungen sowie die Magnituden des Spannungstensors ein wesentliches bautechnisches Kriterium dar. Die vertikale Spannungsmagnitude, welche sich aus der Tiefenlage der Lagerkammern ableiten lässt, kann als gut gesichert angenommen werden. Spannungsmessungen auf Tiefenlage der geplanten Lagerstollen existieren in der Nordschweiz nur aus der Bohrung Benken. Zudem kann auf zahlreiche Studien über das Spannungsfeld der Nordschweiz zurückgegriffen werden, welche sich auf Bohrlochrandausbrüche, Herdflächenlösungen von Erdbeben und direkte Spannungsmessungen in Bohrlöchern verschiedener Tiefen stützen. Die Nagra erachtet die Kenntnisse über das Spannungsfeld als ausreichend für die Etappe 2 SGT. Zur Überprüfung und Konsolidierung der Annahmen werden alle bisher verfügbaren Daten neu kompiliert, wobei bisher nicht berücksichtigte Daten integriert werden (u.a. Interpretation bzw. Neuauswertung von Bohrlochrandausbrüchen). Gemäss dem Untersuchungsprogramm werden zudem Spannungsmessungen in der Bohrung Schlattigen durchgeführt. Nach Auffassung des ENSI ist die Darlegung des Kenntnisstands und deren Ungewissheiten grundsätzlich nachvollziehbar.

Während bei der verwendeten Methodik zur Schätzung der Spannungen im Bohrloch Benken die minimale horizontale Spannung ( $\sigma_h$ ) direkt abgeschätzt werden kann, existieren bei der Abschätzung der maximalen Horizontalspannung ( $\sigma_H$ ) grosse Ungewissheiten aufgrund der Messmethodik und Interpretation. Grundsätzlich kann die minimale horizontale Spannung und deren Orientierung in der Region Zürich Nord-Ost und Südranden auf Lagerebene als belastbar bezeichnet werden. Dies trifft auf die maximale horizontale Spannung nicht zu. Aufgrund von Bohrlochwandausbrüchen ist von grossen Differenzialspannungen in der horizontalen Ebene auszugehen, was bei der Orientierung der Lagerstollen in Richtung der maximalen Horizontalspannung Auswirkungen auf die Spannungsumlagerungen hat. Wegen der lithostratigraphischen Verhältnisse und Ungewissheiten in der maximalen horizontalen Spannung ist von einer entsprechend grossen Variabilität bzw. einer ungünstigen Annahme in den bautechnischen Analysen auszugehen, wie dies bereits in Nagra 2010g umgesetzt und diskutiert wurde.

Die Übertragbarkeit der Spannungsorientierung aus der Bohrung Benken auf die anderen Nordschweizer Standortgebiete unterliegt Ungewissheiten, was allerdings auf die vergleichende Beurteilung der Standorte aus bautechnischer Sicht in Etappe 2 SGT wenig Einfluss hat. Entscheidend hingegen sind die Spannungsverhältnisse ( $\sigma_h/\sigma_v$  bzw.  $\sigma_H/\sigma_v$ ) und Magnituden der horizontalen Spannungskomponenten, die je nach Tiefenlage unter Terrain und Wirtgesteinen in den jeweiligen Standortgebieten variieren können. Diese Variationen und Ungewissheiten können für die relativ homogenen Wirtgesteine (Opalinuston und 'Brauner Dogger') recht gut charakterisiert werden. Dies gilt weniger für die Spannungsverhältnisse in kompetenteren Sedimentgesteinen der Effinger Mergel, welche von jenen in den sehr tonreichen Sedimenten abweichen können. Die Wirtgesteine am Jura-Südfuss wurden zudem über den Trias-Evaporiten abgesichert, wodurch sich die Spannungsverhältnisse gegenüber den Standortgebieten im Tafeljura ändern können, wie die Messungen in den Nagra-Bohrungen der Nordschweiz gezeigt haben (NTB 99-08). Das ENSI erwartet deshalb, dass dieser Aspekt im Standortgebiet Jura-Südfuss noch vertiefter analysiert wird (insbesondere mögliche Spannungsheterogenitäten aufgrund lithologischer Unterschiede). Dazu sollten alle Indikatoren zu Spannungsorientierungen und Magnituden aus bestehenden Bohrungen und Untertagebauwerken im Bereich des Standortgebiets Jura-Südfuss detailliert aufgearbeitet werden.

Das ENSI ist grundsätzlich der Auffassung, dass unter Berücksichtigung der ergänzenden Untersuchungen und einer für die Bautechnik sinnvoll gewählten Variabilität<sup>2</sup> der Spannungsverhältnisse (horizontale Komponenten) in allen Standortgebieten die bautechnische Beurteilung durchführbar ist<sup>3</sup>. Die von der Nagra vorgeschlagenen Untersuchungen zur Konsolidierung und Prüfung sind stufengerecht und sinnvoll.

#### *Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein (PB-7)*

Von den Wirtgesteinen Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums liegen umfangreiche, für die Effinger Schichten ausreichende Datensätze von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften aus felsmechanischen Laboruntersuchungen vor. Dieser Datensatz der Gesteinseigenschaften wird in Anbetracht der in NTB 10-01 vorgeschlagenen Möglichkeiten bei der Ausbruchsicherung vom ENSI als genügend betrachtet. Für den 'Braunen Dogger', dessen felsmechanische Eigenschaften bisher aufgrund der lithologischen Ähnlichkeiten von Opalinuston übernommen wurden (jedoch mit der Berücksichtigung einer höheren Variabilität), werden für Etappe 2 SGT an Bohrkernen der Bohrung Schlattingen zusätzliche felsmechanische Untersuchungen ausgeführt. Das ENSI erachtet diese Untersuchungen als

---

<sup>2</sup> Die Variabilität der Spannungsmagnituden ist vor allem auch zusammen mit der Variabilität der Gesteins- bzw. Gebirgseigenschaften zu sehen. Ungünstige Spannungsmagnituden (hohe Spannungen) bei gleichzeitig ungünstigen felsmechanischen Kennwerten sind besonders bei der Bewertung der Gefährdungsbilder bzw. unerwünschter Ereignisse wesentlich.

<sup>3</sup> Aus Sicht der vergleichenden Beurteilung der Standorte (insbesondere HAA) ist für Etappe 2 SGT vor allem die Variation der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain wesentlich. Diesbezügliche Informationen sind heute belastbar und werden in den weiteren Untersuchungen für Etappe 2 SGT konsolidiert.

erforderlich. Sie sind auch für die Quantifizierung der natürlichen Variabilitäten<sup>4</sup> und die Überprüfung der Übertragbarkeit der felsmechanischen Kennwerte auf die anderen Standortgebiete besonders wertvoll<sup>5</sup>.

Das ENSI weist darauf hin, dass es sich bei diesen felsmechanischen Kennwerten aus Laboruntersuchungen nicht um Gebirgseigenschaften, sondern um reine Gesteinseigenschaften handelt. Um die eventuell verminderte Gebirgsfestigkeit durch das etwaige Auftreten massstabs- bzw. bautechnisch relevanter Trennflächen abzuschätzen, erwartet das ENSI, dass alle verfügbaren Daten zu kleinmassstäblichen Trennflächensystemen systematisch aus allen Standortgebieten kompiliert werden (wie in Nagra 2009 bereits begonnen). Diese Daten basieren neben Geländeaufschlüssen (an denen Oberflächeneffekte von systematischen Kluftsystemen differenziert werden müssen) auf Bohrlochaufnahmen und Dokumenten zu früher ausgeführten Tunnelbauwerken (wie z.B. Bözberg-Autobahntunnel). Diese Untersuchungen sollten insbesondere für die SMA Standortgebiete in tektonisch beanspruchten Gebieten (Jura-Südfuss, Wellenberg) wertvolle Zusatzinformationen für den Standortvergleich in Etappe 2 SGT liefern.

#### *Geotechnisch- hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen (PB-8)*

Die Nagra beurteilt im NTB 10-01 die aktuell vorhandenen Unterlagen zu den geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in den überlagernden Gesteinsformationen als genügend für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit. Die bisherigen hydrogeologischen Kenntnisse werden für Etappe 2 SGT durch vorhandene hydrogeologische Datensätze der Nordschweiz und aus Süddeutschland sowie durch hydrodynamische Modellrechnungen ergänzt. Für die Zugangsbauwerke in den Standortgebieten der Nordschweiz liegt eine erste qualitative Beschreibung der Gefährdungsbilder vor (Nagra 2010a).

Das ENSI erachtet die Darlegung der geologischen und bautechnischen Grundlagen zu den Zugangsbauwerken als nachvollziehbar. Besonders die zusammenfassenden Berichte über bautechnische Erfahrungen in ähnlichen oder übereinstimmenden geologischen Formationen (Nagra 2010e,i) wird als wesentlich für die Auslegung der Zugänge als auch die vergleichende Beurteilung erachtet.

Die von der Nagra in NTB 10-01 vorgeschlagene geotechnische Beschreibung der Zugangsvarianten, basierend auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus Tunnelbauwerken der Nordschweiz unter Einbezug der hydrogeologischen Erkenntnisse, ist zielführend und kann auf Basis der vorhandenen und neu erhobener Kenntnisse erstellt werden. Wenn auch nicht explizit im NTB 10-01 erwähnt, geht das ENSI davon aus, dass für die Vergleichbarkeit der Standortgebiete für jede Zugangsvariante eine qualitative Risikoanalyse bezüglich geologischer, geotechnischer, hydrogeologischer und baubetrieblicher Gefährdungsbilder durchgeführt wird.

---

<sup>4</sup> Für die bautechnische Beurteilung erachtet das ENSI die Variabilität der Gesteinseigenschaften als relevant. Im Fall des Opalinustons ist die Standardabweichung der einaxialen Druckfestigkeit signifikant ( $\pm 20\%$ ), was bei der vergleichenden Beurteilung von sicherheitsrelevanten Gefährdungsbildern mit zunehmender Tiefe zu berücksichtigen ist.

<sup>5</sup> Siehe auch Antwort von ENSI/KNE auf Frage 46b des Technischen Forums Sicherheit.

### *Beurteilung der technischen Machbarkeit der SMA-Lagerkavernen*

Als grundlegend für die Auslegung der Lagerkavernen gilt eine ausreichende Stabilität für Bau und Betrieb sowie eine geringe Beeinträchtigung der umgebenden Wirtgesteine. Dies verlangt beschränkte Deformationen während des Baus und Betriebs zur Vermeidung grossräumiger Auflockerungen (grossräumig bedeutet hier, dass ein signifikanter Teil der Transportbarriere beeinträchtigt ist). Zudem müssen die Bedingungen für die Einlagerung und für eine allfällige Rückholung erfüllt sein. Unter Einbezug von Erfahrungen im Tunnelbau, geomechanischen Modellrechnungen und Bewahrung der Flexibilität bezüglich Kavernenform, Kavernengrösse, Sicherungsmittel und Vortriebsmethode beurteilt die Nagra die technische Machbarkeit für das Spektrum der erwarteten geomechanischen Bedingungen als gegeben.

Die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit von SMA-Lagerkavernen wurde bereits in Etappe 1 SGT vom ENSI und seinen beigezogenen Experten vorgenommen und ausführlich kommentiert (ENSI 33/070). Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Auslegung und Abschätzung potenzieller Gefährdungsbilder, basierend auf Erfahrungen bei ähnlichen geomechanischen Randbedingungen, erachtet das ENSI als wesentliche Grundlagen für die Etappe 2 SGT.

Für eine vergleichende Beurteilung der Standorte in Etappe 2 SGT erachtet das ENSI weiterführende Untersuchungen für eine Verbesserung des Detaillierungsgrades der geologischen Baugrundmodelle und eine bautechnische Risikoanalyse als erforderlich. Diese Baugrundmodelle können insbesondere aufgrund der von der Nagra vorgeschlagenen ergänzenden Untersuchungen sowie einer expliziten Berücksichtigung folgender ingenieurgeologischen Elemente verbessert werden:

- Systematische Charakterisierung kleinmassstäblicher Trennflächen
- Erfassung bautechnisch relevanter sedimentärer Heterogenitäten und der Anisotropie
- Abschätzung bautechnisch relevanter kleiner Störungszonen

Die qualitative bautechnische Risikoanalyse umfasst die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer denkbaren Gefährdung und des Schadenausmasses mit und ohne Massnahmen. Im vorliegenden Fall wird eine Risikoanalyse je Wirtgestein bzw. Standortgebiet unter Einbezug der Variabilität der Gebirgseigenschaften (Heterogenitäten, Trennflächensysteme), In-situ-Spannungen, Kavernenquerschnittsgrössen, Vortriebsmethoden, Massnahmen und verbleibendem Restrisiko empfohlen. Die Auswirkungen unerwünschter geotechnischer Ereignisse (z.B. Verbrüche) auf die Langzeitsicherheit sollten systematisch überprüft werden.

### *Beurteilung der technischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen*

Für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen wurden von der Nagra bereits in der Etappe 1 SGT weitreichende Konzepte zur Bewältigung der bautechnischen Schwierigkeiten besonders auch bei Überlagerungen grösser 650 m vorgestellt und in Nagra 2010g felsmechanisch analysiert bzw. in Nagra 2010h vordimensioniert. Das Referenzkonzept sieht einen kreisrunden Querschnitt mit entsprechendem Lichtraumprofil, ausreichende Flexibilität bezüglich der Sicherungsmittel und Baumethoden sowie Möglichkeiten zur Beherrschung der Längsläufigkeit von Wasser in der Spritzbetonverkleidung vor (siehe Figur 8-1). Die felsmechanischen Analysen berücksichtigen den Kenntnisstand zu PB-1 und

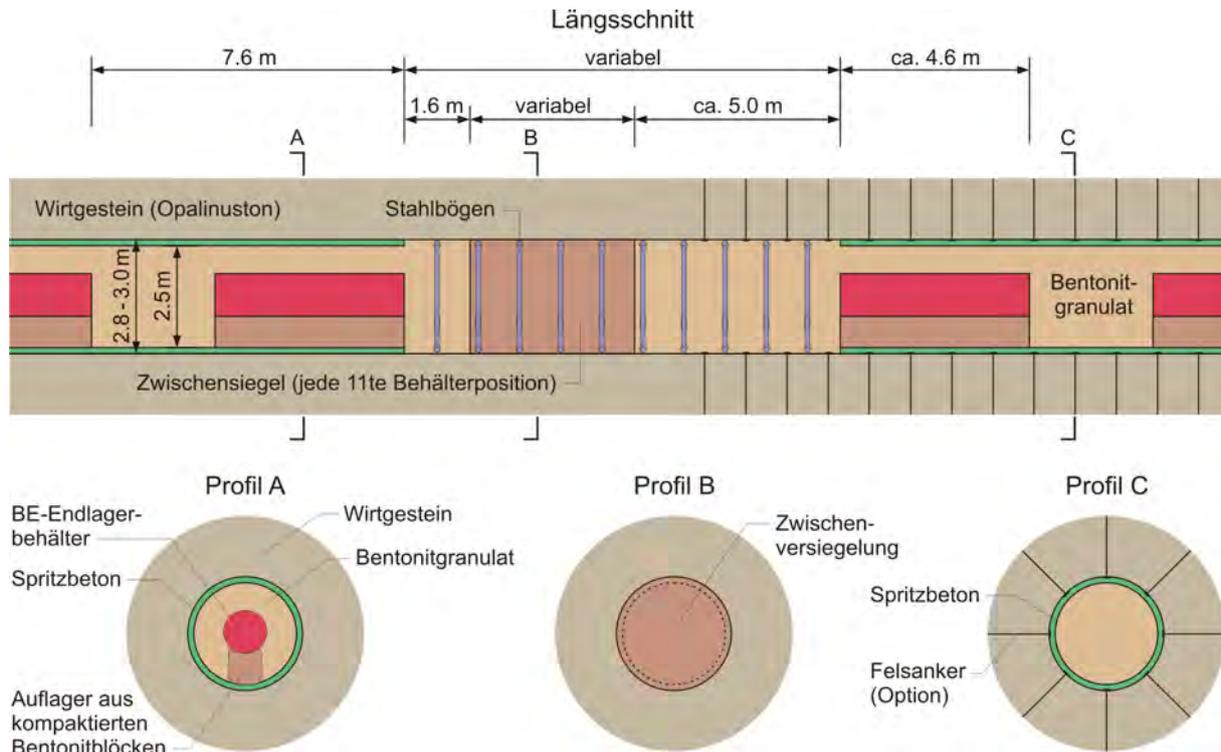
PB-6, aber nicht die tektonischen Trennflächen und daraus resultierenden Gebirgseigenschaften. Orientierende felsmechanische Untersuchungen werden für Etappe 2 SGT weitergeführt und vertieft bzw. dem Kenntnisstand angepasst.

Das ENSI erachtet die von der Nagra dargelegte Vorgehensweise bei der Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit für die Etappe 2 SGT als zielführend. Für eine vergleichende Beurteilung der HAA-Standorte in Etappe 2 SGT erachtet das ENSI eine bautechnische Risikoanalyse, mit entsprechenden Untersuchungen der Gebirgseigenschaften und der Auswirkungen unerwünschter Ereignisse (z.B. Verbrüche) auf die Langzeitsicherheit, als erforderlich.

#### *Auswirkungen des Spritzbetonausbaus auf die Sicherheit des HAA-Lagers (PT-6)*

Nach Angaben der Nagra werden die Porenwässer des zementhaltigen Spritzbetonausbaus trotz Verwendung einer «Niedrig-pH»-Rezeptur (d.h. pH-Wert im Bereich von 10 bis 11 anstatt 12.5 bis 13.5 wie für konventionelle Rezeptur, vgl. NAB 07-02) nicht im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Bentonitverfüllung und dem Wirtgestein Opalinuston sein und zu einer lokal begrenzten Veränderung der angrenzenden Bentonitverfüllung und des Opalinustons im direkten Umfeld der BE/HAA-Lagerstollen führen (pH-Fahne). Die Wechselwirkungsprozesse zwischen Zement und Bentonit bzw. Opalinuston werden in NAB 10-17 im Detail diskutiert. Die sicherheitsrelevanten Auswirkungen fasst die Nagra wie folgt zusammenfassen:

- Die hydraulische Durchlässigkeit des zementhaltigen Spritzbetonausbaus wird im Vergleich zum Opalinuston bzw. der Bentonitverfüllung erhöht sein (Rissbildung, Degradation, Erhöhung der Porosität).
- Die an den zementhaltigen Spritzbetonausbau angrenzende Bentonitverfüllung wird durch die pH-Fahne langsam und lokal degradiert. Die Mächtigkeit dieser Zone mit stark degradiertem Bentonit ist gering (Zentimeterbereich), insbesondere auch weil der Einsatz von «Niedrig-pH»-Zement vorgesehen ist. Das Quellvermögen wird in dieser Zone aber lokal stark reduziert, und es wird konservativ angenommen, dass auch das Radionuklid-Rückhaltevermögen (Sorption) in dieser Zone gegenüber dem ursprünglichen Bentonit reduziert ist. In grösserem Abstand zum Spritzbetonausbau findet nur eine Umwandlung von Na- zu Ca-Bentonit statt, was zwar das Quellvermögen der Verfüllung etwas reduziert, aber keine Auswirkungen auf das Radionuklid-Rückhaltevermögen hat. Für den Opalinuston gelten sinngemässe Aussagen, allerdings sind die sicherheitstechnischen Auswirkungen aufgrund der weit grösseren Mächtigkeit der geologischen Barriere nicht von Belang (vgl. NTB 10-01, Kapitel 6.2.3).
- Zwischen der durch die pH-Fahne degradierten bzw. veränderten Zone und der thermisch/chemisch veränderten Zone in der Umgebung der BE/HAA-Behälter bleiben die vorteilhaften Eigenschaften der Bentonitverfüllung für längere Zeit praktisch unverändert.



Figur 8-1: Konzept für den Ausbau der HAA-Lagerstollen mittels Spritzbeton (NTB 10-01, S. 122).

Bezüglich des Transports längs der BE/HAA-Lagerstollen hält die Nagra fest, dass allfällige axiale Wasserflüsse entlang des Interfaces Lagerstollen/Wirtgestein durch die Zwischenversiegelungen praktisch unterbunden werden (vgl. Figur 8-1), da diese Zwischenversiegelungen optimal ausgestaltet werden können (kein «Liner», bei Bedarf Verwendung von kompaktierten Bentonitblöcken für einen grossen Teil des Querschnitts) und optimale Bedingungen für die Selbstabdichtung der Auflockerungszone bestehen. Wird trotzdem ein lateraler Transport entlang der BE/HAA-Lagerstollen unterstellt, so zeigen die Freisetzungsberechnungen der Nagra, dass selbst im Fall einer hypothetisch hohen hydraulischen Durchlässigkeit des Interfaces bzw. der Auflockerungszone von  $10^{-8}$  m/s die Änderung der berechneten Dosen vernachlässigbar sind (vgl. Dosen in NTB 10-01, Figur 6.2-3). Für Etappe 2 SGT plant die Nagra den Einfluss der baulichen Auslegung auf die Langzeitsicherheit erneut zu beurteilen und die entsprechenden Resultate in den provisorischen Sicherheitsanalysen und beim sicherheitstechnischen Vergleich zu berücksichtigen.

Für die Beurteilung des dargelegten Kenntnisstands und der ergänzenden Untersuchungen zu den Auswirkungen des Spritzbetonausbaus auf die Langzeitsicherheit des HAA-Lagers stützt sich das ENSI auf die Stellungnahme ihrer Expertin, Dr. Annette Johnson, EAWAG, ab.

Das ENSI beurteilt das Vorgehen der Nagra, die Auswirkungen der Auslegungsvariante HAA-Lagerstollen mit einem flächendeckenden Spritzbetonausbau und Zwischenversiegelung (NAB 10-17) konzeptionell darzulegen, als stufengerecht. Das Auslegungskonzept der Zwischenversiegelungen muss dabei in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung im Detail ausgearbeitet und anhand von Demonstrationsexperimenten bestätigt werden.

In NAB 10-17 werden wichtige Prozesse wie z.B. die Mineralumwandlungen der Bentonitverfüllung und deren Auswirkungen auf das Quellverhalten, die hydraulische Durchlässigkeit und die Sorptionseigenschaften der Bentonitverfüllung und des Opalinustons diskutiert. Die Auswirkungen werden von der Nagra anhand von Massenbilanzen abgeschätzt.

In der Literatur (Metcalf und Walker 2004; Savage et al. 2002; Wang et al. 2007) werden unterschiedliche Reaktionsgleichungen für die Auflösung von Montmorillonit und Ausfällungen von Sekundärmineralen verwendet. Je nachdem welche Mineralphasen für die Massenbilanzen verwendet werden, können die Auswirkungen unterschiedlich gross sein. Zusätzlich können aus Sicht des ENSI weitere Faktoren wie die erhöhte Temperatur, der Chloridgehalt im Opalinustonporenwasser und organische Moleküle des Betonverflüssigers einen Einfluss auf die vorkommenden Prozesse haben. Dabei ist auch der Einfluss auf die Gasdurchlässigkeit zu untersuchen. Nach Auskunft der Nagra werden für die einzelnen Komponenten im HAA-Nahfeld Anforderungen auf der Basis der Sicherheitsfunktionen im Rahmen des «Requirements Management» für das Rahmenbewilligungsgesuch definiert. Das Vorgehen, mit Massenbilanzen und Szenarienanalysen die Auswirkungen abzuschätzen und mit den definierten Anforderungen zu vergleichen, erachtet das ENSI als zielführend. Das ENSI erwartet für Etappe 2 SGT, dass die Nagra die Massenbilanzen unter Berücksichtigung verschiedener Phasenkombinationen durchführt und die oben zusätzlich genannten Einflüsse diskutiert und die möglichen Veränderungen an den Nahfeldbarrieren in den provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt.

### **Zusammenfassende Beurteilung des ENSI**

Die Darlegung des bisherigen Kenntnisstands zur Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit ist in NTB 10-01 nachvollziehbar dargestellt und in zahlreichen Begleitberichten ausführlich dokumentiert und bezüglich Ungewissheiten diskutiert. Die geplanten oder laufenden Untersuchungen werden als sinnvoll und stufengerecht beurteilt und führen zu einem genügend belastbaren Kenntnisstand bezüglich der felsmechanischen Gesteinseigenschaften aller Standortgebiete.

#### *Forderung 26*

Aus bautechnischer Sicht fordert das ENSI, dass für Etappe 2 SGT die geologischen und geotechnischen Informationen in gebietspezifische und formationsspezifische Baugrundmodelle und Gebirgsbeschreibungen überführt werden. Besonders für die SMA-Standorte bzw. tektonisch beanspruchte Standorte sind alle vorhandenen Informationen zu bautechnisch relevanten Trennflächen systematisch zu ergänzen. Bezüglich der In-situ-Gebirgsspannungen sind alle Indikatoren zu Spannungsorientierungen und Magnituden aus bestehenden Bohrungen detaillierter aufzuarbeiten und ihre Ungewissheiten aufzuzeigen.

Für den bautechnischen Vergleich der SMA- und HAA-Standortgebiete und der Erschliessungsbauwerke fordert das ENSI, dass bautechnische Risikoanalysen durchgeführt und die Resultate in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden.

Zusammenfassend kommt das ENSI zum Schluss, dass die vorgelegten Daten und Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen und den Forderungen des ENSI ausreichen, um belastbare Aussagen zur bautechnischen Machbarkeit für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT machen zu können.

## 9 Geochemische Bedingungen

Die Nagra hat gemäss ENSI 33/075 die in den provisorischen Sicherheitsanalysen verwendeten geochemischen Bedingungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu begründen. Für die Wirtgesteine ist die Ableitung der Mineralogie und der chemischen Zusammensetzungen der Porenwässer (u.a. Eh-Bereich, pH-Wert und Ionenstärke) in den einschlusswirksamen Gesteinsbereichen darzulegen und geochemische Kennwerte wie die Sorptions- und Diffusionskoeffizienten der sicherheitsrelevanten Radionuklide zu bestimmen und deren Bandbreiten (obere und untere Eckwerte) zu begründen.

Für das standardisierte Parametervariationsverfahren sollen neben den geochemischen Parametern für den Referenzfall mindestens folgende geochemische Parametervarianten verwendet werden:

- Gegenüber dem Referenzfall ungünstige nuklidspezifische Diffusionskoeffizienten
- Gegenüber dem Referenzfall erhöhte nuklidspezifische Löslichkeitslimiten im Nahfeld
- Gegenüber dem Referenzfall verringerte Sorptionskoeffizienten im Nah- und Fernfeld

In diesem Kapitel beurteilt das ENSI, ob der aktuelle Wissensstand zu den geochemischen Bedingungen belastbare Aussagen für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT erlaubt und ob die ergänzenden Untersuchungen bezüglich geochemischer Bedingungen zielführend sind.

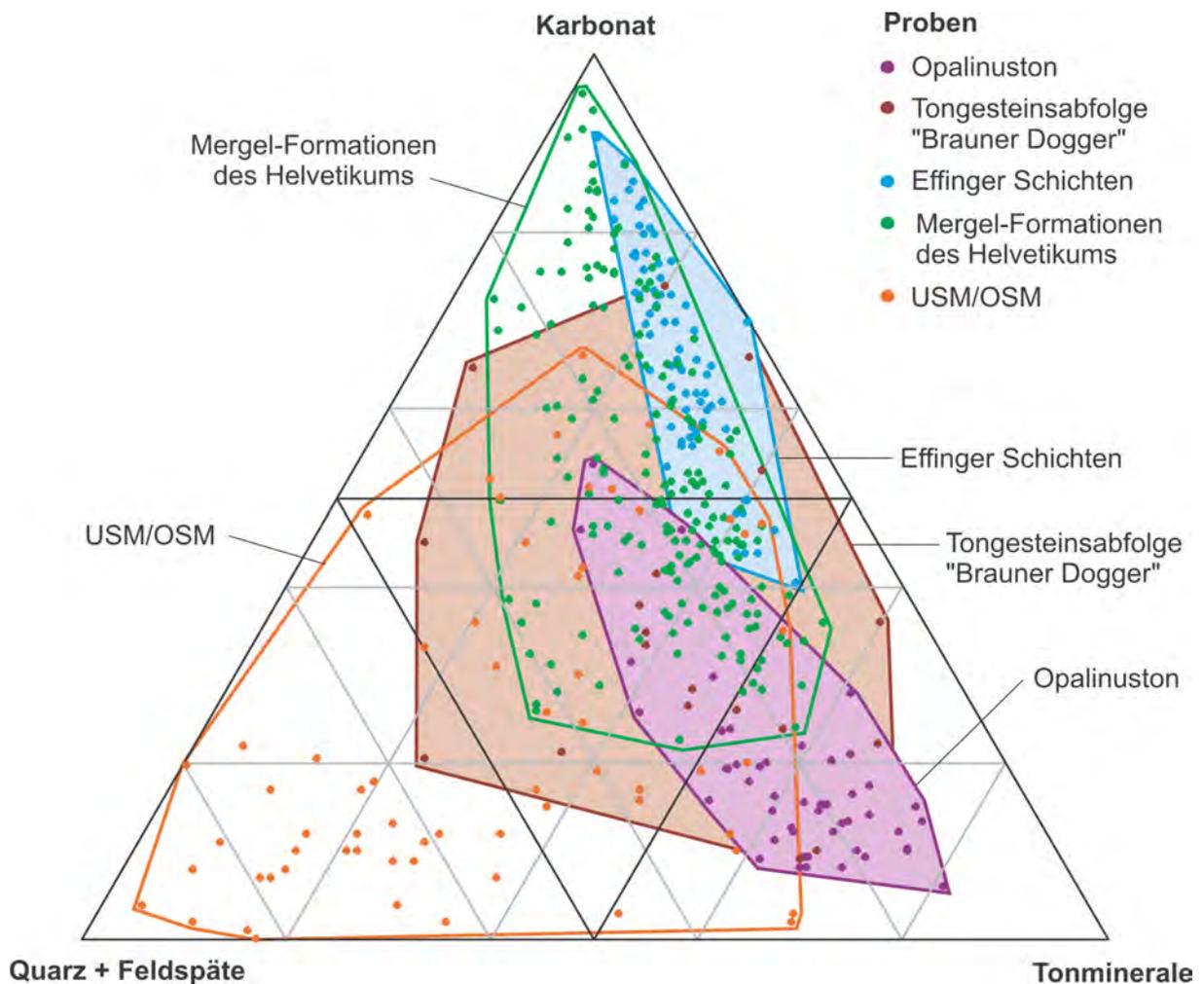
In den Kapiteln 9.1 bis 9.4 werden die Prozesse und Parameter für die Geosphäre (Mineralogie: PG-15, pH: PG-16, Redoxbedingungen: PG-17, Salinität: PG-18, mikrobielle Prozesse: PG-19, Kolloidfiltration: PG-20, Porosität: diffusionszugängliche Porosität PG-10, Diffusionskoeffizienten für WG/EG: PG-22) und in den Kapiteln 9.5 bis 9.7 die Prozesse und Parameter für das Nahfeld (Löslichkeitslimiten im Nahfeld: PT-3, Sorptionskoeffizienten im Nahfeld: PT-4) beschrieben.

### 9.1 Mineralogie der Wirt- und Rahmengesteine

#### Angaben der Nagra

Von allen Wirtgesteinen liegen umfangreiche mineralogische Analysen vor, einschliesslich tonmineralogischer Detailanalysen (Figur 9-1). Eine vollständige Kompilation dieser Daten ist in einem Arbeitsbericht (NAB 10-19) dokumentiert.

Für die Herleitung wirtgesteinsspezifischer Sorptionskoeffizienten werden u.a. die Tonmineralgehalte inklusive deren Bandbreiten der einzelnen Wirtgesteine verwendet. In den Datensätzen werden die Tonminerale Illit, Kaolinit, Smektit, Chlorit, Wechsellagerungen Illit/Smektit und Wechsellagerungen Chlorit/Smektit erfasst, wobei nicht in jeder Probe alle Minerale quantifiziert wurden. Unter Tonmineralgehalt wird somit die Summe der Massenkonzentrationen (Gew.-%) der vorgenannten Minerale verstanden (Nagra 2010c, S. 7). Für die Testrechnungen wurden die Werte für den Tonmineralgehalt der einzelnen Wirtgesteine gemäss Tabelle 9-1 verwendet.



Figur 9-1: Mineralogische Zusammensetzung der potenziell möglichen sedimentären Wirtgesteine (Tonminerale = Summe der Schichtsilikate + Akzessorien, gemäss Figur 4.4-1 in NTB 08-04, S. 257).

Tabelle 9-1: Für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten verwendete Tonmineralgehalte der Wirtgesteine (gemäss Tabelle 2 in Nagra 2010c, S. 7).

Wirtgestein	Referenzwert (Gew.-%)	Unterer Eckwert (Gew.-%)	Oberer Eckwert (Gew.-%)
Opalinuston	60	40	80
'Brauner Dogger'	40	20	60
Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger'	10	5	15
Effinger Schichten	30	25	50
Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten	10	5	25
Mergel-Formationen des Helvetikums	30	5	60

Die vorhandenen Unterlagen sind aus Sicht der Nagra geeignet, um daraus die Sorptionskoeffizienten für die Testrechnungen abzuleiten. Für Etappe 2 SGT wird der mineralogi-

sche Datensatz der Wirtgesteine 'Brauner Dogger' (Bohrungen Weiach und Benken), Opalinuston (Riniken, Schafisheim, Weiach) und Effinger Schichten (Weiach) mit den verfügbaren Bohrkernen aus früheren Nagra-Bohrungen verbessert. Bezüglich der Effinger Schichten ermöglichen die Kerne der Bohrung Gösigen den Datensatz zu ergänzen. Aus der neuen Geothermiebohrung Schlattigen werden Bohrkern der Abfolge 'Brauner Dogger' – Opalinuston für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen. Es werden ergänzende Analysen an Bohrkernen des 'Braunen Doggers' durchgeführt. Diese werden in die konsolidierte Datenbasis für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT einfließen.

### **Beurteilung des ENSI**

Das ENSI hat die von der Nagra gewählten Referenzwerte sowie die unteren und oberen Eckwerte für den Tonmineralgehalt der Wirtgesteine für die Testrechnungen geprüft und bewertet sie als nachvollziehbar und plausibel.

Das ENSI beurteilt den aktuellen Wissensstand zur Mineralogie des Opalinustons und der Mergel-Formationen des Helvetikums als ausreichend, um provisorische Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT durchzuführen.

Bei der Kompilation der Gesteinsparameter (NAB 10-19) wird nicht unterschieden zwischen den tonigen Abfolgen und den Architekturelementen im 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten. Die Bimodalität (tonige Abfolgen und Architekturelemente), die in Tabelle 9-1 vorgeschlagen wird, ist in Figur 9-1 nicht sichtbar. Das ENSI beurteilt die von der Nagra vorgenommene Einteilung für die Testrechnungen als grundsätzlich plausibel.

#### *Forderung 27*

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen hat die Nagra die Bandbreiten für die mineralogischen Parameter in den tonigen Abfolgen und sandig/kalkigen Architekturelementen von Effinger Schichten und 'Braunem Dogger' aus den vorhandenen Daten separat abzuleiten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Das ENSI bewertet die von der Nagra angestrebte Verbesserung des Kenntnisstands zur Lithofazies der Effinger Schichten und des 'Braunen Doggers' unter Einbezug der seitens ENSI geforderten Ergänzung für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT als zielführend.

## **9.2 Porenwässer der Wirt- und Rahmengesteine**

### **Angaben der Nagra**

#### *Testrechnungen*

Analog zur Etappe 1 SGT wird für die Testrechnungen die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons vereinfachend auch zur Ableitung der  $K_d$ -Werte für die anderen Wirtgesteine verwendet. Die wegen der chemischen Ähnlichkeit begrenzten Abweichungen in den Parametern pH-Wert (PG-16), Redoxpotenzial (PG-17) und Salinität (PG-18) gegenüber dem Opalinuston werden durch die in den Testrechnungen verwendeten Bandbreiten der  $K_d$ -

Werte berücksichtigt. Eine höhere Ungewissheit besteht lediglich bei der Variante der Effinger Schichten, die eine höhere Salinität im Porenwasser aufweisen könnten. Durch einen alternativen Rechenfall, bei dem angenommen wird, dass alle Radionuklide in diesem Wirtgestein nicht sorbieren, wird diese Ungewissheit konservativ abgedeckt. Die vorhandene Information zu den geochemischen In-situ-Bedingungen ist aus Sicht der Nagra genügend für die Ableitung der Parameter für die Testrechnungen.

#### *Arbeiten der Nagra bezüglich Porenwässer der Wirtgesteine für die provisorischen Sicherheitsanalysen Etappe 2 SGT*

Die Zusammensetzung der Porenwässer (PG-16, 17, 18) wurde für Etappe 2 SGT wirtgesteinsspezifisch eingegrenzt (NAB 09-13; NAB 09-14; NAB 09-15) und wird für die Ableitung der Sorptionsdatensätze für die provisorischen Sicherheitsanalysen genutzt (NTB 10-01, S. 141).

Die geochemischen Referenzbedingungen (Hauptelemente bzw. Salinität, pH, Redoxbedingungen) in den vier Wirtgesteinen wurden nach der Einreichung der Unterlagen für Etappe 1 SGT aufgrund neuester Erkenntnisse in der geochemischen Modellierung evaluiert (Opalinuston, Mergel-Formationen des Helvetikums) bzw. neu definiert (Effinger Schichten, 'Brauner Dogger', NAB 09-13; NAB 09-14; NAB 09-15). Die meisten Parameter werden durch das Gestein selbst gepuffert, ausgenommen die Salinität. Wegen der unterschiedlichen Tiefenlage der Wirtgesteine innerhalb der Standortgebiete und wegen regionaler Variationen musste eine relativ grosse Bandbreite der Salinität berücksichtigt werden. Weil die Maximalwerte auch im ungünstigsten Fall die zweifache Meerwassersalinität nicht übersteigen, ist der Einfluss dieses Parameters auf die Radionuklidsorption und -löslichkeit relativ gering (NTB 10-01, S. 80). Die Nagra hat für die zurzeit laufenden Arbeiten für jedes Wirtgestein ein Referenzporenwasser und Porenwasservarianten definiert, um die Variabilität in den Wirtgesteinen abzudecken (NAB 09-13; NAB 09-14; NAB 09-15). Diese Porenwasservarianten werden für Etappe 2 SGT noch aufdatiert.

Für den 'Braunen Dogger' gibt es zurzeit keine Daten zur Porenwasserzusammensetzung. Die Nagra schlägt daher das gleiche Referenzporenwasser und die gleichen Bandbreiten aufgrund der ähnlichen Mineralogie und hydrogeologischen Verhältnisse wie für den Opalinuston vor (NAB 09-14, S. 27).

Mit den für Etappe 2 SGT begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich die Porenwässer der Wirtgesteine (Definition von Referenzporenwässern, PG-15, PG-16, PG-17, PG-18) vertieft bearbeitet (NTB 10-01, S. 195):

- Bezüglich des Porenwassers der Effinger Schichten sind neben der Bestimmung der Chloridgehalte umfassendere Untersuchungen an zwei konditionierten Kernen der Bohrung Gösgen möglich: Hier werden die stabilen Isotope von Wasser, die Hauptelemente in den wässerigen Auszügen und die Kationenaustauschkapazität bestimmt. Zusätzlich wird der Porenwasserchemismus im Rahmen eines Kerninfiltrationsexperiments bestimmt (NTB 10-01, S. 197).
- Aus der neuen Geothermiebohrung Schlattigen werden Bohrkerne der Abfolge 'Brauner Dogger' für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen.

- Im Rahmen der laufenden geochemischen Forschungsarbeiten, insbesondere im Felslabor Mont Terri und im Felslabor Meuse/Haute Marne der Andra, wurden der methodische Ansatz zur Modellierung und auch der Kenntnisstand des Porenwassers in Tongesteinen in den vergangenen Jahren weiter entwickelt. Im Auftrag der Nagra wird zudem ein «State-of-the-Art»-Bericht zur geochemischen Modellierung von Porenwasser in Tongesteinen erstellt (NTB 10-01, S. 198).

## Beurteilung des ENSI

### *Testrechnungen*

Das ENSI beurteilt die Verwendung der Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons (inklusive der Varianten aus dem Entsorgungsnachweis, Nagra 2002; NTB 02-19) für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten aller Wirtgesteine für die Testrechnungen als zielführend, da für Etappe 2 SGT nur noch tonhaltige Wirtgesteine mit unterschiedlichem Tonmineralegehalt vorgeschlagen wurden. Den Einfluss der möglichen erhöhten Salinität im Porenwasser der Effinger Schichten auf die Sorption deckt die Nagra in den Testrechnungen mit einem zusätzlichen Rechenfall ab, in dem die Radionuklide in den Effinger Schichten nicht sorbieren (Nagra 2010b).

### *Arbeiten der Nagra bezüglich Porenwässer der Wirtgesteine für die provisorischen Sicherheitsanalysen Etappe 2 SGT*

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen ist es gemäss ENSI 33/075 notwendig, dass die Nagra belastbare wirtgesteins- und standortspezifische Porenwässer (Referenzporenwässer inklusive Porenwasservarianten) definiert. Aus diesen Porenwasservarianten sollen die relevanten geochemischen Parameter abgeleitet werden.

Die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons wurde bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston vom ENSI überprüft (HSK 35/99). Das ENSI beurteilt den aktuellen Wissensstand zum Porenwasser des Opalinustons als ausreichend, um provisorische Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT durchzuführen. Je nach Standortgebiet kann im Opalinuston eine erhöhte Salinität, wie z.B. im Mont Russelin, nicht ausgeschlossen werden (NAB 09-14). Die Nagra hat für diesen Fall eine Porenwasservariante «Mont Russelin» für den Opalinuston definiert. Die Salinität im Porenwasser kann neben der Sorption weitere Prozesse in einem Tiefenlager wie z.B. die Diffusion, Zementstabilität, Korrosion metallischer Materialien, Auflösung der Glasmatrix sowie Stabilität und Quellbarkeit von Bentonit bzw. Bentonit-Sandgemischen beeinflussen.

### *Forderung 28*

Die Nagra hat den Einfluss der Salinität auf die verschiedenen Prozesse in den provisorischen Sicherheitsanalysen für alle Wirtgesteine und Standortgebiete darzulegen und entsprechend zu berücksichtigen.

Die Nagra hat das Referenzporenwasser für die Mergel-Formation des Helvetikums und dessen Porenwasservarianten aufgrund neuester Erkenntnisse in der geochemischen Modellierung überarbeitet. Das ENSI ist mit dem Vorgehen der Nagra einverstanden. Das ENSI empfiehlt der Nagra die Annahmen zur Herleitung der Porenwasserzusammensetzung für

die Mergel-Formationen des Helvetikums mit den Ergebnissen der geplanten Sorptions- und Diffusionsexperimente zu überprüfen.

Für die Effinger Schichten hat die Nagra Porenwasservarianten aufgrund der Ergebnisse aus der Bohrung Oftringen definiert. Zurzeit gibt es insbesondere Ungewissheiten bezüglich der zugänglichen Porosität, die die Salinität des Porenwassers beeinflusst.

#### *Forderung 29*

Das ENSI fordert, dass die Nagra den Kenntnisstand diesbezüglich mit weiteren Untersuchungen (z.B. durch ihre ergänzenden Arbeiten an den konditionierten Kernen der Bohrungen Gösgen und Oftringen) verbessert und in den provisorischen Sicherheitsanalysen entsprechend berücksichtigt.

Für den 'Braunen Dogger' wählt die Nagra für die Porenwasservarianten die Analogie zum Opalinuston. Aufgrund der ähnlichen mineralogischen Zusammensetzung bewertet das ENSI das Vorgehen als zielführend. Das ENSI erwartet, dass die Nagra den Datensatz mit weiteren Untersuchungen (z.B. geplanten Arbeiten an den konditionierten Kernen der Geothermiebohrung Schlattigen) ergänzt.

### **9.3 Sorptionskoeffizienten im Wirt- und Rahmengestein**

Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ -Werte in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) quantifizieren die Rückhaltung der Radionuklide als Folge der geochemischen Wechselwirkung der im Porenwasser gelösten Radionuklide mit den Gesteinsoberflächen.

#### **Angaben der Nagra**

Einen Überblick über die für die Ableitung der Sorptionskoeffizienten relevanten geologischen Prozesse und Parameter gibt Tabelle 6.2-2 in NTB 10-01. Die Sorption hängt signifikant von der Mineralogie des Gesteins (PG-15) ab. Der pH-Wert (PG-16) hat einen grossen Einfluss auf die Sorption, wenn ihr Mechanismus auf Oberflächenkomplexierung beruht. Die Salinität (PG-18) beeinflusst die Sorption hauptsächlich dann, wenn ihr Mechanismus auf Kationenaustausch beruht. Das Redoxpotenzial (PG-17) beeinflusst die Spezierung redoxsensitiver Radionuklide und damit deren Sorption (NTB 10-01, S.140).

Mikroorganismen können die Sorption zwar grundsätzlich beeinflussen, wegen der geringen Aktivität in Tongesteinen ist deren Einfluss aber minimal und deshalb für die Quantifizierung der Sorption nicht relevant (NTB 10-01, S.140).

Die Kolloidfiltration (PG-20) ist in Tongesteinen sehr effizient. Kolloide können nur in advektiv dominierten Systemen als Träger von Radionukliden deren Ausbreitung in der Geosphäre beeinflussen. Eventuell vorhandene Kolloide aus dem zementierten Nahfeld sind in der Geosphäre wegen des chemischen Gradienten nicht stabil. Die möglichen Auswirkungen von Kolloiden in einem geklüfteten Medium werden im Rahmen von alternativen Rechenfällen mit der abdeckenden Annahme untersucht, dass die Radionuklide irreversibel an Kolloiden sorbieren und ohne Rückhaltung (d.h. ohne Matrixdiffusion/Sorption) durch das Wirtgestein und die Rahmengesteine transportiert werden (NTB 10-01, S.140).

In ungeklüfteten Tongesteinen ist eine pH-Fahne (PG-24) auf die nächste Umgebung des Zementnahfelds beschränkt. Nur in eventuell vorhandenen Klüften kann die advective Ausbreitung der pH-Fahne über signifikante Entfernungen nicht ausgeschlossen werden (vgl. NTB 10-01, Kapitel 6.2.3). Eine Beeinflussung der Sorption in diesen Bereichen ist damit möglich und wird in den Testrechnungen durch abdeckende Rechenfälle berücksichtigt (NTB 10-01, S.140).

### *Testrechnungen*

Für die Testrechnungen wird von dem in Etappe 1 SGT erstellten Datensatz von  $K_d$ -Werten für Opalinuston ausgegangen. Eine Methodik wurde entwickelt, um ausgehend von diesem Datensatz  $K_d$ -Werte für andere tonige Wirtgesteine in der Schweiz anhand des Tonmineralgehalts und der Kationenaustauschkapazität abzuleiten. Die dazu benötigte Mineralzusammensetzung der Gesteine (PG-15), speziell der Gesamttonanteil inklusive Variabilität, wurde an Bohrkernen bestimmt (NTB 10-01, Tabelle A6-8). Analog zur Etappe 1 SGT (NAB 08-50) wird die Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons vereinfachend auch zur Ableitung der  $K_d$ -Werte für die anderen Wirtgesteine verwendet (siehe Kapitel 9.2). Die Ableitung der wirtgesteinsspezifischen Sorptionsdatensätze (inklusive untere und obere Eckwerte) für die Testrechnungen ist in Nagra 2010c beschrieben; die in den Testrechnungen verwendeten Parameterwerte finden sich in NTB 10-01, Tabelle A6-9.

Der Einfluss einer pH-Fahne in eventuell vorhandenen Klüften (PG-24) auf die Sorption wird durch Rechenfälle berücksichtigt, in denen für die Sorption in der an die Klüfte angrenzenden Matrix der in Etappe 1 SGT abgeleitete, pessimistische Sorptionsdatensatz «Calcit» verwendet wird (NTB 10-01, S.141).

### *Provisorische Sicherheitsanalysen*

Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT wird insbesondere das Sorptionsmodell gezielt weiterentwickelt. Nach Spezifizierung der Porenwässer der Wirtgesteine wird der Einfluss der Spezifizierung und der geochemischen Bedingungen in die Berechnung der Sorptionskoeffizienten einfließen. Das Sorptionsmodell wird künftig auf den in den Wirtgesteinen der Schweiz die Sorption dominierenden Tonmineralen Illit und Montmorillonit basieren. Damit kann spezifischer auf die Zusammensetzung und das Sorptionsvermögen der einzelnen Wirtgesteine eingegangen werden. Die Methodik für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten für die provisorischen Sicherheitsanalysen ist in NTB 09-03 beschrieben. Die spezifische Mineralzusammensetzung der einzelnen Wirtgesteine (PG-15) wird durch die Gehalte relevanter Tonminerale repräsentiert. Auch die Zusammensetzung der Porenwässer (PG-16, 17, 18) wird wirtgesteinsspezifisch eingegrenzt (NAB 09-13; NAB 09-14; NAB 09-15) und für die Ableitung der Sorptionsdatensätze verwendet. Die Methodik wird verwendet, um für die Wirtgesteine und die Rahmengesteine gesteinspezifische Sorptionsdatensätze für die provisorische Sicherheitsanalyse zu erstellen. Für eine noch zu treffende Auswahl an Porenwasser- und Mineralogievarianten, die in ihrer Kombination den pessimistischen Fall am treffendsten charakterisieren, wird die gleiche Methodik angewandt, um die Ungewissheiten zu quantifizieren. Für ausgewählte Radionuklide (bzw. deren entsprechende Elemente) werden die so erarbeiteten  $K_d$ -Werte durch Experimente an repräsentativem und gut charakterisiertem Bohrkernmaterial überprüft (vgl. NTB 10-01, Kapitel 8.3). Zur Berück-

sichtigung des Einflusses einer pH-Fahne in eventuell vorhandenen Klüften (PG-24) auf die Sorption wird ein entsprechender Sorptionsdatensatz erstellt.

Um die möglicherweise höheren Ionenstärken der Porenwässer in den Effinger Schichten modellieren zu können, werden SIT-Parameter entsprechend der «specific interaction theory» (Grenthe et al. 1997) zusammengestellt.

## **Beurteilung des ENSI**

### *Testrechnungen*

Für die Testrechnungen hat die Nagra den Datensatz des Opalinustons aus dem Entsorgungsnachweis als Grundlage für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten aller Wirtgesteine verwendet. Bei der Erstellung des Basisdatensatzes hat die Nagra die Empfehlungen des ENSI zu den Sorptionskoeffizienten (ENSI 33/52; HSK 35/85) berücksichtigt. Dieser Datensatz wurde für die anderen Wirtgesteine verwendet und mit dem Tonmineralgehalt und der Kationenaustauschkapazität skaliert. Das ENSI beurteilt das Vorgehen der Nagra zur Herleitung und Selektion der Sorptionskoeffizienten für die Testrechnungen als nachvollziehbar und plausibel.

### *Provisorische Sicherheitsanalysen*

Das Vorgehen, die Sorptionskoeffizienten anhand der dominierenden Tonminerale Illit und Montmorillonit und der wirtgesteinsspezifischen Porenwässer für die provisorischen Sicherheitsanalysen herzuleiten, beurteilt das ENSI als zielführend.

### *Forderung 30*

Das ENSI fordert, dass die Nagra ihre Methodik mit den vorhandenen Sorptionsexperimenten am Opalinuston testet und die Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert. Das ENSI erachtet es als sinnvoll, dass die Nagra diesen Methodentest mit den für alle Wirtgesteine geplanten Sorptionsexperimenten an repräsentativem Bohrkernmaterial ergänzt.

Das ENSI geht davon aus, dass die Nagra die angestrebte aufdatierte thermodynamische Datenbank für die Löslichkeitslimiten (Kapitel 9.5) auch bei der Herleitung der Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in den Wirt- und Rahmengesteinen berücksichtigt.

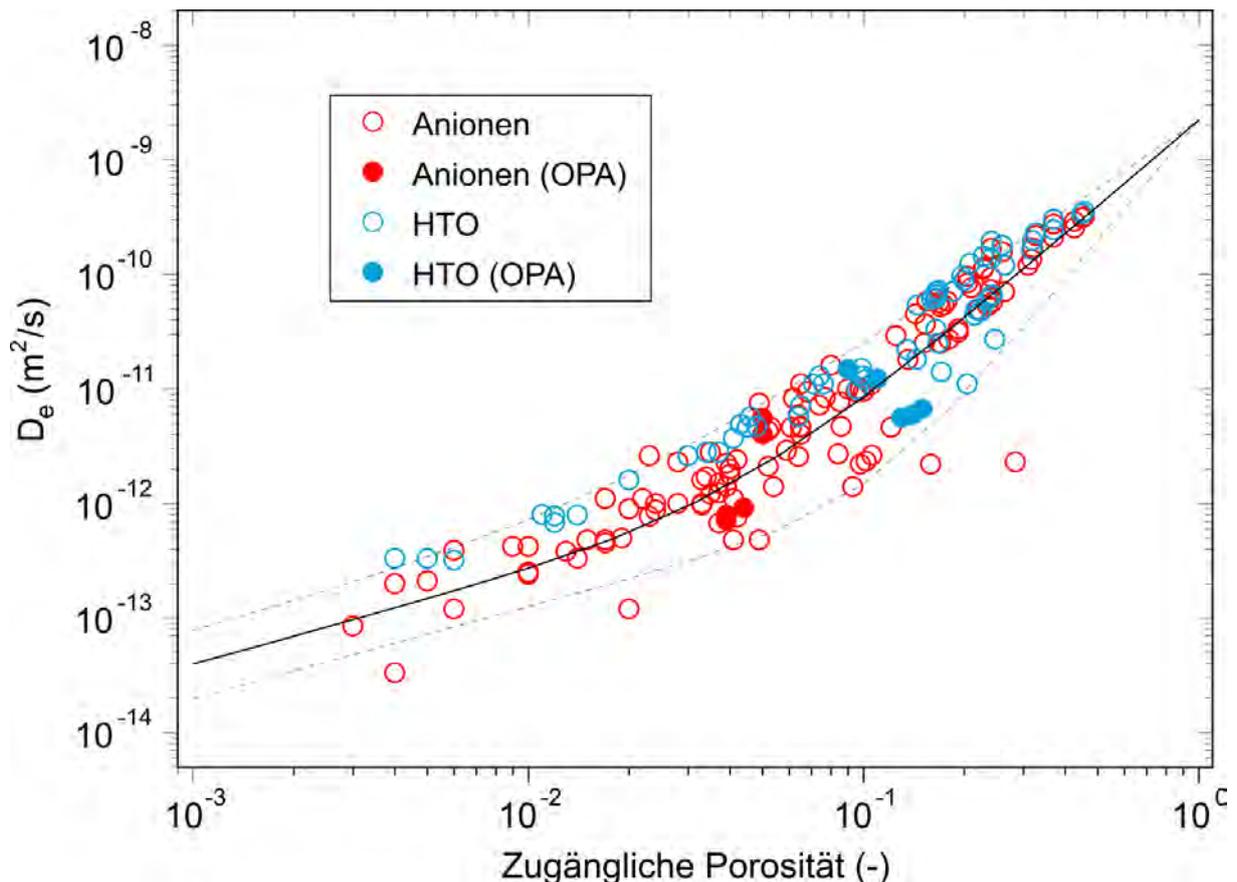
## **9.4 Diffusionskoeffizienten im Wirt- und Rahmengestein**

### **Angaben der Nagra**

#### *Diffusionskoeffizienten*

Die Diffusionsprozesse im Opalinuston wurden für den Entsorgungsnachweis gut untersucht (NTB 03-07), die Untersuchungen wurden in weiteren Labor- und Feldversuchen (Mont Terri) fortgeführt und die Resultate bestätigt (Wersin et al. 2010). Für andere Wirtgesteine wird ein empirischer Zusammenhang (eine Weiterentwicklung des Archie-Gesetzes, van Loon et al. 2003) verwendet, der die Abhängigkeit des effektiven Diffusionskoeffizienten von der zu-

gänglichen Porosität beschreibt (Figur 9-2). Auch in anderen nationalen Programmen untersuchte tonige Wirtgesteine folgen diesem Gesetz (NEA 2009). Die Anisotropie der Mikrostruktur der Wirtgesteine äussert sich in unterschiedlichen Diffusionskoeffizienten senkrecht und parallel zur Schichtung. Erstere – mit kleineren Werten – werden bei der Modellierung der Radionuklidfreisetzung im homogen-porösen Medium verwendet, letztere beim Transport in Klüften und Störungen zur Quantifizierung der Matrixdiffusion. Eine mögliche lokale Erhöhung der Diffusionskoeffizienten in tektonisierten Zonen ist mit den gewählten oberen Eckwerten abgedeckt (NTB 10-01, S. 80).



Figur 9-2: Effektiver Diffusionskoeffizient als Funktion der zugänglichen Porosität in Tongestein und kompaktiertem Ton (gemäss Figur 4 in Nagra 2010c).

### *Porositäten der Wirtgesteine*

Die Porositäten der Wirtgesteine einschliesslich Ungewissheiten konnten aus vorhandenen Daten gewonnen werden (Nagra 2010c; NTB 02-03; NTB 96-01; NTB 10-01, S. 81). Die in den Testrechnungen verwendeten Eckwerte umfassen die Variabilität im Verbreitungsgebiet der Gesteine, die durch Bohrungen erschlossen ist (Tabelle 9-2). Der anionenzugängliche Teil des Porenraums wird in Analogie zum Opalinuston für alle Gesteine mit 50% der totalen Porosität angenommen (NTB 02-02). Die Porositätsdaten der Mergel des Helvetikums umfassen die verschiedenen Einheiten der Mergel-Formationen des Helvetikums. Jedoch wur-

den die Fault Gouges mit Totalporositäten von im Mittel 10% nicht als eigenständige Einheiten behandelt. Sie sind Bestandteil der Heterogenitäten im Gestein (Nagra 2010c, S. 15).

Die vorhandenen Informationen sind geeignet, um für die Testrechnungen die Diffusion zu quantifizieren. Die resultierenden Referenzwerte sowie untere und obere Eckwerte (Tabelle 9-2, Tabelle 9-3) sind in Nagra 2010c erläutert.

### *Ergänzende Arbeiten*

Mit den für Etappe 2 SGT begonnenen bzw. geplanten Arbeiten werden im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit und den sicherheitstechnischen Vergleich die Porositäten und die Diffusion der Wirtgesteine vertieft bearbeitet (NTB 10-01, S. 197-198). In tonreichen Gesteinen werden verschiedene Arten von Porositäten (z.B. physikalische Porosität, Kationen-zugängliche und Anionen-zugängliche Porosität) unterschieden, typischerweise werden für die Quantifizierung frische, konditionierte Proben benötigt. Als Grundlage für die Berechnung der physikalischen Porosität dienen Korn- und Gesteinsdichten, sie werden versuchsweise in den Proben der verfügbaren Bohrkerne früherer Nagra-Bohrungen analysiert und zur Prüfung der Plausibilität mit früheren Analysen verglichen. Zwei konditionierte Kerne der Effinger Schichten (Bohrung Gösgen) dienen zudem der Bestimmung der Porosität über den Wasserverlust und mittels der Methode des diffusiven Austauschs. Bei den Effinger Schichten liegt erst ein überraschend tiefer Wert einer kalkreichen Probe der Bohrung Oftringen vor. Mittels eines Kerninfiltrationsexperiments einer Probe aus Gösgen soll nun Porenwasser beprobt werden und darauf basierend die Anionen-zugängliche Porosität berechnet werden.

Aus der Geothermiebohrung Schlattingen werden Bohrkerne der Abfolge 'Brauner Dogger' für Laboruntersuchungen zur Verfügung stehen (NTB 10-01, S. 195).

Die Nagra plant das empirische Diffusionsmodell mit gezielten Experimenten an Bohrkernproben aller Wirtgesteine, wobei bei heterogen aufgebauten Wirtgesteinen repräsentative Proben der tonigen und der kalkigen Gesteinsabfolgen verwendet werden, zu überprüfen (NTB 10-01, S. 198). Diese Informationen werden in die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT einfließen (NTB 10-01, S. 81).

Tabelle 9-2: Für die Testrechnungen verwendete zugängliche Porositäten der Wirtgesteine (Nicht-anionen, in Klammern Anionen, gemäss Tabelle 7 in Nagra 2010c, S. 15).

<b>Wirt- und Rahmengestein</b>	<b>Referenzwert (%)</b>	<b>Unterer Eckwert (%)</b>	<b>Oberer Eckwert (%)</b>
Opalinuston	12 (6)	6 (3)	18 (9)
Tonige Abfolgen des 'Braunen Doggers'	10 (5)	5 (2.5)	15 (7.5)
Sandkalkabfolgen des 'Braunen Doggers'	5 (2.5)	2 (1)	8 (4)
Tonige Abfolgen der Effinger Schichten	8 (4)	5 (2.5)	12 (6)
Kalkbankabfolgen der Effinger Schichten	3 (1.5)	2 (1)	4 (2)
Mergel-Formationen des Helvetikums	1.4 (0.7)	0.8 (0.4)	3 (1.5)

## Beurteilung des ENSI

### Diffusionskoeffizienten

Das Vorgehen der Nagra bei der Festlegung der Diffusionskoeffizienten im Opalinuston (Tabelle 9-3) wurde vom ENSI bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston geprüft (HSK 35/99). Das ENSI beurteilt die Referenz- und oberen Eckwerte der Diffusionskoeffizienten im Opalinuston als nachvollziehbar und plausibel.

Für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums leitet die Nagra die effektiven Diffusionskoeffizienten mit einem empirischen Zusammenhang (eine Weiterentwicklung des Archie-Gesetzes, Figur 9-2) aus der zugänglichen Porosität ab. Das erweiterte Archie-Gesetz wurde aus Diffusionsexperimenten mit verschiedenen Gesteinen (Opalinuston, tonreiche und kalkreiche Abfolgen der Tongesteine des Callovo-Oxfordien, Bentonit, Kalkstein und Sandstein) abgeleitet (Nagra 2010c; NEA 2009). Zum Vergleich hat das ENSI die Bandbreiten für die vorgeschlagenen Wirtgesteine mit der Bandbreiten der in NEA 2009 untersuchten Tongesteine in Tabelle 9-3 dargestellt. Das ENSI erachtet die Vorgehensweise für die Herleitung der effektiven Diffusionskoeffizienten für die Testrechnungen als nachvollziehbar und plausibel.

Das ENSI erachtet die von der Nagra geplante Überprüfung des Diffusionsmodells mit weiteren Messdaten für Etappe 2 SGT als zielführend. Das ENSI erwartet, dass die Nagra die wirtgesteinsspezifischen Annahmen bezüglich effektiver Diffusionskoeffizienten mit weiteren experimentellen Daten abstützt.

Tabelle 9-3: Bandbreiten der effektiven Diffusionskoeffizienten (senkrecht zur Schichtung, modifiziert aus Tabelle A6-11 in NTB 10-01).

Wirt- und Rahmengesteine	Nichtanionen <sup>a)</sup> [m <sup>2</sup> /s]	Anionen [m <sup>2</sup> /s]
Opalinuston	1 · 10 <sup>-11</sup> - 1 · 10 <sup>-10</sup>	1 · 10 <sup>-12</sup> - 3 · 10 <sup>-12</sup>
'Brauner Dogger' (inkl. Sandkalkabfolgen)	2 · 10 <sup>-13</sup> - 5 · 10 <sup>-11</sup>	1 · 10 <sup>-13</sup> - 1 · 10 <sup>-11</sup>
Effinger Schichten (inkl. Kalkbankabfolgen)	2 · 10 <sup>-13</sup> - 4 · 10 <sup>-11</sup>	1 · 10 <sup>-13</sup> - 1 · 10 <sup>-11</sup>
Mergel-Formationen des Helvetikums	1 · 10 <sup>-13</sup> - 3 · 10 <sup>-12</sup>	6 · 10 <sup>-14</sup> - 1 · 10 <sup>-12</sup>
Verschiedene Tongesteine <sup>b)</sup>	2 · 10 <sup>-12</sup> - 1 · 10 <sup>-10</sup>	5 · 10 <sup>-13</sup> - 1 · 10 <sup>-10</sup>

<sup>a)</sup> Für Cs und Sr gelten spezifische Diffusionskoeffizienten

<sup>b)</sup> Bandbreiten der effektiven Diffusionskoeffizienten in verschiedenen Tongesteinen (NEA 2009)

Bei der Herleitung der Bandbreiten für die Diffusionskoeffizienten wird vor allem die Variabilität der Porosität berücksichtigt. Neben der Porosität kann auch die Temperatur die Diffusionskoeffizienten beeinflussen. Auf Anfrage des ENSI bewertet die Nagra den Einfluss der Temperatur (Übergang von Labortemperatur (ca. 25 °C) auf Formationstemperatur (ca. 40 °C) aufgrund der Aktivierungsenergie mit einem Faktor von zwei auf die Diffusionskoeffizienten (NAB 11-04). Gemäss Nagra beträgt die Gesamtungewissheit aus dem Archie-

Ansatz hingegen ca. eine Grössenordnung. Der Temperatureinfluss ist in den Testrechnungen nicht explizit eingerechnet, aber ist Bestandteil der Ungewissheitsbänder. Das ENSI kann den Faktor von 2 auf die Diffusionskoeffizienten aufgrund der Diffusionsexperimente im Opalinuston im Temperaturbereich zwischen 5 und 65 °C (Bastug und Kuyucak 2005; Van Loon et al. 2005) nachvollziehen. Diese zusätzliche Variabilität ist in den Bandbreiten der Diffusionskoeffizienten zu berücksichtigen.

#### *Forderung 31*

Die Nagra hat für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT die zu erwartende Variabilität bezüglich Temperatur in den Standortgebieten darzulegen und deren Einfluss auf die Diffusionskoeffizienten entsprechend zu berücksichtigen.

#### *Zugängliche Porosität der Wirtgesteine*

Die Nagra hat die Daten zur Porosität aller Wirtgesteine in NAB 10-19 zusammengestellt.

Das ENSI hat die Werte (Tabelle 9-2) geprüft. Es beurteilt die von der Nagra ausgewählten Referenzwerte und oberen Eckwerte der zugänglichen Porosität für Nichtanionen (Kationen und neutrale Moleküle) in den Testrechnungen als nachvollziehbar und plausibel.

Für den 'Braunen Dogger' liegen Daten aus den Bohrungen Benken und Weiach vor. Dieser Datensatz wird durch die Nagra ergänzt. Das ENSI erwartet, dass Ergebnisse in die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT einfließen werden. Bei der Kompilation der zugänglichen Porositäten für Nichtanionen (NAB 10-19) wird nicht unterschieden zwischen den tonigen Abfolgen und den Architekturelementen im 'Braunen Dogger' und den Effinger Schichten. Die Bimodalität (tonige Abfolgen und Architekturelemente), die in Tabelle 9-2 vorgeschlagen wird, ist in den Daten nicht sichtbar. Das ENSI beurteilt die von der Nagra vorgenommene Einteilung für die Testrechnungen als grundsätzlich plausibel.

#### *Forderung 32*

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen hat die Nagra die Bandbreiten für die Porosität in den tonigen Abfolgen und sandig/kalkigen Architekturelementen von Effinger Schichten und 'Braunem Dogger' aus den vorhandenen Daten separat abzuleiten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Für die Wirtgesteine Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums beurteilt das ENSI den aktuellen Kenntnisstand als ausreichend, um in Etappe 2 SGT provisorische Sicherheitsanalysen durchzuführen.

Die Nagra wählt für alle Wirtgesteine eine Anionen-zugängliche Porosität von 50% der physikalischen Porosität. Im Opalinuston konnte dieser Faktor 2 mit verschiedenen Experimenten gezeigt werden (z.B. Van Loon 2003; Wersin et al. 2008). Die Chlorid-Profile in den Effinger Schichten der Bohrung Oftringen deuten darauf hin, dass die Anionen-zugängliche Porosität zwischen 50% und 25% der physikalischen Porosität liegt (NAB 08-18; NAB 09-13). Für das Wirtgestein 'Brauner Dogger' sind keine gemessenen Daten vorhanden. Allgemein ist die zugängliche Porosität für Anionen in gering durchlässigen Tonsteinen um einen Faktor 2 bis 3 kleiner als die physikalische Porosität (NEA 2009). Das ENSI beurteilt 50% der

physikalischen Porosität als Anionen-zugänglichen Porosität für alle Wirtgesteine im Referenzfall in den Testrechnungen als plausibel.

Für die oberen Eckwerte in den Sandkalk- und Kalkbankabfolgen ist aufgrund des geringeren Tonmineralgehalts tendenziell eine Anionen-zugängliche Porosität grösser als 50% der physikalischen Porosität zu erwarten. Gemäss der Porenwasserbestimmungen in den Effinger Schichten kann aber auch eine geringere Anionen-zugängliche Porosität (Faktor 4) zurzeit nicht ausgeschlossen werden (NAB 09-13). Aufgrund der geringen Datenlage für die Anionen-zugängliche Porosität für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten beurteilt das ENSI die von der Nagra geplanten Arbeiten bezüglich Porenwasser und Porosität (z.B. an den konditionierten Bohrkernen der Bohrung Gösigen und Geothermiebohrung Schlattingen) als zielführend.

### *Forderung 33*

Das ENSI fordert von der Nagra, dass für Etappe 2 SGT wirtgesteinsspezifische Anionen-zugängliche Porositäten auf der Basis experimenteller Daten diskutiert und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen einfließen werden.

## **9.5 Löslichkeitslimiten im Nahfeld**

Viele Radionuklide sind nur in beschränktem Ausmass im Porenwasser des Nahfelds löslich. Ihre Löslichkeit hängt von der Wasserzusammensetzung ab sowie von der Stabilität der Festphase, die sich unter den vorherrschenden chemischen Bedingungen bilden wird. Die Konzentrationen der Radionuklide im Porenwasser werden durch die entsprechenden elementspezifischen Löslichkeitslimiten begrenzt.

### **Angaben der Nagra**

#### *Löslichkeitslimiten im Zementnahfeld*

Die elementspezifischen Löslichkeitslimiten sind in Anbetracht der geringen Radionuklidkonzentrationen in einem SMA-Lager nur von untergeordneter Bedeutung und werden in den Modellrechnungen konservativ nicht berücksichtigt.

Die elementspezifischen Löslichkeitslimiten im LMA-Nahfeld werden für die Modellrechnungen meist für reine Phasen quantifiziert, die unter den durch Zement gepufferten chemischen Bedingungen gebildet werden können (NTB 02-22). Die Bildung von Mischphasen, d.h. der Einbau von Radionukliden in Zementminerale und Sekundärphasen wird in der Regel konservativ nicht berücksichtigt, obwohl solche Prozesse zur Rückhaltung in Zement beitragen.

Basierend auf einem breiten Kenntnisstand werden Löslichkeitslimiten mit geochemischer Modellierung für das Zementnahfeld hergeleitet, welche sich auf eine vom PSI kompilierte thermodynamische Datenbank (NTB 02-16) abstützen. Die zugrunde liegende thermodynamische Datenbank wird für Etappe 2 SGT aufdatiert.

Bei der Herleitung der Löslichkeitslimiten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit unteren (optimistischen) und oberen (pessimistischen) Eckwerten angegeben (NTB 10-01, Tabelle A6-4). Diese Werte sind dem Bericht

NAB 08-51 entnommen. Sie wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 35/99), vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston übernommen und sind in NTB 02-22 erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit erhöhten element-spezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) analysiert.

Störstoffe im Abfall und deren Abbauprodukte können zum Beispiel durch Komplexierung der Radionuklide deren Löslichkeit erhöhen (NAB 08-51). Abfälle, welche Störstoffe in relevanter Konzentration enthalten, werden separat in räumlich getrennten Lagerkammern eingelagert. Für die Testrechnungen wird ein auf die vorherrschenden Bedingungen angepasster Datensatz der Löslichkeitslimiten verwendet.

#### *Löslichkeitslimiten im Bentonitnahfeld*

Im Bentonitnahfeld des BE/HAA-Lagers trägt die beschränkte Löslichkeit neben der Sorption wesentlich zur chemischen Rückhaltung der Radionuklide bei (NTB 10-01, S. 107).

Basierend auf den breiten Kenntnissen werden Löslichkeitslimiten mit geochemischer Modellierung hergeleitet, welche sich auf die vom PSI kompilierte thermodynamische Datenbank (NTB 02-16) abstützen. Für einen pH-Wert im neutralen Bereich, wie er im Bentonitporenwasser vorherrscht, sind die thermodynamischen Konstanten inkl. Löslichkeit gut bekannt, insbesondere weil in dem internationalen NEA-TDB-Projekt solche Daten für wichtige Radioelemente gesammelt, rezensiert und publiziert werden (siehe z.B. Olin et al. 2005; Rand et al. 2009). Die Nagra und das PSI sind an diesem Projekt beteiligt (NTB 10-01, S. 107).

Die zugrunde liegende thermodynamische Datenbank (NTB 02-16) wird für Etappe 2 SGT aufdatiert, und die neuen Ergebnisse des oben genannten NEA-Projekts werden berücksichtigt.

Bei der Herleitung der Löslichkeitslimiten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit unteren (optimistischen) und oberen (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe NTB 10-01, Tabelle A6-6). Diese Werte sind dem Bericht NAB 08-51 entnommen. Sie wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 35/99), vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston übernommen und sind in NTB 02-10 erläutert. Damit werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten (obere Eckwerte) analysiert.

### **Beurteilung des ENSI**

#### *Löslichkeitslimiten im Zementnahfeld*

Das ENSI hat die Herleitung und Selektion der Nagra für die maximalen Löslichkeiten im Zementnahfeld im Rahmen von Etappe 1 SGT und des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston überprüft (ENSI 33/070; HSK 35/99). Die Empfehlungen des ENSI (HSK 35/99) wurden bei der Auswahl der maximalen Löslichkeiten für die Testrechnungen berücksichtigt. Das ENSI hat, mit Ausnahme von Selen, keine Einwände zu den von der Nagra verwendeten maximalen Löslichkeiten für das Referenzporenwasser anzubringen. Das NEA-TDB-Projekt (Olin et al. 2005) empfiehlt eine neue Konstante für die Löslichkeit von  $\text{CaSeO}_3$ , dar-

aus ergibt sich ein 25-mal höhere Löslichkeit für Selen im Referenzfall. Die Nagra berücksichtigt diesen Unterschied mit einer unbeschränkten Löslichkeit als oberen Eckwert für Selen in den Testrechnungen. Das ENSI empfiehlt der Nagra, bei der Aufdatierung ihrer thermodynamischen Datenbank neben den NEA-TDB-Projekten weitere aktuelle Literatur wie z.B. von der IUPAC (Powell et al. 2009) zu berücksichtigen.

Die Abfallgruppe LMA-2 enthält im Unterschied zum Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston auch zellulosehaltige Abfallsorten. Das Degradationsprodukt von Zellulose Isosaccharinsäure kann mit Radionukliden wie z.B. Eu(III), Th(IV) und Np(IV) stabile Komplexe bei hohen pH-Werten bilden (z.B.: HSK 30/18; Rai et al. 2003). Diese Komplexe können einen Einfluss auf die Löslichkeit und die Sorption der Radionuklide haben.

#### *Forderung 34*

Das ENSI fordert, dass diese Effekte bei den maximalen Löslichkeiten der Radionuklide in Abfallgruppe 2 von der Nagra dargelegt und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden.

#### *Löslichkeitslimiten im Bentonitnahfeld*

Die Referenzwerte und die oberen Eckwerte für die maximalen Löslichkeiten im Bentonitporenwasser wurden vom ENSI für nicht-degradierten Bentonit bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston überprüft (HSK 35/80). Die Nagra hat die Empfehlungen des ENSI (HSK 35/80) bei der Herleitung der maximalen Löslichkeiten für Bentonit in den Testrechnungen berücksichtigt.

Das ENSI beurteilt den aktuellen Kenntnisstand und die geplante Aufdatierung ihrer thermodynamischen Datenbank für die Herleitung der Löslichkeitslimiten im nicht-degradierten Bentonitnahfeld in den provisorischen Sicherheitsanalysen als ausreichend. Das ENSI empfiehlt der Nagra, bei der Aufdatierung der thermodynamischen Datenbank neben den NEA-TDB-Projekten weitere aktuelle Literatur wie z.B. diejenige der IUPAC (Powell et al. 2009) zu berücksichtigen.

## **9.6 Sorptionskoeffizienten im Nahfeld**

### **Angaben der Nagra**

#### *Sorptionskoeffizienten im Zementnahfeld*

In der Sicherheitsanalyse wird die Sorption durch die Verteilungskoeffizienten Zementphasen-Porenwasser (Sorptionskoeffizienten resp.  $K_d$ -Werte in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) quantifiziert. In den Testrechnungen werden die Werte aus NAB 08-51 verwendet; diese werden für die provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 SGT aufdatiert. Bei der Herleitung der Sorptionskoeffizienten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit oberen (optimistischen) und unteren (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe NTB 10-01, Tabelle A6-5). Diese Werte (NAB 08-51) wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 35/99), vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston übernommen und sind in NTB 02-20 erläutert. Damit

werden ein Referenzfall (mit Referenzwerten) und gemäss Vorgabe des ENSI auch ein abdeckender Fall mit tieferen elementspezifischen Sorptionskoeffizienten (untere Eckwerte) analysiert.

In den von der Nagra in Etappe 1 SGT vorgeschlagenen, wenig durchlässigen Wirtgesteinen degradiert der Zement wenig und bleibt während der betrachteten Zeiträume für die Sorption erhalten (NTB 10-01, Kapitel 6.2.6). Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT wird die Zementdegradation mit einem aufdatierten Modell überprüft.

Störstoffe im Abfall und deren Abbauprodukte können durch Zementdegradation ( $\text{CO}_2$ -Entwicklung) oder Komplexbildung der Radionuklide deren Sorption vermindern (NAB 08-51). Abfälle, welche Störstoffe in relevanter Konzentration enthalten, werden darum separat in räumlich getrennten Lagerkammern eingelagert. Für die Testrechnungen wird ein den vorherrschenden Bedingungen angepasster Datensatz der Sorptionskoeffizienten verwendet.

#### *Sorptionskoeffizienten im Bentonitnahfeld*

In der Sicherheitsanalyse wird die Sorption durch die Verteilungskoeffizienten Bentonitminerale – Porenwasser (Sorptionskoeffizienten resp.  $K_d$ -Werte in  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) quantifiziert. Die von Bradbury und Baeyens hergeleiteten Werte (NTB 02-18) – welche die Basis für die in den Testrechnungen verwendeten Parameterwerte sind – werden für die provisorischen Sicherheitsanalysen der Etappe 2 SGT aufdatiert.

Bei der Herleitung der Sorptionskoeffizienten wird neben den erwarteten Werten (Referenzwerten) auch der Bereich der Ungewissheiten mit oberen (optimistischen) und unteren (pessimistischen) Eckwerten angegeben (siehe NTB 10-01, Tabelle A6-7, übernommen aus NAB 08-51). Diese Werte wurden im Wesentlichen, unter Berücksichtigung der entsprechenden HSK-Kommentare (HSK 35/99), vom Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston übernommen und sind in NTB 02-18 erläutert.

### **Beurteilung des ENSI**

#### *Sorptionskoeffizienten im Zementnahfeld*

Das ENSI begrüsst die von der Nagra vorgeschlagene Aufdatierung des Modells für die Zementdegradation für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Die Referenzwerte und die unteren Eckwerte für die Sorptionskoeffizienten im Zementnahfeld wurden vom ENSI bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston und in Etappe 1 SGT überprüft (ENSI 33/070; HSK 35/99). Das ENSI ist grundsätzlich mit den gewählten Sorptionskoeffizienten der Radionuklide für das Zementnahfeld einverstanden. Ausnahmen sind die Sorptionskoeffizienten für  $C_{\text{anorg}}$ , Co, Ni, die durch Isotopenaustausch im Zementnahfeld zurückgehalten werden (ENSI 33/070). Die so berechneten Sorptionskoeffizienten sind abhängig vom verwendeten Inventar für die Radionuklide sowie für die stabilen Isotope (NTB 02-20, S. 73 – 79) und können demnach für das SMA- und LMA-Lager unterschiedlich sein. Das ENSI konnte mit eigenen Berechnungen in Etappe 1 SGT zeigen, dass der Einfluss der geringeren Sorptionskoeffizienten nicht signifikant war und daher diese keine Bedeutung für das Einengungsverfahren in Etappe 1 SGT hatten (ENSI 33/070).

**Forderung 35**

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT den Einfluss der im Nahfeld vorhandenen Radionuklide und stabilen Isotope auf die Sorptionskoeffizienten der Elemente Kohlenstoff (anorganisch), Kobalt und Nickel zu diskutieren und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen.

***Sorptionskoeffizienten im Bentonitnahfeld***

Die Referenzwerte und die unteren Eckwerte für die Sorptionskoeffizienten im Bentonitnahfeld wurden vom ENSI für nicht-degradierten Bentonit bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston und in Etappe 1 SGT überprüft (ENSI 33/070; HSK 35/80). Die Nagra hat die Empfehlungen des ENSI bei der Herleitung und Auswahl der Sorptionskoeffizienten für Bentonit berücksichtigt.

Das ENSI beurteilt den aktuellen Kenntnisstand für die Herleitung der Sorptionskoeffizienten im nicht-degradierten Bentonitnahfeld in den provisorischen Sicherheitsanalysen als ausreichend.

## 10 Biosphäre

In der provisorischen Sicherheitsanalyse wird die mögliche Freisetzung von Radionukliden (Migration der Nuklide vom geologischen Tiefenlager bis in die Biosphäre) und die entsprechenden radiologischen Konsequenzen quantitativ bestimmt. Der Analyse werden ein definiertes Abfallinventar sowie begründete Annahmen und Erwartungswerte zu den Eigenschaften der vorgesehenen technischen und geologischen Barrieren zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung der Wasserflüsse in der Biosphäre sowie der möglichen Aufnahme der Radionuklide über das Trinkwasser und die Nahrung wird die Dosis für eine Einzelperson berechnet und beurteilt.

Für den Vergleich von Standorten werden die Resultate der numerischen Berechnungen herangezogen und die berechneten Dosen anhand zweier radiologischer Kriterien bewertet. Das erste Kriterium ist das in der Richtlinie ENSI-G03 festgelegte Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr, das zweite der aus der Strahlenschutzverordnung (StSV) abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr, unterhalb welchem alle Standorte als sicherheitstechnisch gleichwertig betrachtet werden.

Im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich der vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT prüft das ENSI im vorliegenden Kapitel, ob mit dem derzeitigen Kenntnisstand bezüglich der Prozesse und Parameter in der Biosphäre die Anforderungen gemäss ENSI 33/075 erfüllt werden können.

Zu den für die Sicherheit relevanten Prozessen und Parametern bezüglich der Biosphäre gehören gemäss Einschätzung der Nagra die relevanten Exfiltrationspfade (welche den Exfiltrationsort bestimmen) und die zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie und des Klimas am Ort und zurzeit einer allfälligen Freisetzung der Radionuklide (vgl. Tabelle 10-1). Die relevanten Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre fliessen direkt in die Berechnung der Strahlendosen ein.

Tabelle 10-1: Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre (Tabelle 4.7-1 aus NTB 10-01).

Nr.	Relevante Prozesse und Parameter mit Bezug zur Biosphäre	Präzisierung
PG-27	Relevante Exfiltrationspfade	Definieren die möglichen Exfiltrationsorte
PG-29	Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung	Geomorphologie-Typen an den möglichen Exfiltrationsorten
PG-31	Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung	Verschiedene Klimavarianten, insbesondere wärmeres trockeneres Klima und eiszeitliches Klima

Entsprechend den Anforderungen an die provisorische Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich (ENSI 33/075) haben die Entsorgungspflichtigen die regionale hydrogeologische Situation darzulegen, das Spektrum typischer Exfiltrationssituationen auf-

zuzeigen und die konzeptuellen Modelle der Radionuklidenausbreitung in der Biosphäre (Morphologie, Klima), inklusive ihrer Parametrisierung zu beschreiben. Die Modellierung der Radionuklidenausbreitung in der Biosphäre soll unter Berücksichtigung der Expositionspfade für jedes geologische Standortgebiet spezifisch unter Berücksichtigung möglicher typischer Morphologien und Klimasituationen (inkl. Verdünnungspotenziale) durchgeführt werden. Ferner haben die Entsorgungspflichtigen in der provisorischen Sicherheitsanalyse die sicherheitstechnische Bedeutung von alternativen Biosphärenszenarien (unter Verwendung von plausiblen Annahmen zu möglichen Entwicklungen von Gebietsmorphologie und Klima innerhalb des Betrachtungszeitraums für das SMA- und das HAA-Lager) zu untersuchen und in den Dosisberechnungen zu berücksichtigen.

Dazu hat das ENSI festgehalten, dass die im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston verwendete Biosphärenmodellierung konzeptuell für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalyse ausreichend ist.

## 10.1 Relevante Exfiltrationspfade

### Angaben der Nagra

Die potenzielle Radionuklidfreisetzung in die Biosphäre erfolgt (nach der Barriere Wirtgestein) über wasserführende Schichten in den Rahmengesteinen und/oder über die regionalen Tiefenaquifere.

Für zwischeneiszeitliche Bedingungen wird angenommen, dass eine zukünftige Radionuklidfreisetzung an den tiefsten Punkten der Kontaktzone zwischen Biosphären-Aquifer und demjenigen regionalen Tiefenaquifer stattfindet, in welchem die Radionuklide nach ihrer Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch die Geosphäre bis in die Biosphäre transportiert werden. Die tiefsten Punkte befinden sich meist in Talsohlen von Haupt- und grösseren Seitentälern innerhalb des betreffenden Exfiltrationsgebiets.

Tabelle 10-2 vermittelt eine Übersicht der heutigen Situation bezüglich der Referenz- und alternative Exfiltrationsorte für die verschiedenen geologischen Standortgebiete.

Für alle geologischen Standortgebiete wird somit angenommen, dass die Radionuklidfreisetzung in einen quartären Aquifer in der Talsohle eines Haupt- oder Seitentals erfolgt. Typische Haupt- und Seitentäler weisen zum heutigen Zeitpunkt Grundwasserströme in der Grössenordnung von  $10^6$  m<sup>3</sup>/Jahr auf. Aus diesen Gründen werden für die Testrechnungen für alle geologischen Standortgebiete dieselben Annahmen bezüglich der geomorphologischen Bedingungen und der Wasserflüsse in der Biosphäre getroffen. Damit ist sichergestellt, dass es keine standortspezifischen Annahmen für die Biosphäre gibt, welche Unterschiede in der Wirkung der geologischen Barrieren in den verschiedenen Standortgebieten überdecken würden.

Tabelle 10-2: Referenz- und alternative Exfiltrationsorte (kursiv) für die verschiedenen geologischen Standortgebiete (heutige Situation, Tabelle 4.7-2 aus NTB 10-01).

<b>Geologisches Standortgebiet</b>	<b>Wirtgestein</b>	<b>Exfiltrationsort im Referenzfall</b> <b>Alternative Exfiltrationsorte</b>
Südranden (nur SMA)	Opalinuston	Rheinfallbecken (Exfiltration via Malmkalke) <i>Klettgaurinne (Sandsteinkeuper und Wedelsandstein); Wangental (Malmkalke); Rheintal/Wutachtal im Raum Koblenz (Muschelkalk)</i>
Zürich Nord-Ost (SMA und HAA)	'Brauner Dogger' (nur SMA), Opalinuston	Rheinfallbecken (Exfiltration via Malmkalke) <i>Klettgaurinne (Sandsteinkeuper); Rheintal im Raum Koblenz und Neckar (Muschelkalk)</i>
Nördlich Lägeren (SMA und HAA)	'Brauner Dogger' (nur SMA), Opalinuston	Rheintal im Raum Mellikon – Kaiserstuhl (Exfiltration via Malmkalke) <i>Rheintal im Raum Koblenz (Muschelkalk), Rheintal im Raum Bad Zurzach (Sandsteinkeuper)</i>
Bözberg (SMA und HAA)	Opalinuston	Unteres Aaretal (oberer Mittelkeuper) <i>Unteres Aaretal (Hauptrogenstein), Tal der Sissle (Hauptrogenstein), Rheintal im Raum Laufenburg (via Muschelkalk)</i>
Jura-Südfuss (nur SMA)	Effinger Schichten	Aaretal (Exfiltration via Malmkalke) <i>Hauptrogenstein/Birmenstorfer Schichten</i>
	Opalinuston	Aaretal (Exfiltration via Hauptrogenstein/Birmenstorfer Schichten) <i>Aaretal (via Muschelkalk)</i>
Wellenberg (nur SMA)	Mergel-Formationen des Helvetikums	Engelbergertal (Exfiltration via Kalke der Drusberg-Decke) <i>Engelbergertal (via Rutschmasse; nur für obere Lager-ebene relevant)</i>

### Beurteilung des ENSI

Exfiltrationspfade und Exfiltrationsorte sind grundsätzlich standortspezifisch zu beurteilen. Als potenzielle Exfiltrationspfade kommen regionale oder (alternativ) lokale Tiefenaquifere in Betracht, so wie sie aus den entsprechenden Sammelprofilen der Standortgebiete ersichtlich sind. Nach Ansicht des ENSI ist es stufengerecht anzunehmen, dass das Grundwasser aus Tiefenaquiferen an der tiefsten Stelle der Oberfläche exfiltriert, d.h. in der Regel in grossen Flusstälern.

#### *Forderung 36*

Zur Bestätigung dieser Annahme fordert das ENSI im Hinblick auf Etappe 2 SGT eine Untersuchung der regionalen Fliessverhältnisse in den geologischen Standortgebieten auf der Grundlage eines grossräumigen hydrogeologischen Modells.

Im Standortgebiet Bözberg liegen die Exfiltrationsgebiete im unteren Aaretal (entspricht dem Referenzfall der durch die Nagra durchgeführten Testrechnungen), im Tal der Sissle oder im Rheintal (alternative Exfiltrationsorte). Ein Transport der Radionuklide in westlicher Richtung und eine Freisetzung ins Tal der Sissle stellt ein heute nicht grundsätzlich auszuschliessen-

des Szenarium dar. Die radiologischen Auswirkungen einer Exfiltration in ein kleines Tal hat die Nagra im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen zum Referenzfall durch breite Parametervariationen abgeschätzt (NAB 10-15). Die dazu berechneten Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK) streuen um diejenigen für den Referenzfall; zum Beispiel liegt für das oft dosisdominierende Nuklid I-129 der maximale BTK für die Situation «kleines Tal» ca. ein Faktor zwei über dem entsprechenden BTK des Referenzfalls.

Eine allfällige Exfiltration von Tiefengrundwasser in Hangquellen innerhalb einzelner geologischer Standortgebiete wird von der Nagra in NTB 10-01 nicht näher analysiert. Nach spezifischen Auskünften der Nagra im Rahmen eines Fachgesprächs zur Biosphäre bzw. Hydrogeologie stellt die Exfiltration in Hangquellen bei realistischer Bewertung der resultierenden Strahlendosen wegen einer beschränkten «capture rate» des Tiefengrundwassers (deutlich kleiner als 100%) und der Verdünnung durch lokale oberflächennahe Fliesssysteme allerdings keinen Sonderfall dar. Ferner ist die Nutzung von salinem Tiefengrundwasser nur bei genügend grosser Verdünnung möglich: Im Malmwasser in der Bohrung Benken beträgt der gemessene Chlorid-Gehalt 4500 mg/l, im genutzten Trinkwasser sind typischerweise höchstens 10 mg/l Chlorid enthalten. Ferner sind gemäss Angaben der Nagra in der Nordschweiz keine Exfiltrationen von tiefen Grundwässern in Hangquellen bekannt.

Damit beurteilt das ENSI den von der Nagra dokumentierten Kenntnisstand in Bezug auf die Exfiltration von Tiefengrundwasser für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT als stufengerecht, vorbehältlich belastbarer Untersuchungsergebnisse aus den vorgesehenen hydrogeologischen Modellrechnungen.

Eine ausführliche Diskussion und Bewertung der regionalen hydrogeologischen Verhältnisse ist in Kapitel 7 der vorliegenden Stellungnahme enthalten.

## **10.2 Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf die Biosphärenmodellierung**

### **Angaben der Nagra**

Es wird davon ausgegangen, dass die Flussnetze und Landschaftsbilder in allen zukünftigen Zeitphasen innerhalb des Betrachtungszeitraums, in denen eine subsistente landwirtschaftliche Produktion in der Schweiz möglich ist, etwa vergleichbar sind mit den heutigen geomorphologischen Verhältnissen (typische Haupt- und Seitentäler).

Die Biosphären-Modellierung stützt sich weitgehend auf die Modellkonzepte und Daten ab, die bereits im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (NTB 02-06) verwendet wurden.

### *Biosphären-Aquifer*

Einer der für die Dosisberechnungen wichtigen Biosphären-Parameter ist der Wasserfluss im Biosphären-Aquifer, in welchen die Radionuklide exfiltrieren und welcher die Verdünnung der Radionuklide bestimmt. Eine breite Evaluation der Daten zu den Grundwasserströmen in Talsohlen von typischen Haupt- und Seitentälern (NAB 10-15, vgl. Tabelle 10-3) zeigt, dass diese in der Grössenordnung von  $10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  liegen; dies ist vergleichbar mit den für die

Biosphärenmodellierung Wellenberg (NTB 94-06) und im Entsorgungsnachweis Projekt Opa-linuston (NTB 02-06) verwendeten Werten.

Tabelle 10-3: Typische Bandbreiten für hydraulische Durchlässigkeit, Gradient, Breite, mittlere Mächtigkeit und Wasserfluss von Biosphären-Aquiferen auf der Alpennordseite der Schweiz (Tabelle 3-1 aus NAB 10-15).

Taltyp	Typische Vertreter	Hydraulische Durchlässigkeit [m/s]	Hydraulischer Gradient [m/m]	Breite [m]	Mächtigkeit [m]	Wasserfluss [m <sup>3</sup> /Jahr]
Grosses Tal	Rhein, Aare	$6 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	600	10	$1 \cdot 10^6$
		$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	3'000	30	$1 \cdot 10^7$
Kleines Tal	Sissle, Wangental	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-3}$	100	3	$6 \cdot 10^4$
		$6 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	600	10	$1 \cdot 10^6$

Die sicherheitstechnischen Auswirkungen der Ungewissheiten bezüglich des Wasserflusses im Biosphären-Aquifer wurden anhand von separaten Biosphären-Modellrechnungen quantifiziert. Ausgehend vom Referenzwert für den Grundwasserstrom von ca.  $10^6$  m<sup>3</sup>/Jahr wurde ein um eine Grössenordnung verringerter Grundwasserstrom angenommen. Die so berechneten Biosphären-Transportkoeffizienten (BTK) liegen wie erwartet über denjenigen für den Referenzfall, fallen aber signifikant geringer aus als die für ein wärmeres und trockeneres Klima berechneten BTK.

Diese Abklärungen zeigen, dass die sicherheitstechnischen Auswirkungen der Ungewissheiten auch bezüglich des Wasserflusses im Biosphären-Aquifer durch die Analyse-Fälle zur Klimaentwicklung abdeckend erfasst werden (NAB 10-15).

## Beurteilung des ENSI

### *Geomorphologie der HAA-Standortgebiete*

Gemäss ENSI 33/075 haben die Entsorgungspflichtigen in der provisorischen Sicherheitsanalyse im Rahmen von Etappe 2 SGT die sicherheitstechnische Bedeutung von alternativen Biosphärenszenarien zu untersuchen, ebenfalls unter Verwendung von plausiblen Annahmen zu möglichen Entwicklungen von Gebietsmorphologie und Klima.

Das ENSI hat die in Etappe 1 SGT von der Nagra hergeleiteten Betrachtungszeiträume von 100 000 Jahren (SMA-Lager) und 1 000 000 Jahren (HAA-Lager) als nachvollziehbar beurteilt. Somit sind die möglichen Veränderungen der Biosphäre innerhalb dieser Betrachtungszeiträume für das SMA- bzw. das HAA-Lager für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 SGT aufzuzeigen und in den Dosisberechnungen zu berücksichtigen.

Gestützt auf eigene Überlegungen kommt das ENSI zum Schluss, dass die Landschaftsform in allen Standortgebieten über lange Zeiträume (bis maximal eine Million Jahre) mit der heutigen geomorphologischen Situation vergleichbar sein wird. Eine Annäherung an das Gleichgewichtsprofil – selbst bei Erosion des Rheinfalls – wird in der Nordschweiz zu keiner grundsätzlich anderen Geomorphologie (d.h. zu gleichen Taltypen) führen. Ferner schliesst sich

das ENSI der Beurteilung der Nagra an, dass eine subsistente landwirtschaftliche Produktion nur in dazu geeigneten Topografien, entsprechend den heutigen Geländeformen, möglich ist.

Das Standortgebiet Bözberg könnte in geomorphologischer Hinsicht ein Sonderfall sein: Es unterliegt potenziell den grössten geomorphologischen Einflüssen. Gemäss Rücksprache mit der Nagra ist dazu als Grundlage für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT eine separate Studie in Vorbereitung.

Eine ausführliche Diskussion und Bewertung der geologischen Langzeitentwicklung speziell der HAA-Standortgebiete ist in Kapitel 6 der vorliegenden Stellungnahme enthalten. Im Hinblick auf Etappe 2 SGT erwartet das ENSI von der Nagra, die Überlegungen zur geomorphologischen Entwicklung der geologischen Standortgebiete mit dem notwendigen Tiefgang darzulegen (siehe Forderung 10).

### *Biosphärenmodell*

Die Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich (ENSI 33/075) verlangen, dass die Modellierung der Radionuklidverbreitung in der Biosphäre unter Berücksichtigung der Expositionspfade und möglicher typischer Morphologien und Klimasituationen (inkl. Verdünnungspotenziale) spezifisch für jedes geologische Standortgebiet durchgeführt wird.

Die Nagra begründet das in den Testrechnungen für die Vorbereitung der provisorischen Sicherheitsanalysen verwendete *standortunabhängige* Biosphärenmodell auf entsprechende Anfrage des ENSI damit, dass

- damit die in den Testrechnungen aufgezeigten Unterschiede in den Rückhalteeigenschaften des Barriersystems in den verschiedenen geologischen Standortgebieten nicht durch unterschiedliche Annahmen bzgl. der Biosphäre (Verdünnung) überdeckt werden,
- die Ungewissheiten bzgl. der Langzeitentwicklung der Geomorphologie viel grösser sind als die geomorphologischen Unterschiede zwischen den Standortgebieten und
- die Eigenschaften der Vorfluter im Bezug auf den relevanten Wasserfluss bzw. das Verdünnungspotenzial für die zu betrachtenden Exfiltrationsorte (grosses Tal, kleines Tal) relativ ähnlich sind und mit vernünftigen Annahmen bzgl. der Bandbreiten der entsprechenden Modellparameter abgedeckt werden (siehe Tabelle 10-3, vgl. unten stehende Ausführungen).

Das ENSI schliesst sich dieser Argumentation an, fordert aber im Hinblick auf die Berichterstattung der Nagra für Etappe 2 SGT eine standortspezifische Darstellung der geomorphologischen Verhältnisse (siehe Forderung 10). Entsprechende Arbeiten zur zeitlichen Entwicklung der lokalen Topographie sind nach Angaben der Nagra in Vorbereitung.

### *Modellannahmen*

Die Testrechnungen der Nagra für den Radionuklidtransport in der Biosphäre und die Dosisberechnung stützen sich im Bezug auf den Referenzfall auf die folgenden Annahmen:

- Standortunabhängige Modellannahmen wie für Etappe 1 SGT bzw. Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston

- Heutige warmgemäßigte Klimaverhältnisse
- Einheitlicher Wasserfluss von  $1.48 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  im Biosphären-Aquifer (Vorfluter) für alle geologischen Standortgebiete; dieser Wert entspricht der Festlegung im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston und wurde durch die Experten der Nagra im Rahmen einer Neubeurteilung bestätigt (NAB 10-15 sowie Tabelle 10-3):

Grosses Tal (Rhein, Aare) typische Bandbreite  $10^6 - 10^7 \text{ m}^3/\text{Jahr}$

Kleines Tal (Sissle, Wangental) typische Bandbreite  $6 \cdot 10^4 - 10^6 \text{ m}^3/\text{Jahr}$

- Neubeurteilung der Bewässerung bei realistischen Annahmen bzgl. Evapotranspiration, Intensität und Dauer der Bewässerung, Leistungsfähigkeit der Brunnen (normalerweise erfolgt die Bewässerung aus Oberflächengewässern – nicht aus dem lokalen Aquifer wie im Biosphärenmodell konservativ angenommen) und als Variante nur für ausgewählte Kulturen.

Neben dem heutigen warmgemäßigten Klima (Referenzfall) untersucht die Nagra in den Testrechnungen die Auswirkungen eines wärmeren und trockeneren Klimas sowie eines eiszeitlichen Klimas.

Das in den Testrechnungen für den Radionuklidtransport und die Dosisberechnungen verwendete Biosphärenprogramm TAME (NTB 93-04) und die Eingabedaten (vgl. NAB 10-15, Anhang 3, Tabelle A3-1) wurden im behördlichen Gutachten zum Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston beurteilt (HSK 35/99). Aktuelle Änderungen der Eingabedaten betreffen die Werte für die Evapotranspiration und die Bewässerungsrate, welche im Zusammenhang mit den vorliegenden Testrechnungen für die provisorische Sicherheitsanalyse nach Einschätzung des ENSI durch die Nagra realitätsbezogen angepasst wurden:

- Evapotranspiration 0.6 m/Jahr
- Bewässerungsrate 0.3 m/Jahr (warmgemäßigtes Klima – Referenzfall) bzw. 0.6 m/Jahr (wärmeres und trockeneres Klima)

Die Verwendung von (zeitunabhängigen) Biosphären-Transferkoeffizienten (BTK, Einheit Sv/Bq) erachtet das ENSI im Rahmen der Testrechnungen bzw. im Hinblick auf die vorgesehenen provisorischen Sicherheitsanalysen als stufengerecht.

#### *Annahmen zum Biosphären-Aquifer*

In den vorgeschlagenen geologischen Standortgebieten bestimmt der Wasserfluss im Aquifer in der Regel die Verdünnung der Radionuklide in der Biosphäre. Neueste Untersuchungen von Experten der Nagra (NAB 10-15) zeigen, dass die Flussrate weniger stark von der betrachteten Landschaftsform (grosses bzw. kleines Tal) abhängt als ursprünglich angenommen.

In Bezug auf das Grundwasserangebot in der Biosphäre ist Tabelle 3-1 in NAB 10-15 massgebend. Die dort aufgeführten Fliessraten wurden mit spezifischen hydraulischen Durchlässigkeiten, lokalen hydraulischen Gradienten und realistischen geometrischen Dimensionen von oberflächennahen Grundwasserleitern abgeschätzt und repräsentieren eine typische Bandbreite für Biosphären-Aquifere, die allerdings nicht durch die Kombination aller Extrem-

werte bestimmt wird. Als Grundlage dazu wird gemäss Auskünften der Nagra eine entsprechende Analyse durchgeführt.

Sollte das Grundwasser im Biosphären-Aquifer eine ausgeprägte Schichtung aufweisen, so ist das Argument der Nagra gerechtfertigt, dass sich das Grundwasser wegen der anzunehmenden langen Filterstrecke des Brunnens (im Allgemeinen über die gesamte Mächtigkeit des Aquifers) gut durchmischt.

Das ENSI begrüsst, dass die Nagra im Hinblick auf Etappe 2 SGT für Dosisberechnungen im Zeitraum bis zu einigen zehntausend Jahren (wo sich die Ungewissheiten bzgl. der Langzeitentwicklung des Standortgebiets noch weniger stark auswirken) die Eigenschaften der Biosphäre verstärkt standortspezifisch abbilden möchte.

Einzelne Testrechnungen mit standortspezifischen Wasserflüssen hat die Nagra im Rahmen der vorgelegten Testrechnungen bereits durchgeführt. Dabei wurden die folgenden standortspezifischen Fließraten unterstellt:

- Wellenberg, Tal der Engelberger Aa  $3.2 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/Jahr (vgl. NTB 94-06)
- Jura-Südfuss  $1.1 \cdot 10^7$  m<sup>3</sup>/Jahr (vgl. NAB 10-15)

Das ENSI beurteilt das Vorgehen der Nagra im Bezug auf die Biosphärenmodellierung als zielorientiert und stufengerecht. Die Modellvarianten mit standortspezifischen Wasserflüssen im Biosphären-Aquifer werden als eine wertvolle (realistische) Ergänzung des Referenzfalls unter Voraussetzung eines einheitlichen Wasserflusses betrachtet.

#### *Forderung 37*

Das ENSI fordert in Hinblick auf Etappe 2 SGT eine Verarbeitung der vorhandenen Datenbasis in Bezug auf die Grundwasserverhältnisse in den quartären Ablagerungen typischer grosser und kleiner Täler im Gebiet der Nordschweiz.

### **10.3 Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung**

#### **Angaben der Nagra**

In den Testrechnungen zur Vorbereitung der provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 SGT wird eine Anzahl stilisierter Biosphärensituationen mit zeitlich konstanten Bedingungen (Klima, Geomorphologie, Wasserflüsse etc.) angenommen, die für verschiedene Phasen der Klimaentwicklung typisch sind. Damit werden inhärente (nicht reduzierbare) Ungewissheiten bezüglich Klima berücksichtigt. Es wird ferner davon ausgegangen, dass die auf zukünftige Erosionsprozesse zurückzuführenden, langfristigen Ungewissheiten über die geomorphologischen Verhältnisse innerhalb der geologischen Standortgebiete grösser sind als die zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erwartenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Standortgebieten.

### *Heutiges Klima*

Das heutige Klima ist warmgemäßigt und ist typisch für zwischeneiszeitliche Bedingungen. Auf der Alpennordseite variiert die jährliche Niederschlagsrate zwischen 0.8 m/Jahr und 1.2 m/Jahr, und die jährliche Evapotranspirationsrate beträgt ca. 0.5 bis 0.6 m/Jahr.

Das Modellkonzept und die zugrunde liegenden Daten für den Referenzfall entsprechen denjenigen aus Etappe 1 SGT (NTB 08-05), mit Ausnahme einer Bewässerungsrate von 0.3 m/Jahr aus dem lokalen Biosphären-Aquifer, die im Hinblick auf eine realistischere Abbildung der Landwirtschaftsformen gegenüber dem in Etappe 1 SGT verwendeten Wert von 0.5 m/Jahr leicht reduziert wurde, und der damit verbundenen Änderungen der Wasser- und Feststoffflüsse in den verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre.

Entsprechend den Hinweisen in ENSI 33/075 erfolgen die Dosisberechnungen im Referenzfall für heutige (warmgemäßigte) Klimaverhältnisse. Zusätzlich werden alternative Fälle für ein wärmeres und trockeneres Klima (Typ mediterranes Klima) sowie für ein eiszeitliches Klima untersucht.

### *Wärmeres und trockeneres Klima*

Dieses Klima ist typisch für zwischeneiszeitliche Bedingungen mit erhöhten Temperaturen und geringeren Niederschlägen; es entspricht den Typen Csa und Csb nach Köppen-Geiger (typisch mediterrane Klimata, Kottek et al. 2006). Es wird angenommen, dass die typischen Niederschlags- und Evapotranspirationsraten räumlich und zeitlich stark variieren (Annahme: jährliche Niederschlagsrate zwischen 0.3 m/Jahr bis teilweise deutlich über 1 m/Jahr) und die jährliche Evapotranspirationsrate zwischen 0.3 m/Jahr bis deutlich über 1 m/Jahr liegt.

Auch für den Analysefall mit einem wärmeren und trockeneren Klima werden weitgehend dieselben konzeptuellen Annahmen und Inputdaten wie in Etappe 1 SGT (NTB 08-05) verwendet, mit Ausnahme einer gegenüber dem Referenzfall erhöhten Bewässerungsrate von 0.6 m/Jahr aus dem lokalen Biosphären-Aquifer und einer Evapotranspirationsrate von 0.6 m/Jahr, und der damit verbundenen Änderungen der Wasser- und Feststoffflüsse in den verschiedenen Kompartimenten der Biosphäre.

### *Eiszeitliches Klima*

Dieses Klima ist repräsentativ für eiszeitliche Bedingungen mit niedrigen Temperaturen und Gletschervorstössen bis ins Mittelland; es entspricht dem Typ ET («polar tundra») bzw. EF («polar frost») nach Köppen-Geiger. Die ET-Klimata sind typisch für die heutigen Tundren (nördliches Kanada, Grönlands Küstengebiete, Island, Spitzbergen etc.), während die EF-Klimata typisch für das Landesinnere von Grönland und für die Antarktis sind. Für eine Diskussion dieses Klimatyps wird auf das Biosphären-Szenarium «Periglaziales Klima» in (NTB 02-06) verwiesen.

Für den Analysefall mit einem eiszeitlichen Klima wird auf das im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston verwendete Modellkonzept zurückgegriffen. Eine Beschreibung dieses Modellkonzepts findet sich in Anhang A7 in Nagra (NTB 02-06). Wie dort festgehalten wurde, sind für das eiszeitliche Szenarium Dosen im Bereich von 1 bis 80% der für den Biosphären-Referenzfall berechneten Dosen zu erwarten. Um die volle Bandbreite in den Dosisintervallen sichtbar zu machen, wird im vorliegenden Bericht der untere Eckwert von 1%

verwendet, d.h. die Dosen für das eiszeitliche Klima ergeben sich rechnerisch durch eine Skalierung der Dosen für den Biosphären-Referenzfall mit dem Faktor 0.01.

### **Beurteilung des ENSI**

Im Hinblick auf die Ausbreitung der Radionuklide in der Biosphäre stellt das Klima den relevantesten Einflussfaktor dar. Das Klima beeinflusst die hydrologischen Verhältnisse, die landwirtschaftliche Produktion und die Ernährung der Bevölkerung. Das ENSI teilt die Beurteilung der Nagra, dass die Klimaentwicklung als ein grossräumiges und damit nicht-standortspezifisches Phänomen zu betrachten ist.

Das standardisierte Parametervariationsverfahren (ENSI 33/075) verlangt, dass ausgehend vom Referenzfall der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten (wärmeres und trockeneres Klima, eiszeitliches Klima) im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen ist.

#### *Wärmeres und trockeneres Klima*

Landwirtschaftlich bewässert wird zur Kompensation mangelnder Niederschläge, d.h. während einer beschränkten Anzahl trockener Tage im Jahr und einer beschränkten Zeitdauer pro Tag. Dies erfordert eine relativ hohe Bewässerungsrate, welche in der Praxis häufig durch die Ergiebigkeit der entsprechenden Entnahmebrunnen eingeschränkt wird.

#### *Eiszeitliches Klima*

Der Permafrost schränkt den Transport von radionuklidhaltigem (Grund-) Wasser stark ein. Diese Klimavariante führt im Vergleich zum Referenzfall (heutiges warmgemäßigtes Klima) zu deutlich geringeren Strahlendosen und ist deshalb im Sinne von ENSI 33/075 für das Dosisintervall irrelevant – d.h. es betrifft das charakteristische Dosisintervall nicht.

Die geringeren berechneten Dosen für das eiszeitliche Klima begründet die Nagra damit, dass bei gleich bleibendem Exfiltrationsgebiet die für die Nahrungsmittelbeschaffung benötigte Fläche unter eiszeitlichen Klimabedingungen grösser wird, d.h. im Bezug auf die Ernährung der so genannten kritischen Bevölkerungsgruppe findet eine Vermischung mit Nahrungsmitteln aus entfernten Anbaugebieten statt.

Das ENSI stellt im Bezug auf die Analyse möglicher Klimaszenarien eine Übereinstimmung mit den Vorgaben gemäss ENSI 33/075 fest und beurteilt das Vorgehen der Nagra als stufengerecht für Etappe 2 SGT.

## 11 Testrechnungen für die Radionuklidausbreitung

Bei der Abklärung der Notwendigkeit von ergänzenden geologischen Untersuchungen im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT stützt sich die Nagra unter anderem auf die Ergebnisse von Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle für ein geologisches Tiefenlager in den jeweiligen Standortgebieten. Mit den Testrechnungen wird für die verschiedenen Lagertypen in den betrachteten geologischen Standortgebieten der zeitliche Verlauf der Dosiskurven für ein breites Spektrum von Rechenfällen ermittelt, mit denen neben der erwarteten Entwicklung (Referenzfall) auch die vorhandenen Variabilitäten und Ungewissheiten in den relevanten Prozessen und Parametern dargelegt und deren sicherheitstechnischen Konsequenzen ermittelt werden.

Die Testrechnungen basieren auf dem gegenwärtigen Kenntnisstand der Prozesse und Parameter und auf der Modell-Konzeptualisierung des Nahfelds, der Geosphäre und der Biosphäre. Das Vorgehen bei der Ableitung der relevanten Prozesse und Parameter und der Ermittlung der charakteristischen Dosisintervalle wurde in Kapitel 2 und 3 beurteilt. Die hydrogeologischen, geochemischen und physikalischen Prozesse und Parameter sowie ihre Ungewissheiten fließen in die Testrechnungen ein und wurden in den vorangehenden Kapiteln überprüft. Das ENSI beurteilt die Testrechnungen bezüglich der durchgeführten Rechenfälle (Kapitel 11.1), der Nahfeldkonzepte (Kapitel 11.2), der Wirt- und Rahmengesteinskonzepte (Kapitel 11.3) sowie der Konzeptualisierung des Wirt- und Rahmengesteins in den jeweiligen Standortgebieten (Kapitel 11.4). Die Resultate der Testrechnungen für die einzelnen Standortgebiete beurteilt das ENSI in Kapitel 11.5.

Da das ENSI die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen im Rahmen von Etappe 2 SGT detailliert überprüfen wird, beschränkt sich die numerische Überprüfung des ENSI in dieser Stellungnahme auf ausgewählte Kontrollrechnungen der Radionuklidausbreitung. Die Überprüfung konzentrierte sich vor allem auf die Beurteilung der Modellkonzepte und der Konzeptualisierung der Radionuklidfreisetzungspfade.

### 11.1 Rechenfälle für die Testrechnungen

#### Angaben der Nagra

Der Referenzfall bildet den Ausgangspunkt für alle weiteren Rechenfälle und bildet die standortspezifische Situation des gesamten einschlusswirksamen Bereichs in den essenziellen Elementen realistisch ab. Die Wahl der Referenzkonzepte und -parameter für die geologische Barriere beruht auf den standortspezifischen geologischen Datensätzen und auf Informationen über die technischen Barrieren und über die Biosphäre. Diese Datensätze und Informationen sind in NTB 10-01 dargelegt.

Entsprechend der Natur von Sicherheitsanalysen enthalten die verwendeten Modelle im Referenzfall jedoch Vereinfachungen, die teilweise mit pessimistischen bzw. konservativen Annahmen verbunden sind. Der Einfluss von bestehenden Ungewissheiten bezüglich der relevanten Prozesse und Parameter wird durch alternative Konzeptualisierungen und/oder Parametervariationen quantifiziert und fließt in die berechneten Dosisintervalle ein. Einerseits werden Parametervariationen zum Referenzfall gemacht, in welchen jeweils für einen einzelnen Parameter ein pessimistischer Wert verwendet wird. Dieser Wert ist der ungünstige

Eckwert der für die Parameter gewählten Bandbreiten. Andererseits basieren Variationsrechnungen auf alternativen Modellkonzepten mit dazugehörigen realistischen bis pessimistischen Parameterwerten.

Bei der Evaluation des Kenntnisstands wird zwischen folgenden Verwendungsbereichen der Information unterschieden: Beurteilung der technischen Machbarkeit, Systemanalysen, Dosisberechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle und qualitative Bewertung der geologischen Standortgebiete. Die Identifizierung der Rechenfälle bzw. die Wahl der zu analysierenden Varianten basiert auf einer Evaluation der noch nicht bei der Betrachtung der technischen Machbarkeit und der Systemanalysen abgehandelten relevanten Prozesse und Parameter. Es wird gezeigt, mit welchen Rechenfällen die Ungewissheiten in den verschiedenen Prozessen und Parametern in den Dosisberechnungen untersucht werden. Die aus dieser Evaluation resultierenden Rechenfälle wurden mit den Rechenfällen in früheren Sicherheitsanalysen verglichen, in denen die Rechenfälle im Rahmen von Szenarienanalysen abgeleitet wurden. Der Vergleich zeigt, dass die über die Evaluation der Prozesse und Parameter abgeleiteten Rechenfälle für die vorgegebenen Rahmenbedingungen adäquat sind. In NTB 10-01 steht die Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT im Vordergrund. Dementsprechend umfasst die Liste der Rechenfälle zur Evaluation des Einflusses von Ungewissheiten in Zusammenhang mit dem Nahfeld nur solche, die explizit in ENSI 33/075 verlangt werden.

#### *ENSI-Rechenfälle*

Gemäss ENSI 33/075 sind ausgehend vom Referenzfall mindestens die folgenden Rechenfälle zu betrachten:

- a) Berechnungen mit einem gegenüber dem Referenzfall erhöhten Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich.
- b) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall ungünstigen nuklidspezifischen Diffusionskoeffizienten in der Geosphäre.
- c) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall erhöhten nuklidspezifischen Löslichkeitslimiten im Nahfeld.
- d) Berechnungen mit gegenüber dem Referenzfall verringerten Sorptionskoeffizienten im Nah- und Fernfeld. Falls der  $K_d$ -Referenzwert eines Nuklids weniger als  $0.001 \text{ m}^3/\text{kg}$  beträgt, ist in den Berechnungen ein  $K_d$ -Wert von  $0 \text{ m}^3/\text{kg}$  zu verwenden.
- e) Ausgehend vom Referenzfall ist der Einfluss von möglichen alternativen Klimavarianten (eiszeitliches Klima, wärmeres und trockeneres Klima) im Betrachtungszeitraum für das SMA- resp. HAA-Lager aufzuzeigen.
- f) Für HAA-Abfälle: Berechnungen mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate der einzulagernden abgebrannten Brennelemente (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre).
- g) Für HAA-Abfälle: Berechnungen mit Annahme einer auf 1000 Jahre begrenzten Behälterlebensdauer.

### *Zusätzliche Rechenfälle*

Zusätzlich werden noch weitere, standortspezifische Variationsrechnungen erarbeitet, um alle Ungewissheiten bezüglich der Wirksamkeit der technischen und natürlichen Barrieren abdeckend zu erfassen. Diese Rechenfälle werden als «Alternative Fälle» bezeichnet.

Zur Illustration der Robustheit des Lagersystems werden ferner auch so genannte «What if?»-Fälle definiert und analysiert. Diese basieren auf konzeptuellen Modellen und/oder Parameterwerten, die zwar physikalisch grundsätzlich möglich sind, aber deutlich ausserhalb der durch Messungen oder Modellvorstellungen gestützten Konzepte und Parameterbandbreiten liegen.

Die zusätzlich durchgeführten Berechnungen umfassen folgende Kategorien:

- Erhöhter Wasserfluss durch den Tiefenlagerbereich (zusätzliche Fälle neben dem ENSI-Fall a)
- Alternative Konzeptualisierung des Radionuklidtransports im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (wo angebracht, Transport in geklüftetem Medium bzw. in kleineren wasserführenden Störungszonen)
- Veränderte Geochemie im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (wo angebracht, Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein, Auswirkungen einer reduzierten Kolloidfiltration in der Geosphäre, Auswirkungen einer erhöhten Salinität im Wirtgestein)
- Anwesenheit von sedimentären Architekturelementen im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (z.B. Sandkalkabfolgen, Kalkbankabfolgen)
- Anwesenheit von strukturellen Architekturelementen (wenig häufige, d.h. mit typischen Abständen im Hektometerbereich auftretende steil stehende wasserführende Störungszonen, welche die Lagerkammern schneiden)
- Ungewissheiten bezüglich der Länge der Transportpfade abgeleitet aus der Wirtgesteinsmächtigkeit und in Zusammenhang mit der Platzierung der Lagerkammern im Wirtgestein
- Ungewissheiten bezüglich Gesteins-Dekompaktion als Folge der Erosion (wo angebracht, zeitabhängige Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des Wirtgesteins)

### **Beurteilung des ENSI**

Die von der Nagra vorgeschlagenen Referenzfälle bilden aus Sicht des ENSI eine realistische Basis, um die zu erwartende zeitliche Entwicklung eines Lagers in den jeweiligen Standortgebieten beschreiben zu können. Die in die Berechnungen eingehenden Parameterwerte und ihre Ungewissheiten wurden in den vorangehenden Kapiteln beurteilt.

Die Nagra hat in NTB 10-01 die gemäss ENSI 33/075 definierten Rechenfälle a) bis g) ausgeführt und dokumentiert. Die Wahl von weiteren alternativen und «What if?»-Fällen dienen dazu, die Robustheit eines Lagers aufzuzeigen. Obwohl es in ENSI 33/075 nicht gefordert wurde, hat die Nagra in den Testrechnungen Rechenfälle («What if?»-Fälle) betrachtet, in denen eine Kombination von Parametern gleichzeitig geändert wurde. Es ist dabei festzuhalten, dass die vorgelegten Berechnungen keine umfassende Sicherheitsanalyse darstellen,

sondern stufengerecht die Variation der berechneten Dosen aufzeigen und somit auch die Robustheit der sicherheitstechnischen Einstufung der jeweiligen Standortgebiete illustrieren. Die Berücksichtigung von Rechenfällen mit ungünstigen Annahmen ist aus Sicht des ENSI ein geeignetes Mittel, um die sicherheitstechnische Eignung bei vorhandenen Variabilitäten und Ungewissheiten in den Parameterwerten und Prozessen belastbar darzulegen. In diesem Sinn sind die von der Nagra gewählten Rechenfälle zielführend.

## 11.2 Modellkonzepte für das Nahfeld

### Angaben der Nagra

Die verwendeten Konzepte und Inputdaten entsprechen grundsätzlich denjenigen aus Etappe 1 SGT. Dies gilt auch für die Auswahl der sicherheitsrelevanten Radionuklide. In Unterschied zu Etappe 1 SGT betrachtet die Nagra in den Testrechnungen ein umhüllendes Inventar, Modelle für Kombilager und für zweistöckige SMA-Lager, was die Zuteilung der Abfälle in den Standortgebieten für das SMA- und HAA-Lager beeinflusst:

Für die Testrechnungen wird ein umhüllendes Inventar verwendet, welches – neben insgesamt erhöhtem Volumen und Radionuklidinventar – für einzelne BE-Abfallsorten leicht unterschiedliche Nuklid- und Materialvektoren aufweist. Das umhüllende Inventar besteht aus den Abfällen aus 60 Jahre Betrieb der heutigen und von drei neuen KKW sowie einer entsprechend angepassten Sammelperiode für die MIF-Abfälle.

Für die geologischen Standortgebiete für das HAA-Lager (Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren und Bözberg) werden auch Dosisberechnungen für ein Kombilager durchgeführt. Es wird ferner ein Modell für ein zweistöckiges Lager betrachtet, in dem das SMA-Inventar in den geologischen Standortgebieten Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren, Jura-Südfuss und Wellenberg auf zwei Lagerebenen aufgeteilt wird. Die gewählte Zuteilung der Abfallsorten auf die Lagerebenen ist in NTB 10-01 dokumentiert.

Die wichtigsten konzeptuellen Annahmen zum Radionuklidtransport im Nahfeld werden im Folgenden kurz zusammengefasst:

#### *Schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) und langlebige mittelaktive Abfälle (LMA):*

- Die Radionuklide liegen von Beginn an in vollständig mobilisierter Form vor. Unter Berücksichtigung der Sorption und im Fall der LMA wird auch die beschränkte elementspezifische Löslichkeit berücksichtigt. Eine Ausnahme bildet das in ausgewählten metallischen Komponenten vorhandene Kohlenstoff-14, das mit einer konstanten Rate entsprechend der Korrosion aus der Abfallmatrix freigesetzt wird.
- Der Radionuklidtransport im Nahfeld erfolgt im Fall SMA advektiv/dispersiv und diffusiv und im Fall LMA diffusiv wegen der kleinen Wasserfließgeschwindigkeit als Folge der sehr kleinen Durchlässigkeit des Wirtgesteins Opalinuston, unter Berücksichtigung der Sorption, des radioaktiven Zerfalls und der durch die standortspezifischen im Wirtgestein bestehenden Bedingungen (homogen-poröses Medium, Störungszonen, sedimentäre Architekturelemente mit erhöhter Durchlässigkeit).

### *Hochaktive Abfälle (BE/HAA):*

- Die Freisetzung der Radionuklide aus der Abfallmatrix ins Bentonit-Porenwasser beginnt nach dem Zeitpunkt des Behälterversagens und erfolgt unter Berücksichtigung der langsamen Matrixauflösung und der beschränkten elementspezifischen Löslichkeiten.
- Der Radionuklidtransport in der Bentonit-Verfüllung erfolgt diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, der Löslichkeitslimiten und des radioaktiven Zerfalls. Eine Advektion ist wegen der sehr kleinen hydraulischen Durchlässigkeit des Bentonits innerhalb der kurzen Distanzen des Nahfelds vernachlässigbar und findet in den Transportberechnungen keine Berücksichtigung.
- In den Dosisberechnungen für das geologische Standortgebiet Nördlich Lägeren wird ein vollflächiger Ausbau der HAA-Lagerstollen angenommen und dessen Auswirkungen auf die Transporteigenschaften des Nahfelds berücksichtigt. Der Vergleich der Berechnungen ohne Liner und mit Liner zeigt, dass die Barrierenwirkung des Nahfelds nur geringfügig beeinträchtigt wird und die Auswirkungen auf die berechneten Freisetzungsraten aus der Geosphäre vernachlässigbar sind.

Die im Referenzfall verwendeten fraktionalen Auflösungsraten für abgebrannte Brennelemente sind in NTB 10-01, Tabelle A6-3 aufgeführt. Die zeitabhängigen Auflösungsraten für die einzelnen Brennstofftypen (UO<sub>2</sub> und MOX) entsprechen jenen im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston (Tabelle A2.2.2 in NTB 02-05). Für die Brennelementhüllrohre wird eine konstante Auflösungsrate von  $3 \cdot 10^{-5}$  pro Jahr angenommen.

Gemäss Vorgabe des ENSI wird ein abdeckender Rechenfall für abgebrannte Brennelemente mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre) analysiert, was aufgrund der in NTB 10-01 beschriebenen experimentellen Befunde als sehr pessimistisch eingestuft wird.

### **Beurteilung des ENSI**

Die Verwendung eines umhüllenden Inventars durch die Nagra ist aus Sicht des ENSI zielführend, um die Ungewissheiten des realen Inventars abdecken zu können. Die Auswahl der sicherheitsrelevanten Radionuklide für die verschiedenen Lagertypen bleibt unverändert gegenüber Etappe 1 SGT. Die von der Nagra getroffene Auswahl wurde vom ENSI mit eigenen Berechnungen überprüft und wird als korrekt beurteilt.

Die Nagra hat im Referenzfall die Aufteilung des Inventars eines SMA-Lagers auf zwei Lagerebenen in unterschiedlichen Wirtgesteinen verwendet. Dies kann hinsichtlich der lagerbedingten Einflüsse (Gasproduktion im Tiefenlager) Vorteile haben. Um die radiologischen Auswirkungen des zweistöckigen Lagerkonzepts mit denen des einstöckigen Lagerkonzepts in einem Wirtgestein zu vergleichen, hat die Nagra auf Anfrage des ENSI zusätzliche Berechnungen mit den vom ENSI vorgeschriebenen Variationen durchgeführt, bei denen das gesamte Inventar in nur einer SMA-Lagerebene gelagert ist. Die Resultate zeigen, dass beide radiologische Kriterien (Schutzkriterium der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr und der aus der StSV abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr) ebenfalls eingehalten werden können.

In den Testrechnungen hat die Nagra für den Beginn der Radionuklidfreisetzung sowohl für LMA als auch SMA 100 Jahre nach Einlagerung angenommen. In Etappe 1 SGT war die

Nagra im Falle der SMA noch von einer instantanen Freisetzung ausgegangen. Das ENSI hat mit Kontrollrechnungen überprüft, ob diese Änderung des Beginns der Radionuklidfreisetzung aus den Lagerkavernen einen Einfluss auf die berechneten radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre hat und fand keine relevanten Unterschiede. Der Beginn der Freisetzung von Radionukliden aus dem Tiefenlager wird u.a. von der Dauer der Aufsättigung des Nahfelds nach dem Verschluss bestimmt.

#### *Forderung 38*

In den künftigen Sicherheitsanalysen der Nagra sind auch die Wechselwirkungen des Aufsättigungsprozesses mit lagerinduzierten Prozessen für alle Wirtgesteine standortspezifisch zu untersuchen.

Die Wechselwirkungen von zementhaltigen Materialien mit dem Wirtgestein Opalinuston wurde bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises (ENSI 35/99) und im Rahmen von Etappe 1 SGT (ENSI 33/070) beurteilt. Die Wechselwirkungen des Spritzbetonliners im HAA-Lager mit dem Wirtgestein Opalinuston und Bentonit wird in dieser Stellungnahme im Kapitel 8 diskutiert. Das ENSI teilt die Ansicht der Nagra, dass die radiologischen Auswirkungen durch das Einbringen eines Spritzbetonliners im HAA-Lager aufgrund der sehr guten Barriereigenschaften des Wirtgesteins klein sind. Die Wechselwirkungen der Bentonitverfüllung eines HAA-Lagerstollens mit dem Spritzbeton sowie ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind in Etappe 2 SGT zu vertiefen.

Die fraktionellen Auflösungsraten für  $UO_2/MOX$  (Brennstoff-)Matrizen und Brennelementhüllrohre wurden bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston überprüft (CNWRA 2004; HSK 35/99). Das ENSI beurteilt die Modellbeschreibung der Auflösung der abgebrannten Brennelemente unter den im Tiefenlager vorherrschenden Bedingungen als adäquat, obwohl nicht alle Modellparameter experimentell gut belegbar sind. Die Ungewissheiten werden mit einem abdeckenden Rechenfall für abgebrannte Brennelemente mit einer gegenüber dem Referenzfall hundertfach erhöhten Auflösungsrate (Brennstoffmatrix und Brennelementhüllrohre) berücksichtigt.

### **11.3 Modellkonzepte für die Wirt- und Rahmengesteine**

#### **Angaben der Nagra**

Da das Modellkonzept für die Geosphäre das Wirtgestein und die oberen Rahmengesteine umfasst, wurde die Modellierung des Radionuklidtransports in der Geosphäre standortspezifisch durchgeführt; dabei wird vereinfachend angenommen, dass der Radionuklidtransport hauptsächlich in vertikaler (von unten nach oben) Richtung erfolgt.

Neben den möglichen Transportpfaden im Wirtgestein wird in den Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle auch die Radionuklidrückhaltung innerhalb der Rahmengesteine systematisch und quantitativ betrachtet.

Wasserführende sedimentäre Architekturelemente im Gesteinsaufbau des einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden explizit berücksichtigt. Für einige alternative Rechenfälle ergeben sich Verzweigungen in den Transportpfaden, an welchen sich die Radionuklidflüsse aufteilen.

Der Radionuklidtransport in der Geosphäre erfolgt advektiv/dispersiv und diffusiv, unter Berücksichtigung der Sorption, des radioaktiven Zerfalls und Aufbaus sowie der standortspezifischen Architekturelemente im Wirtgestein und in den Rahmengesteinen. Dabei wird die unterschiedliche Radionuklid-Rückhaltung im Wirtgestein, in den Rahmengesteinen, in den z.T. darin eingebetteten sedimentären Architekturelementen (z.B. Sandkalkabfolgen im 'Braunen Dogger'; Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten) sowie z.T. in den verschiedenen im Wirtgestein bzw. in den Rahmengesteinen bestehenden Fazies mit unterschiedlichem Tongehalt in den Testrechnungen durch Verwendung von gesteinspezifischen Sorptionsdaten explizit berücksichtigt.

Für den Radionuklidtransport in der Geosphäre verwendet die Nagra das Programm PICNIC. Die Geosphäre (Wirtgestein und Rahmengesteine, unter Berücksichtigung von sedimentären Architekturelementen) wird zu diesem Zweck als Netzwerk von eindimensionalen Transportpfaden (so genannten «PICNIC-Legs») mit konsistenten Wasserflussraten abgebildet. Die «PICNIC-Legs» repräsentieren äquivalent-poröse Transportpfade oder diskrete wasserführende Strukturen wie Klüfte, Störungszonen, Kanäle oder sedimentäre Architekturelemente, mit der Möglichkeit einer Diffusion der Radionuklide in das stagnierende Porenwasser der angrenzenden (homogenen oder heterogenen) Gesteinsmatrix.

Wirtgesteine und Rahmengesteine, die keine wasserführende Klüftung aufweisen, werden als homogen-poröses Medium abgebildet. Engständig geklüftete Wirtgesteine und Rahmengesteine werden mittels eines «PICNIC-Legs» für eine Kluft (hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität bzw. den Wasserfluss) modelliert; die Radionuklidfreisetzung aus dem Nahfeld wird dabei in das entsprechende «PICNIC-Leg» im Wirtgestein eingespeist.

Sedimentäre Architekturelemente im Wirtgestein oder in den Rahmengesteinen, die in spezifischen Situationen einen horizontalen Transportpfad bilden können, werden ebenfalls mittels separater «PICNIC-Legs» modelliert (hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität von Klüften bzw. den Wasserfluss innerhalb des sedimentären Architekturelements). Steht ein sedimentäres Architekturelement in direkter Verbindung mit einer Lagerkammer, so wird der entsprechende Anteil der Nahfeldfreisetzung in ein entsprechendes «PICNIC-Leg» für das sedimentäre Architekturelement eingespeist.

Im Fall von steil stehenden grossräumigen Störungszonen, welche eine oder mehrere Lagerkammern schneiden, wird die Nahfeldfreisetzung in zwei separate «PICNIC-Legs» (einerseits Störungszonen, hydraulisch charakterisiert durch die Transmissivität bzw. den Wasserfluss, und andererseits das Wirtgestein zwischen Störungszonen, hydraulisch charakterisiert durch die hydraulische Durchlässigkeit bzw. den Wasserfluss) eingespeist, analog dem Vorgehen in Etappe 1 SGT (NTB 08-05). Das Wirtgestein zwischen Störungszonen wird hierbei entweder durch ein homogen-poröses Medium ohne Klüftung repräsentiert oder aber durch eine engständige Klüftung, wie oben beschrieben. Die Störungszone wird vereinfacht als offene Kluft innerhalb eines diffusionszugänglichen Gesteinsbereichs modelliert; die Radionuklidrückhaltung im Füllmaterial der Störungszone wird dadurch konservativ vernachlässigt. Eine weitere vereinfachende pessimistische Annahme ist die Verwendung von konstanten hydraulischen Gradienten, unabhängig von der angenommenen Transmissivität der Störungszonen. In Wirklichkeit nehmen die hydraulischen Gradienten mit steigender Transmissivität ab.

Eine vollständige Zusammenstellung der verwendeten Daten findet sich in NTB 10-01 und im elektronischen Daten- und Resultateordner (Nagra 2010b).

In den Testrechnungen wird die Radionuklidfreisetzung aus dem Opalinuston nur via obere Rahmengesteine betrachtet, weil dieser Fall zu vergleichbaren oder eher ungünstigeren Ergebnissen führt (z.B. im Fall von einer erhöhten Durchlässigkeit der unmittelbar über dem Opalinuston liegenden Murchisonae-Schichten). Die lithologisch-hydrogeologischen Eigenschaften der unteren Rahmengesteine (Basis Opalinuston bis Top Muschelkalk) sind regional variabel; in jedem Fall wird aber die Bedeutung der Rahmengesteine durch den in den Testrechnungen berücksichtigten «What if?»-Fall ohne Rahmengesteine abgedeckt.

### **Beurteilung des ENSI**

Die meisten Annahmen für die Testrechnungen entsprechen denjenigen der generischen Berechnungen in Etappe 1 SGT und wurden in ENSI 33/070 beurteilt. Die hydrogeologischen und geochemischen Parameter für die Wirt- und Rahmengesteine werden in den Kapiteln 4, 7 und 9 beurteilt.

Die Testrechnungen umfassen den Radionuklidtransport im Wirt- und in den Rahmengesteinen. Dies ist eine Erweiterung gegenüber den generischen Sicherheitsbetrachtungen in Etappe 1, wo nur der Transport im Wirtgestein betrachtet wurde und entspricht den Anforderungen des Sachplans nach einer standortspezifischen Analyse. Aus Sicht des ENSI ist diese Konzeptualisierung stufengerecht.

Das Programm PICNIC wurde auch für die Ausbreitungsrechnungen im Entsorgungsnachweis Projekt Opalinuston und in Etappe 1 SGT verwendet. Zur Modellierung der Transportprozesse in der Geosphäre wird von der Nagra in Etappe 1 SGT und in den Testrechnungen vereinfachend angenommen, dass alle Transportpfade innerhalb eines Architekturelements gleiche Eigenschaften haben. Aus diesem Grund können Transportpfade mit einem einzelnen eindimensionalen Transportpfad modelliert werden. Das ENSI stützt sich bei der Überprüfung der Nagra-Testrechnungen auf die Ergebnisse der ENSI-Berechnungen in Etappe 1 SGT (ENSI 33/070) und auf zusätzlich ausgewählte Kontrollrechnungen.

In den Testrechnungen hat die Nagra für Eigenschaften des Wirtgesteins teilweise konservative Annahmen verwendet, die aber nicht zu einer Änderung der sicherheitstechnischen Einstufung führten. Dieses Vorgehen stuft das ENSI als sicherheitsgerichtet und zielführend ein.

#### *Forderung 39*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT bei der Konzeptualisierung der Exfiltrationspfade die unteren Rahmengesteine in den sicherheitstechnischen Vergleich einzubeziehen.

## **11.4 Konzeptualisierung der Wirt- und Rahmengesteine in den jeweiligen Standortgebieten**

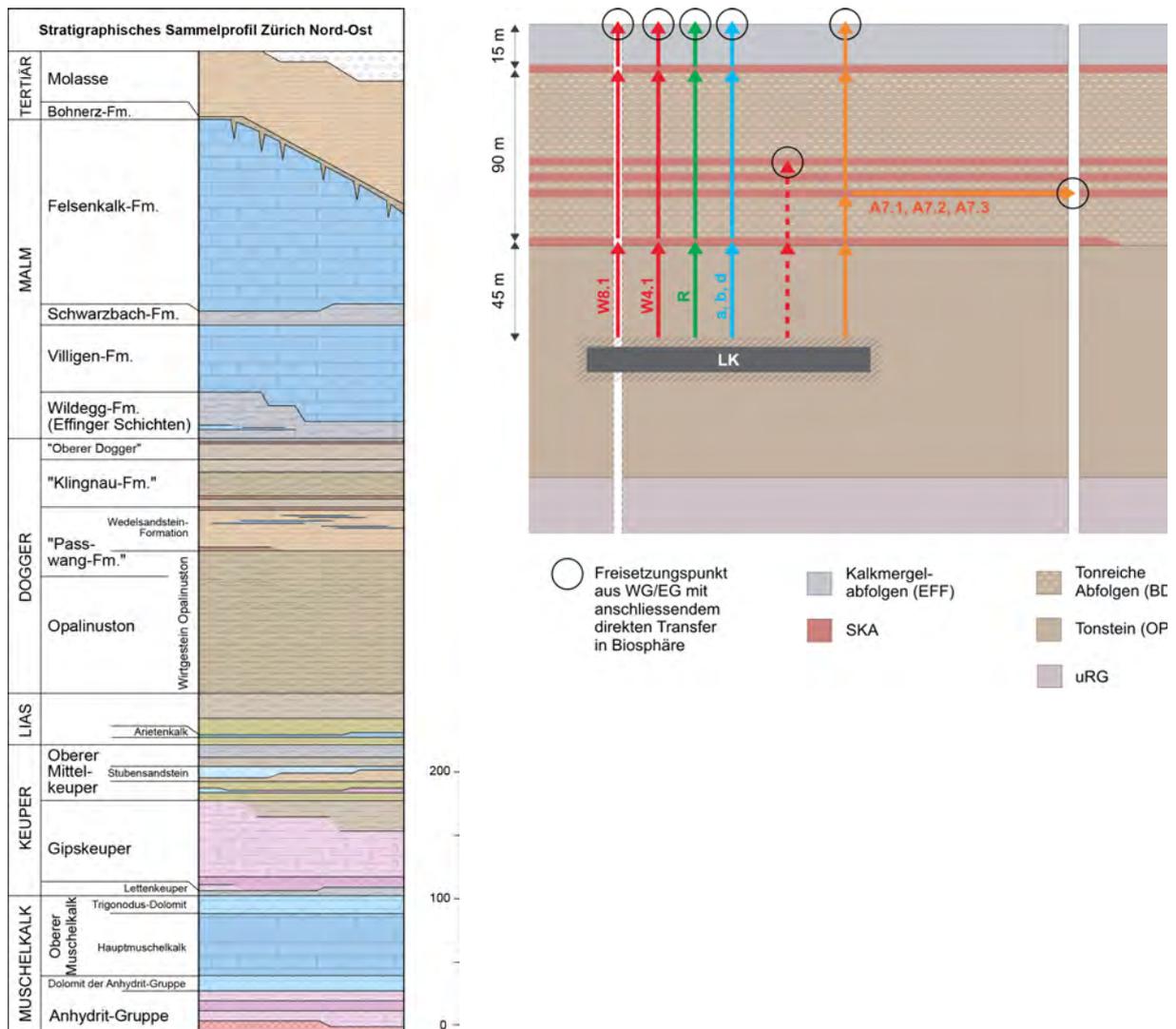
### **Angaben der Nagra**

Im Anhang A5 (NTB 10-01) werden die in den Rechenfällen der Testrechnungen in Anhang A4 (NTB 10-01) verwendeten Modellkonzepte für die Transportpfade im Wirtgestein und in

den oberen Rahmengesteinen in den verschiedenen geologischen Standortgebieten dargestellt, und es wird erläutert, wie die Ungewissheiten bezüglich verschiedener geologischer Aspekte in den Rechenfällen berücksichtigt werden. Für jedes geologische Standortgebiet wird anhand von Schemata und Kurzbeschreibungen der betrachteten Rechenfalltypen (Referenzfall, ausgewählte alternative Fälle und «What if?»-Fälle) aufgezeigt, wie die Radionuklidfreisetzung durch das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzeptualisiert wird. Ein entsprechendes Beispiel für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost wird in Figur 11-1 dargestellt. Für geologische Standortgebiete mit mehreren Lagertypen werden die möglichen Transportpfade jeweils in den gleichen Schemata dargestellt. Im Falle der geologischen Standortgebiete Zürich Nord-Ost und Jura-Südfuss sind für verschiedene Varianten der Lagerkammeranordnung in der oberen Lagerebene spezifische Schemata für die Transportpfade aufgeführt. In Standortgebieten mit einer oberen und einer unteren Lagerebene ist die obere Lagerebene ausschliesslich für SMA-Lagerkammern vorgesehen.

Die möglichen Auswirkungen eines wasserführenden sedimentären Architekturelements im Wirtgestein oder in den Rahmengesteinen auf die Radionuklidfreisetzung werden jeweils mit einem Set von alternativen Fällen untersucht. Die potenziellen Auswirkungen von stark wasserführenden sedimentären Architekturelementen im Wirtgestein bzw. in den Rahmengesteinen (angedeutet durch exemplarische gestrichelte Transportpfade in den Figuren A5-1 bis A5-6, NTB 10-01) werden jeweils durch einen «What if?»-Fall mit verkürzter Transportpfadlänge im Wirtgestein bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Radionuklidrückhaltung in den Rahmengesteinen abdeckend erfasst.

Für alternative Rechenfälle mit Radionuklidfreisetzung entlang transmissiver geklüfteter sedimentärer Architekturelemente, kleinräumiger vertikaler Klüfte und Störungszonen wird jeweils zusätzlich auch ein Fall mit reduzierter Kolloidfiltration bei Transport in diesem Architekturelementen betrachtet. Schneiden diesen Architekturelemente eine Lagerkammer, werden die Auswirkungen einer pH-Fahne auf die Sorption in diesem Architekturelement mit einem alternativen Rechenfall analysiert.



Figur 11-1: Beispiel einer Konzeptualisierung des geologischen Barrierensystems. Links: Schematisches stratigraphisch-hydrogeologisches Sammelprofil für das Standortgebiet Zürich Nord-Ost. Rechts: Modellkonzepte für die Testrechnungen des Radionuklidtransports im geologischen Standortgebiet Zürich Nord-Ost (modifiziert aus Figur A3-12 und A5-2b, NTB 10-01). Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), alternative Fälle (orange), «What if?»-Fälle (rot).

Die Konzeptualisierung der Schichtabfolgen wird ausgehend von aufdatierten, teilweise detaillierten Sammelprofilen ausgeführt. Der ganze Prozess von der Erstellung des Sammelprofils bis zur Modellkonzeptualisierung ist ein Abstraktionsprozess. Für die Quantifizierung wird, wo sinnvoll, von Beobachtungen an Bohrungen ausgegangen, und wo notwendig werden alternative Annahmen zur Abdeckung der Variabilität verwendet. Die Mächtigkeiten werden ausgehend von GIS-Layern bestimmt.

Bei den heterogen aufgebauten Wirtgesteinen (Effinger Schichten, 'Brauner Dogger') wird in der Regel eine Anordnung der SMA-Lagerkammern in den tonreicheren Bereichen des Wirtgesteins angenommen (NTB 10-01, S. 66).

Die Nagra hat für alle Standortgebiete die Transportpfadlängen auf die Anteile mit höherem bzw. niedrigerem Tonmineralgehalt (Kalkbankabfolgen bzw. Sandkalkabfolgen) aufgeteilt (NTB 10-01, Tabellen A4-3 und A4-4).

### Beurteilung des ENSI

Die vorgelegten Konzepte für die Transportpfade in den Wirt- und Rahmengesteinen und der den Modellierungen der Nagra zugrunde liegende heutige Kenntnisstand über die geologischen Barrierensysteme sind für das ENSI nachvollziehbar. Die Konzepte sind für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen und des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete ausreichend. Die Rechenfälle decken eine genügend grosse Konfigurationsbandbreite der möglichen Radionuklid-Ausbreitungspfade mit ihren Ungewissheiten ab.

#### *Forderung 40*

Für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten fordert das ENSI, dass die Resultate der ergänzenden Untersuchungen in den Modellkonzeptualisierungen für die Ausbreitungsberechnungen berücksichtigt werden.

Es ist beim aktuellen Kenntnisstand nicht sicher, dass die Lagerkammern für ein SMA-Lager in allen Standortgebieten ausschliesslich in tonreichen Bereichen der Wirtgesteine Effinger Schichten und 'Brauner Dogger' platziert werden können, da die laterale und vertikale Verteilung tonärmerer Bereiche in den Effinger Schichten und im 'Braunen Dogger' noch nicht zuverlässig bekannt sind.

#### *Forderung 41*

Das ENSI fordert deshalb, dass die Nagra für Etappe 2 SGT lithologische Variabilitäten im Bereich der Lagerkammern in die Sicherheitsbetrachtungen einbezieht und die sicherheitsrelevanten Auswirkungen der möglichen Anordnungen von SMA-Lagerkavernen in diesen Gesteinsabschnitten untersucht.

## 11.5 Resultate der Testrechnungen

### Angaben der Nagra

Für die verschiedenen von der Nagra für Etappe 1 SGT vorgeschlagenen geologischen Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager (mit der Möglichkeit eines Kombilagers in drei Standortgebieten) wurden Testrechnungen zum Dosisverlauf durchgeführt, entsprechend der Liste der identifizierten Rechenfälle.

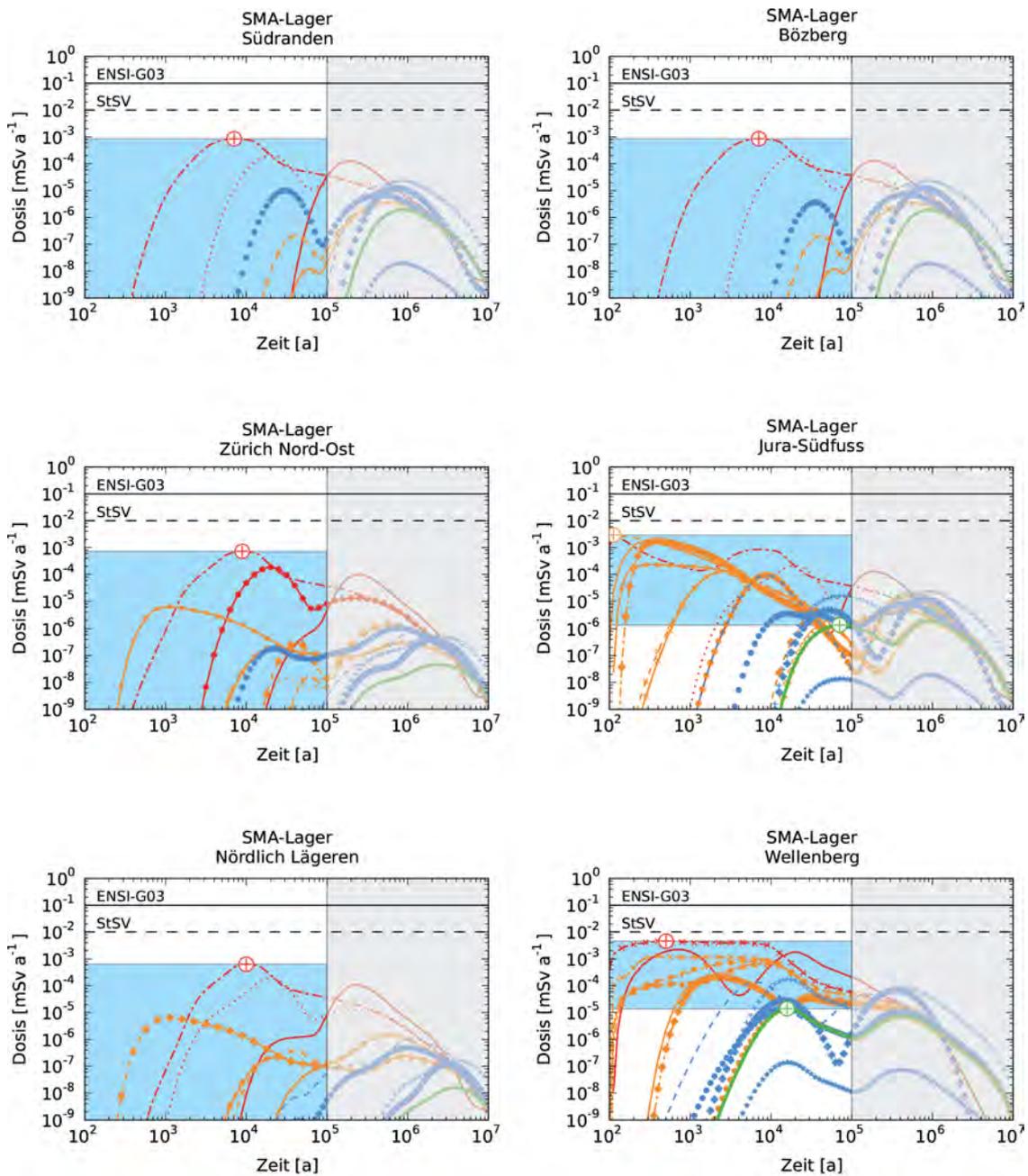
Zur Illustration des Systemverhaltens wurden Testrechnungen sowohl für das HAA-Lager als auch für das SMA-Lager über den Betrachtungszeitraum hinaus bis 10 Millionen Jahre durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Parameterwerte wie am Ende des Betrachtungszeitraums verwendet.

Neben den Testrechnungen für die Ermittlung des charakteristischen Dosisintervalls gemäss den Vorgaben des ENSI (ENSI 33/075) wurden zum Aufzeigen der Robustheit der Lagersysteme auch Testrechnungen für zusätzliche alternative Fälle und für «What if?»-Fälle durch-

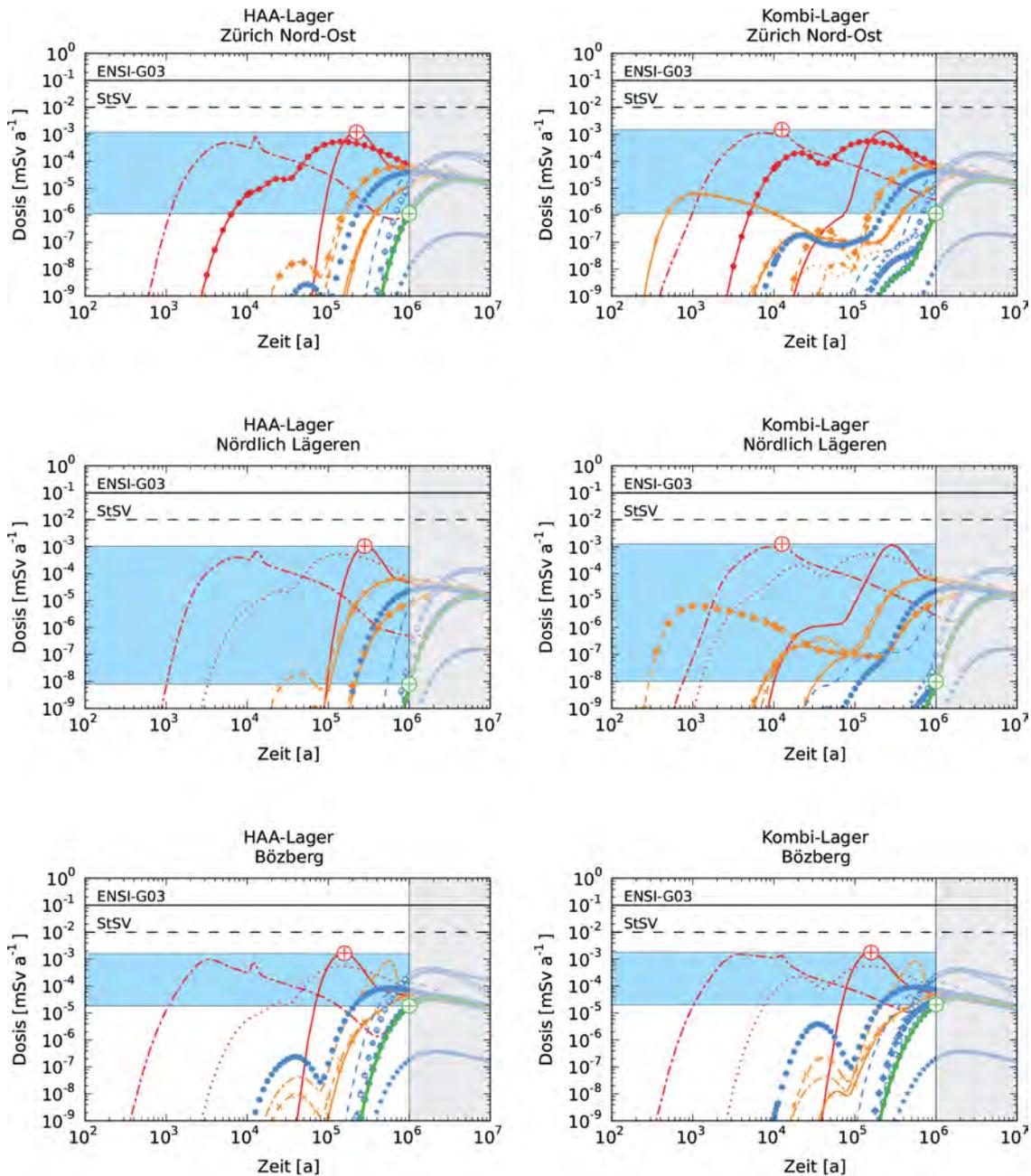
geführt; die entsprechende Figur mit den Dosiskurven und den resultierenden Dosisintervallen findet sich in Figur 11-2 und Figur 11-3.

Die Analyse der Dosiskurven in Figur 11-2 und Figur 11-3 zeigt, dass für den Referenzfall in allen Standortgebieten (ausgenommen Wellenberg) die Dosiskurve innerhalb des Betrachtungszeitraums (SMA: 100 000 Jahre; HAA: 1 Million Jahre) ihr Maximum noch nicht erreicht hat; dies hat zur Folge, dass die Dosisintervalle für einen Teil dieser Standortgebiete einen sehr tiefen unteren Rand aufweisen.

Insgesamt ergibt sich folgendes Bild: Für die Dosisberechnungen gemäss ENSI 33/075 liegen die oberen Ränder der charakteristischen Dosisintervalle für alle geologischen Standortgebiete unterhalb der Grenze von 0.01 mSv/Jahr, unterhalb welcher gemäss Strahlenschutzverordnung keine Optimierung mehr notwendig ist; sie liegen damit auch unterhalb dem weniger strengen Dosis-Schutzkriterium von 0.1 mSv/Jahr der Richtlinie ENSI-G03. Dies bedeutet gemäss SGT (BFE 2008) und Vorgaben in ENSI 33/075, dass alle Standortgebiete gemäss der quantitativen Analysen sicher und auch bezüglich ihrer Sicherheit gleichwertig sind. Dies gilt auch, wenn für die Ermittlung des Dosisintervalls zusätzliche alternative Fälle und «What if?»-Rechenfälle mit einbezogen werden und wenn die Resultate über den Betrachtungszeitraum hinaus berücksichtigt werden. Da die für die oberen Ränder der Dosisintervalle verwendeten Konzeptualisierungen und Parameterwerte sehr vorsichtig bzw. konservativ gewählt wurden, heisst dies, dass mit diesen Rechnungen der obere Rand der Dosisintervalle zuverlässig eingegrenzt wurde; die Aussage, dass die oberen Ränder der Dosisintervalle unterhalb 0.01 mSv/Jahr liegt, ist für alle geologischen Standortgebiete belastbar. Dies heisst, dass mit dem vorhandenen Kenntnisstand bezüglich Sicherheit und sicherheitstechnischer Gleichwertigkeit eindeutige und belastbare Aussagen gemacht werden können und dass für den quantitativen sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 2 SGT keine Reduktion der Parameterbandbreiten bzw. der Bandbreiten der Konzeptualisierungen notwendig sind. Die von der Nagra für Etappe 2 SGT begonnenen bzw. geplanten Arbeiten dienen dazu, die Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen zu überprüfen und wo möglich die Ungewissheiten weiter zu reduzieren. Die Resultate dieser Arbeiten werden in die in Etappe 2 SGT durchzuführenden provisorischen Sicherheitsanalysen sowie in den sicherheitstechnischen Vergleich und damit in die in Etappe 2 SGT durchzuführende Prioritätensetzung zur Festlegung der Vorschläge für die in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchenden Standorte einfließen.



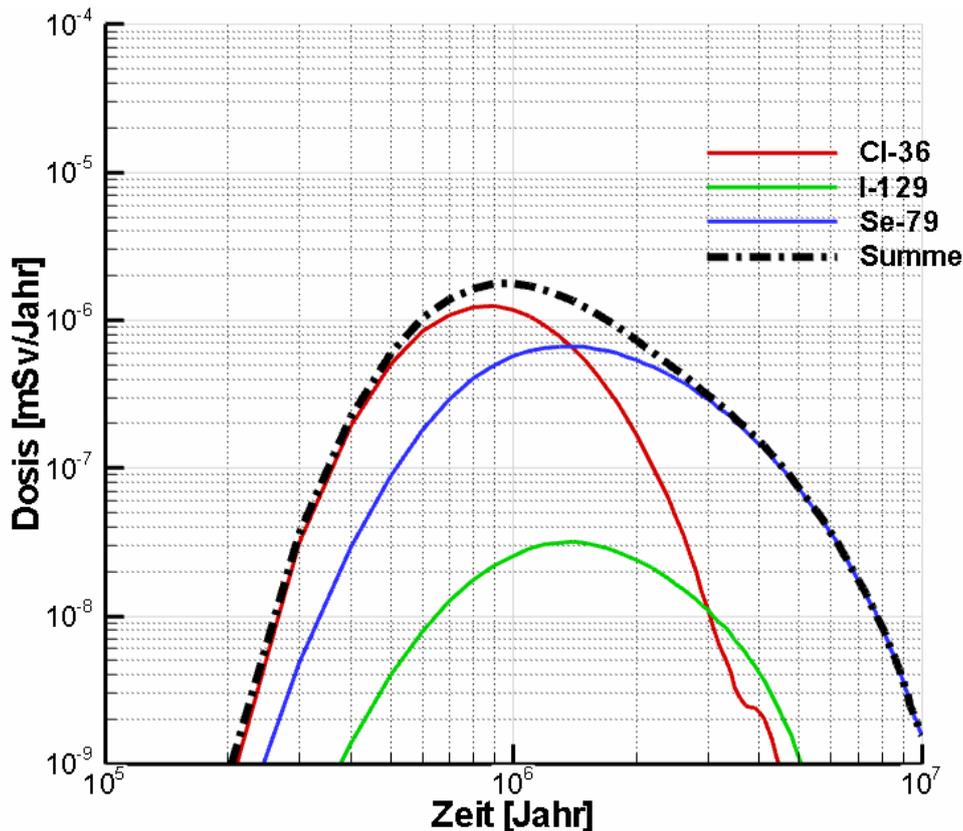
Figur 11-2: Dosiskurven für die ENSI-Rechenfälle, alternative Rechenfälle und «What if?»-Rechenfälle in den verschiedenen geologischen Standortgebieten für SMA-Lager. Die resultierenden Dosisintervalle sind als horizontale blaue Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums. Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), «What if?»-Fälle (rot) (NTB 10-01, Figur 7.1-3a).



Figur 11-3: Dosiskurven für die ENSI-Rechenfälle, alternative Rechenfälle und «What if?»-Rechenfälle in den verschiedenen geologischen Standortgebieten für HAA-Lager und Kombilager. Die resultierenden Dosisintervalle sind als horizontale blaue Balken dargestellt. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Zeitraum nach Ablauf des Betrachtungszeitraums. Darstellung der Dosiskurven: Referenzfall (grün), ENSI-Fälle (blau), zusätzliche alternative Fälle (orange), «What if?»-Fälle (rot) (NTB 10-01, Figur 7.1-3b).

## Beurteilung des ENSI

Das ENSI hat die von der Nagra verwendeten Parameter und Modelle überprüft. Für ausgewählte Fälle wurden mit dem Programm COMSOL unabhängige Kontrollberechnungen durchgeführt. Die von der Nagra berechneten radiologischen Auswirkungen wurden dabei bestätigt. In Figur 11-4 sind als Beispiel Ergebnisse des ENSI für den Referenzfall des SMA-Lagers im geologischen Standortgebiet Bözberg dargestellt. Die Resultate der Gesamtdosis (gestrichelte Kurve) stimmen mit denjenigen der Nagra (grüne Kurve in Figur 11-2) überein.



Figur 11-4: Resultate der vom ENSI berechneten Dosen für die Radionuklide Cl-36, Se-79 und I-129 und deren Summe im Referenzfall für ein SMA-Lager im geologischen Standortgebiet Bözberg.

Mit den in Figur 11-2 und Figur 11-3 dargelegten Resultaten zeigt die Nagra den Einfluss der verschiedenen Konzeptualisierungen und der Ungewissheiten in den Parameterwerten. Dies gilt sowohl für die Eigenschaften von horizontalen sedimentären Architekturelementen wie Sandkalkabfolgen oder Kalkbankabfolgen als auch für die erhöhte Durchlässigkeit von Klüften bzw. Störungszonen, die mit alternativen und «What if?»-Fällen untersucht wurden.

Das ENSI bewertet die Auswahl der Rechenfälle und die verwendeten Parameterbandbreiten als abdeckend und stufengerecht. Die berechneten maximalen Dosen liegen für alle Standortgebiete unterhalb beider radiologischer Kriterien (Schutzkriterium der Richtlinie ENSI-G03 von 0.1 mSv/Jahr und der aus der StSV abgeleitete Wert von 0.01 mSv/Jahr). Die Testrechnungen zeigen deshalb die Robustheit des vorgeschlagenen Tiefenlagerkonzepts

und der Wirt- und Rahmengesteinsformationen gegenüber Ungewissheiten in den Prozessen und Parametern auf.

Im Falle der SMA-Lager zeigen die Resultate der Testrechnungen für die Standortgebiete Wellenberg und Jura-Südfuss, dass in «What if?»-Fällen das Dosismaximum zu frühen Zeiten (<1000 Jahre, Figur 11-2) erreicht werden. Die Dosen liegen in beiden Fällen unter den radiologischen Bewertungskriterien. Die Berechnungen geben aber Hinweise zur Systemrobustheit, welche bei der Beurteilung der qualitativen Sicherheitskriterien in Etappe 2 SGT zu berücksichtigen sind.

Die Berücksichtigung des Radionuklidtransports in den Rahmengesteinen hat einen Einfluss auf die berechneten maximalen Dosen. So tritt für ein HAA-Lager in den Gebieten Zürich Nord-Ost, Nördlich Lägeren und Bözberg das Dosismaximum zu unterschiedlichen Zeiten auf (Figur 11-3). Dies ist auch auf die unterschiedlichen Mächtigkeiten der oberen Rahmengesteine zurückzuführen. Deshalb sind im Sinne einer standortspezifischen Modellierung die oberen und unteren Rahmengesteine in die Nuklidausbreitungsrechnung und in der sicherheitstechnischen Beurteilung in Etappe 2 SGT einzubeziehen.

### *Fazit*

Die Nagra hat ein breites Spektrum von Testrechnungen durchgeführt, um die Auswirkung von Ungewissheiten in den sicherheitsrelevanten Prozessen und Parametern auf die Langzeitsicherheit zu quantifizieren. Die von der Nagra berechneten Dosiswerte zeigen, dass die Lagersysteme in den betrachteten Standortgebieten sicherheitstechnisch gegenüber bestehenden Ungewissheiten robust sind. Das ENSI ist mit dem von der Nagra gewählten Vorgehen einverstanden und hat die Modellkonzepte nachvollziehen können. Das ENSI hat mit eigenen Kontrollrechnungen ausgewählte Testrechnungen der Nagra überprüft und die Resultate der Nagra bestätigen können. Nach Prüfung der zugrunde liegenden Modellkonzepte, des Prozessverständnisses und des Kenntnisstands der in die Berechnungen eingehenden Parameter kommt das ENSI zum Schluss, dass zusammen mit den von der Nagra vorgeschlagenen ergänzenden Untersuchungen und den vom ENSI geforderten Ergänzungen davon ausgegangen werden kann, dass in Etappe 2 SGT eindeutige und belastbare Aussagen zur sicherheitstechnischen Einstufung gemacht werden können.

## 12 Zusammenfassende Beurteilung und Schlussfolgerungen

Das ENSI hat bei der Beurteilung der Angaben der Nagra geprüft, ob der in NTB 10-01 dokumentierte Wissensstand für belastbare provisorische Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT ausreichend ist. Falls der gegenwärtige Kenntnisstand die in ENSI 33/075 festgehaltenen Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen nicht erfüllt, wurde beurteilt, ob er mit den von der Nagra aufgezeigten Ergänzungen bis zur Einreichung der Unterlagen für Etappe 2 SGT erreicht werden kann.

Im Folgenden sind die Beurteilungen des ENSI zu den in der Stellungnahme angesprochenen Themenbereichen zusammengefasst. Für gewisse Themen fordert das ENSI zusätzliche Untersuchungen, deren Ergebnisse in den Unterlagen für Etappe 2 SGT zu berücksichtigen sind. Diese Forderungen werden unten einzeln aufgeführt. Darüber hinaus formuliert das ENSI Empfehlungen für das Untersuchungsprogramm der Nagra für Etappe 3 SGT.

### Relevante Prozesse und Parameter

Das ENSI stuft die Ableitung der für die Sicherheit relevanten Prozesse und Parameter als nachvollziehbar und stufengerecht ein. Die von der Nagra aufgeführten Prozesse sind konzeptuell ausreichend, um die für Etappe 2 SGT vorgesehenen provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können.

### Kenntnisstand der Wirtgesteine

Das ENSI beurteilt die Datenlage zum Kenntnisstand für den Opalinuston hinsichtlich der angesprochenen Prozesse und Parameter als ausreichend für die Durchführung der standortspezifischen provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT.

Das ENSI hat bereits im Gutachten zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager am Wellenberg die Mergel-Formationen des Helvetikums eingehend beurteilt. Die Nagra hatte sich damals auf Daten aus einem umfangreichen Untersuchungsprogramm abgestützt. Im Zusammenhang mit dem Rahmenbewilligungsgesuch hatte die Nagra auch eine vollständige Sicherheitsanalyse durchgeführt. Das ENSI beurteilt daher die Datenlage für dieses Gestein als ausreichend für die Durchführung der standortspezifischen provisorischen Sicherheitsanalyse und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT.

Den von der Nagra dargestellten Kenntnisstand zu den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten beurteilt das ENSI als korrekt. Um den für Etappe 2 SGT erforderlichen Kenntnisstand zu erreichen, fordert das ENSI für diese beiden Wirtgesteine zusätzlich zu den ergänzenden Untersuchungen der Nagra folgende Ergänzungen:

#### *Forderung 1*

Das ENSI fordert von der Nagra für Etappe 2 SGT ein regional ausgerichtetes Untersuchungsprogramm zum 'Braunen Dogger', das neben der Lithostratigraphie auch die Biostratigraphie untersucht und sich neben bestehenden Bohrungen auch auf die im süddeutschen und Nordschweizer Raum vorhandenen Aufschlüsse abstützt. Früher entwickelte Faziesverteilungskarten sind zu überarbeiten und aufzudatieren, um daraus für die Konzeptualisierung des 'Braunen Doggers' umfassendere Unterlagen zu erhalten.

*Forderung 2*

Die für den 'Braunen Dogger' in NTB 10-01 verwendeten Analogien und Vergleiche zur Beschreibung der sicherheitsrelevanten Parameter Porosität, Diffusions- und Sorptionskoeffizienten sind für Etappe 2 SGT durch Parameterwerte zu ersetzen, die sich auf wirtgesteinspezifische Messwerte abstützen.

*Forderung 3*

Die Nagra hat für die laterale Ausdehnung und das vertikale Auftreten der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten ein sedimentologisch-genetisches Modell zu entwickeln, aus dem die Bandbreiten für die Konzeptualisierung der Effinger Schichten für die provisorischen Sicherheitsanalysen abgeleitet werden können.

*Forderung 4*

Die Nagra hat das Selbstabdichtungsvermögen der Effinger Schichten für Etappe 2 SGT besser zu begründen, z.B. indem sich die verwendeten Analogien und Vergleiche auf wirtgesteinspezifische Messwerte abstützen.

Der Kenntnisstand hinsichtlich der hydraulischen Durchlässigkeit ist für die Wirtgesteine Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums ausreichend für Etappe 2 SGT. Der von der Nagra gewählte Ansatz für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten ist vereinfacht, mit den von der Nagra ergänzenden Untersuchungen für Etappe 2 SGT aber genügend. Für die Datenanalyse fordert das ENSI:

*Forderung 5*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT die Referenzwerte der hydraulischen Durchlässigkeiten aus Daten und/oder Analogien standortspezifisch herzuleiten. Die oberen Eckwerte der hydraulischen Durchlässigkeiten sollen mindestens alle unter vergleichbaren Randbedingungen durchgeführten hydraulischen Tests abdecken.

Das ENSI erachtet die heute vorhandenen Kenntnisse des Einflusses der Dekompaktion auf die hydraulische Durchlässigkeit für den Opalinuston, die Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums am Wellenberg als ausreichend für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT.

Für den 'Braunen Dogger' fehlen vergleichbare Daten. Die von der Nagra verwendete pessimistische Einschätzung (Top notwendiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich > 300 m unter Terrain) bietet den notwendigen Schutz des Wirtgesteins vor Dekompaktionseffekten.

**Forderung 6**

Für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT trägt der 'Braune Dogger' auch als Rahmengestein in geringeren Tiefen zur Barrierenwirkung bei. Die Nagra hat den Einfluss der Dekompaktion auch für die Rahmengesteine zu berücksichtigen.

Hinsichtlich des Verhaltens der Wirtgesteine bezüglich der Gasproduktion durch Korrosions-, resp. Abbauprozesse in einem Tiefenlager hält das ENSI fest, dass der bereits in Etappe 1 SGT dargelegte Kenntnisstand für das Wirtgestein Opalinuston ausreichend für Etappe 2 SGT ist. Für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und die Mergel-Formationen des Helvetikums fordert das ENSI:

**Forderung 7**

Im Sinne der stufengerechten Vertiefung der Kenntnisse hat die Nagra für Etappe 2 SGT wirtgesteinsspezifische Konzepte zum Gastransport in den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums vorzulegen und zu zeigen, wie das «engineered gas transport system» durch wirtgesteinsspezifische Prozesse beeinflusst wird.

Zusammen mit den von der Nagra noch geplanten Untersuchungen und den vom ENSI geforderten Ergänzungen wird der erreichbare Kenntnisstand für Etappe 2 SGT als ausreichend angesehen.

**Geologisch-tektonische Verhältnisse der Standortgebiete**

Die verfügbaren geologisch-tektonischen Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen der Nagra und den seitens ENSI geforderten Ergänzungen reichen aus, um für alle Standortgebiete provisorische Sicherheitsanalysen durchführen zu können. Die ergänzenden Untersuchungen schliessen u.a. das 2D-Seismik-Messnetz, welches eine Region mit den Standortgebieten Bözberg und Nördlich Lägeren umfasst, die Überarbeitung des geologischen 3D-Modells Wellenberg und weitere Abklärungen zu den Platzverhältnissen im Standortgebiet Jura-Südfuss ein.

Die vom ENSI geforderten Ergänzungen umfassen folgende Untersuchungen:

Nicht abschliessend geklärt ist aus Sicht des ENSI, inwiefern im 'Braunen Dogger' über die Ost-West-Erstreckung des Standortgebiets Nördlich Lägeren sicherheitsrelevante Fazieswechsel stattfinden. Gemäss NTB 08-04, Figur 4.3-11, liegt der westlichste Teil des Standortgebiets bereits im Bereich der Übergangsfazies, d.h. es muss damit gerechnet werden, dass massigere Sandkalke vorkommen. Die Nagra hat für die westlichen und östlichen Bereiche des SMA-Standortgebiets keine unterschiedliche Konzeptualisierung vorgenommen.

**Forderung 8**

Die Nagra hat aufgrund der bis zur Etappe 2 SGT noch erfolgenden Untersuchungen zu prüfen und darzulegen, inwiefern eine unterschiedliche Konzeptualisierung des 'Braunen Doggers' für den westlichen und östlichen Teil des Standortgebiets Nördlich Lägeren erfolgen muss.

Das ENSI kam nach der Beurteilung der Datenlage in Etappe 1 SGT zum Schluss, dass der Verlauf der Born-Engelberg-Antiklinale im Standortgebiet Jura-Südfuss nicht abschliessend geklärt ist. Die Nagra hat in ihren Unterlagen zu Etappe 2 SGT deshalb den Fall zu berücksichtigen, bei dem diese Antiklinale quer durch die Gebiete mit Effinger Schichten in günstiger Tiefenlage verläuft. Darzulegen sind insbesondere die Platzverhältnisse, die Wasserflusswege und die notwendigen Sicherheitsabstände bei einem Bau eines SMA-Lagerteils in den Effinger Schichten.

*Forderung 9*

Die Nagra hat die Platzverhältnisse, den Einfluss der tektonischen Überprägung auf die Wasserflusswege und die notwendigen Sicherheitsabstände beim Bau eines SMA-Lagers in den Effinger Schichten hinsichtlich einer möglichen Verlängerung der Born-Engelberg-Antiklinale abzuklären und auch diejenigen seismischen Linien zu berücksichtigen, die in diesen Teil des Standortgebiets hineinreichen.

### **Langzeitentwicklung**

Die von der Nagra dargelegten Informationen zur geologischen Langzeitentwicklung, unter Einbezug der Erkenntnisse der aktuellen Forschungsergebnisse und den ergänzenden Untersuchungen sowie den vom ENSI geforderten Ergänzungen, erlauben die Durchführung von provisorischen Sicherheitsanalysen in allen Standortgebieten.

Hinsichtlich der geomorphologischen Entwicklung stellt das ENSI folgende Forderung:

*Forderung 10*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT für alle drei HAA-Standortgebiete vergleichende Betrachtungen zur geomorphologischen Entwicklung im Betrachtungszeitraum durchzuführen und zu dokumentieren.

In seinem Gutachten zur Etappe 1 SGT hat das ENSI die Langzeitstabilität des Alpenraums für SMA-Lager bezüglich Hebungsdaten, Erosion, Seismizität und Neotektonik als kritisch beurteilt. Hinsichtlich des Standortgebiets Wellenberg stellt das ENSI deshalb folgende Forderung:

*Forderung 11*

Die Nagra hat für das Standortgebiet Wellenberg die Aspekte Hebung, Seismizität, Neotektonik und glaziale Tiefenerosion unter Einbezug aller seit der Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs neu erfassten Ergebnisse bei der Beurteilung der Langzeitentwicklung zu berücksichtigen. Darunter fallen geodätische und seismische Daten, durch Unwetter ausgelöste und durch paläoseismische Untersuchungen erkannte seismische Ereignisse und Erkenntnisse aus neu zusammengestellten geologischen Profilen in Pfiffner et al. (2010). Die seit dem Rahmenbewilligungsgesuch geänderte Tiefenlage des Lagers ist zu berücksichtigen.

## Hydrogeologische Kenntnisse der Standortgebiete

Die Nagra hat den Kenntnisstand zur hydrogeologischen Situation der Standortgebiete Bözberg, Nördlich Lägeren, Zürich Nord-Ost, Jura-Südfuss und Südranden angemessen dargestellt. Für das Standortgebiet Wellenberg liegen durch die Arbeiten zum Rahmenbewilligungsgesuch für ein SMA-Lager umfangreiche geologische Kenntnisse vor, die vom ENSI beurteilt wurden (HSK 30/9). Die von der Nagra vorgesehenen Ergänzungen sind zielführend, um den notwendigen Kenntnisstand für Etappe 2 SGT zu erreichen.

In den Testrechnungen wurde mit Ausnahme des Standortgebiets Wellenberg ein einheitlicher vertikaler hydraulischer Gradient von 1 m/m verwendet. Hinsichtlich der hydraulischen Gradienten in allen geologischen Standortgebieten stellt das ENSI folgende Forderung:

### *Forderung 12*

Eine standortspezifische Konkretisierung der Annahmen zu hydraulischen Gradienten hat im Rahmen der von der Nagra geplanten Synthesearbeiten (hydrogeologische Modelle) für Etappe 2 SGT zu erfolgen.

Das ENSI erachtet die konzeptuellen Vorstellungen und Kenntnisse über die Art der Transportpfade der Wirt- und Rahmengesteine als vereinfacht, jedoch stufengerecht für Etappe 2 SGT.

### *Forderung 13*

Das ENSI fordert für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT, dass die ergänzenden Untersuchungen der Nagra (u.a. Aufschlusskartierungen, Laboranalysen, Bohrkernuntersuchungen) für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und die Effinger Schichten eine genauere Beschreibung der sedimentären Architekturelemente (Korrelation, Verzahnung, laterale Faziesänderungen, Ausbildung von Klüften) erlauben.

Hinsichtlich der Transmissivität von Störungszonen ist es gerechtfertigt, für das Wirtgestein Effinger Schichten aufgrund des geringeren Kenntnisstands vorsichtigere Annahmen für die alternativen Rechenfälle zu treffen.

Das ENSI misst den unabhängigen Evidenzen grosse Bedeutung zur Extrapolation auf lange Zeiträume und Abstützung von Messwerten zu. Es fordert deshalb:

### *Forderung 14*

Die Nagra hat die Ergebnisse ihrer ergänzenden Untersuchungen (Messung von weiteren Chloridprofilen an bestehendem Kernmaterial, Integration neuer hydrogeologischer und hydrochemischer Daten zum Nachweis des Stockwerkbaus, gesamthafte Auswertung von Druckmessungen in den Wirtgesteinen) im sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte in Etappe 2 SGT unter Einbezug der Rahmengesteine ober- und unterhalb der Wirtgesteine zu berücksichtigen.

Die Nagra hat die hydrogeologischen Verhältnisse in allen Standortgebieten ausführlich beschrieben. Für das Standortgebiet Südranden fordert das ENSI:

*Forderung 15*

Die Nagra hat die Daten der INTERREG-III-A-Studie bei der Evaluation der regionalen Grundwasserverhältnisse im Standortgebiet Südranden zu berücksichtigen.

*Forderung 16*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT abzuklären, ob die sandig-kalkigen Einschaltungen in der Wedelsandstein-Formation im Standortgebiet Südranden als grossräumig durchziehende, laterale Exfiltrationspfade einzustufen sind.

*Forderung 17*

Die Nagra stuft eine Exfiltration über den Oberen Muschelkalk im Standortgebiet Südranden wegen des darüber, näher am Wirtgestein liegenden Aquifers der Stubensandstein-Formation als wenig wahrscheinlich ein. Aus Sicht des ENSI sind beide Exfiltrationsszenarien (via Stubensandstein und via Oberem Muschelkalk) weiterhin zu betrachten, bis ergänzende lokale Untersuchungen spätestens in Etappe 3 SGT eine der Hypothesen bestätigen.

Hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Zürich Nord-Ost fordert das ENSI:

*Forderung 18*

Falls Einlagerungsbereiche im östlichen Teil des Standortgebiets Zürich Nord-Ost vorgeschlagen werden, ist die potenzielle Wasserführung im Arietenkalk zu berücksichtigen oder anhand weiterer Untersuchungen auszuschliessen.

*Forderung 19*

Die Nagra stuft eine Exfiltration über den Oberen Muschelkalk im Standortgebiet Zürich Nord-Ost wegen des darüber, näher am Wirtgestein liegenden Aquifers der Stubensandstein-Formation als wenig wahrscheinlich ein. Aus Sicht des ENSI sind beide Exfiltrationsszenarien (via Stubensandstein und via Oberem Muschelkalk) weiterhin zu betrachten, bis ergänzende lokale Untersuchungen spätestens in Etappe 3 SGT eine der Hypothesen bestätigen.

Hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Nördlich Lägeren fordert das ENSI:

*Forderung 20*

Aufgrund der geplanten seismischen Untersuchungen der Nagra (Reprozessierung vorhandener Daten und Ergänzung der bestehenden 2D-Seismik) ist eine detailliertere Beschreibung des Vorkommens und der lateralen Kontinuität der Kalkbankabfolgen in den Effinger Schichten zu erstellen. Die hydrogeologische Bedeutung der Kalkbankabfolgen ist für das Standortgebiet Nördlich Lägeren darzulegen.

*Forderung 21*

Das ENSI fordert für Etappe 2 SGT, dass die hydraulische Bedeutung und die laterale Kontinuität kalkiger und eisenoolithischer Einschaltungen innerhalb der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' im Standortgebiet Nördlich Lägeren so weit geklärt sind, dass eine standortspezifische Konzeptualisierung möglich ist. Um einschätzen zu können, ob mit den Lagerebenen diesen Einschaltungen ausgewichen werden kann, ist auch die Evaluation der vertikalen Frequenz der Kalkeinschaltungen notwendig.

Hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Bözberg fordert das ENSI:

*Forderung 22*

Die Nagra hat mit den geplanten Synthesearbeiten (Ergänzung hydrogeologischer Datensätze und Modelle) eine genauere Beschreibung der Verhältnisse in den Aquiferen im Standortgebiet Bözberg zu erstellen.

Hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Jura-Südfuss fordert das ENSI:

*Forderung 23*

Das ENSI fordert von den geplanten hydrogeologischen Synthesearbeiten (Ergänzung hydrogeologischer Datensätze und Modelle) eine detailliertere hydrogeologische Beschreibung für das Standortgebiet Jura-Südfuss.

*Forderung 24*

Unterhalb des Opalinustons wird der Arietenkalk von der Nagra nicht als lateral durchziehender Exfiltrationspfad angesehen. Aus Sicht des ENSI sind die Verhältnisse im Bereich des Standortgebiets (Mächtigkeitszunahme gegen Westen, Klüftung) noch zu wenig bekannt, um diese Aussage belastbar treffen zu können. Der Arietenkalk könnte als nächster, nur ca. 30 m unterhalb des Wirtgesteins Opalinuston liegender Exfiltrationspfad für die vergleichende Beurteilung des Standortgebiets Jura-Südfuss von Bedeutung sein. Das ENSI fordert, dass die Nagra den Arietenkalk als potenziellen Exfiltrationspfad in den sicherheitstechnischen Vergleich einbezieht, solange nicht weitere Erkenntnisse einen Ausschluss dieses Exfiltrationspfads rechtfertigen.

Hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse im Standortgebiet Wellenberg fordert das ENSI:

*Forderung 25*

Für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT hat die Nagra die Unterlagen auf Basis des bestehenden Regionalmodells aufzudatieren, indem sie die heute geplante, tiefere Platzierung der Lagerebenen berücksichtigt.

### **Bautechnische Machbarkeit**

Das ENSI kommt zum Schluss, dass die vorgelegten Daten und Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen und den Forderungen des ENSI ausreichen, um belastbare Aussagen zur bautechnischen Machbarkeit für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT machen zu können.

Die Forderungen des ENSI beziehen sich auf folgende Aspekte:

*Forderung 26*

Aus bautechnischer Sicht fordert das ENSI, dass für Etappe 2 SGT die geologischen und geotechnischen Informationen in gebietsspezifische und formationsspezifische Baugrundmodelle und Gebirgsbeschreibungen überführt werden. Besonders für die SMA-Standorte bzw. tektonisch beanspruchte Standorte sind alle vorhandenen Informationen zu bautechnisch relevanten Trennflächen systematisch zu ergänzen. Bezüglich der In-situ-Gebirgsspannungen sind alle Indikatoren zu Spannungsorientierungen und Magnituden aus bestehenden Bohrungen detaillierter aufzuarbeiten und ihre Ungewissheiten aufzuzeigen.

Für den bautechnischen Vergleich der SMA- und HAA-Standortgebiete und der Erschliessungsbauwerke fordert das ENSI, dass bautechnische Risikoanalysen durchgeführt und die Resultate in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden.

### **Geochemische Bedingungen**

Der aktuelle Wissensstand zum Tonmineralgehalt des Opalinustons und der Mergel-Formationen des Helvetikums ist ausreichend, um provisorische Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT durchzuführen. Das ENSI bewertet die von der Nagra angestrebte Verbesserung des Kenntnisstands zur Lithofazies der Effinger Schichten und des 'Braunen Doggers' unter Einbezug der vom ENSI geforderten Ergänzungen für den sicherheitstechnischen Vergleich in Etappe 2 SGT als zielführend.

*Forderung 27*

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen hat die Nagra die Bandbreiten für die mineralogischen Parameter in den tonigen Abfolgen und sandig/kalkigen Architekturelementen von Effinger Schichten und 'Braunem Dogger' aus den vorhandenen Daten separat abzuleiten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Das ENSI beurteilt den aktuellen Wissensstand zum Porenwasser des Opalinustons und der Mergel-Formationen des Helvetikums als ausreichend, um provisorische Sicherheitsanaly-

sen in Etappe 2 SGT durchzuführen. Das ENSI kommt zum Schluss, dass die vorgelegten Daten und Informationen zusammen mit den ergänzenden Untersuchungen für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten ausreichen, um die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich durchführen zu können. Neben der Sorption kann die Salinität weitere Prozesse beeinflussen.

*Forderung 28*

Die Nagra hat den Einfluss der Salinität auf die verschiedenen Prozesse (Diffusion, Zementstabilität, Korrosion metallischer Materialien, Auflösung der Glasmatrix, Stabilität und Quellbarkeit von Bentonit bzw. Bentonit-Sandgemischen) in den provisorischen Sicherheitsanalysen für alle Wirtgesteine und Standortgebiete darzulegen und entsprechend zu berücksichtigen.

Für die Effinger Schichten hat die Nagra Porenwasservarianten aufgrund der Ergebnisse aus der Bohrung Oftringen definiert. Zurzeit gibt es insbesondere Ungewissheiten bezüglich der zugänglichen Porosität, die die Salinität des Porenwassers beeinflusst.

*Forderung 29*

Das ENSI fordert, dass die Nagra den Kenntnisstand bezüglich zugänglicher Porosität in den Effinger Schichten mit weiteren Untersuchungen (z.B. durch ihre ergänzenden Arbeiten an den konditionierten Kernen der Bohrungen Gösgen und Oftringen) verbessert und in den provisorischen Sicherheitsanalysen entsprechend berücksichtigt.

Das Vorgehen, die Sorptionskoeffizienten anhand der dominierenden Tonminerale Illit und Montmorillonit und der wirtgesteinsspezifischen Porenwässer für die provisorischen Sicherheitsanalysen herzuleiten, beurteilt das ENSI als zielführend.

*Forderung 30*

Das ENSI fordert, dass die Nagra ihre Methodik mit den vorhandenen Sorptionsexperimenten am Opalinuston testet und die Ergebnisse in einem Bericht dokumentiert. Das ENSI erachtet es als sinnvoll, dass die Nagra diesen Methodentest mit den für alle Wirtgesteine geplanten Sorptionsexperimenten an repräsentativem Bohrkernmaterial ergänzt.

Das ENSI erachtet die Vorgehensweise und die geplanten Ergänzungen für die Herleitung der effektiven Diffusionskoeffizienten für die Testrechnungen als nachvollziehbar und plausibel. Das ENSI bewertet die von der Nagra angestrebte Verbesserung des Kenntnisstands zur Diffusion der Effinger Schichten und des 'Braunen Doggers' unter Einbezug der seitens ENSI geforderten Ergänzungen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT als zielführend.

*Forderung 31*

Die Nagra hat für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT die zu erwartende Variabilität bezüglich Temperatur in den Standortgebieten darzulegen und deren Einfluss auf die Diffusionskoeffizienten entsprechend zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Porosität der Wirtgesteine beurteilt das ENSI den aktuellen Kenntnisstand für die Wirtgesteine Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums als ausreichend, um in Etappe 2 SGT provisorische Sicherheitsanalysen durchzuführen.

#### *Forderung 32*

Für die provisorischen Sicherheitsanalysen hat die Nagra die Bandbreiten für die Porosität in den tonigen Abfolgen und sandig/kalkigen Architekturelementen von Effinger Schichten und 'Braunem Dogger' aus den vorhandenen Daten separat abzuleiten und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Aufgrund der geringen Datenlage für die Anionen-zugängliche Porosität für den 'Braunen Dogger' und die Effinger Schichten beurteilt das ENSI die von der Nagra geplanten bzw. laufenden Arbeiten bezüglich Porenwasser und Porosität (z.B. an den konditionierten Bohrkernen der Bohrung Gösgen und Geothermiebohrung Schlattingen) als zielführend.

#### *Forderung 33*

Das ENSI fordert von der Nagra, dass für Etappe 2 SGT wirtgesteinsspezifische Anionen-zugängliche Porositäten auf der Basis experimenteller Daten diskutiert und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen einfließen werden.

Das ENSI hat die Herleitung und Selektion der Nagra für die maximalen Löslichkeiten im Zementnahfeld im Rahmen von Etappe 1 SGT und des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston überprüft (ENSI 33/070; HSK 35/99). Die Empfehlungen des ENSI (HSK 35/99) wurden bei der Auswahl der maximalen Löslichkeiten für die Testrechnungen berücksichtigt.

#### *Forderung 34*

Das ENSI fordert, dass der Einfluss des Degradationsprodukts von Zellulose auf die maximalen Löslichkeiten der Radionuklide in Abfallgruppe 2 von der Nagra dargelegt und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen berücksichtigt werden.

Die Referenzwerte und die unteren Eckwerte für die Sorptionskoeffizienten im Zementnahfeld wurden vom ENSI bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston und in Etappe 1 SGT überprüft (ENSI 33/070; HSK 35/99). Das ENSI ist grundsätzlich mit den gewählten Sorptionskoeffizienten der Radionuklide für das Zementnahfeld einverstanden.

#### *Forderung 35*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT den Einfluss der im Nahfeld vorhandenen Radionuklide und stabilen Isotope auf die Sorptionskoeffizienten der Elemente Kohlenstoff (anorganisch), Kobalt und Nickel zu diskutieren und entsprechend in den provisorischen Sicherheitsanalysen zu berücksichtigen.

Der aktuelle Kenntnisstand und die von der Nagra geplante Aktualisierung der thermodynamischen Datenbank für die Herleitung der Löslichkeitslimiten im Bentonit- und Zementnahfeld sind für die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich ausreichend. Die Aktualisierung der thermodynamischen Datenbank ist auch bei der

Herleitung der Sorptionskoeffizienten im Nahfeld und in den Wirt- und Rahmengesteinen zu berücksichtigen.

## Biosphäre

Das ENSI beurteilt den von der Nagra dokumentierten Kenntnisstand in Bezug auf die regionale hydrogeologische Situation, die Exfiltration von Tiefengrundwasser und die konzeptionellen Modelle der Radionuklidausbreitung in der Biosphäre für die Durchführung der provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 SGT unter Einbezug der Untersuchungsergebnisse aus den vorgesehenen hydrogeologischen Modellrechnungen als stufengerecht.

Die Nagra geht von der plausiblen Annahme aus, dass das Grundwasser aus Tiefenaquiferen an der tiefsten Stelle der Oberfläche exfiltriert, d.h. in der Regel in grossen Flusstälern.

### *Forderung 36*

Zur Bestätigung dieser Annahme fordert das ENSI im Hinblick auf Etappe 2 SGT eine Untersuchung der regionalen Fliessverhältnisse in den geologischen Standortgebieten auf der Grundlage eines grossräumigen hydrogeologischen Modells.

Das Vorgehen der Nagra bei der Biosphärenmodellierung unter Verwendung eines standortunabhängigen Modells ist zielorientiert und stufengerecht. Die Modellvarianten mit standortspezifischen Wasserflüssen im Biosphären-Aquifer werden als wertvolle und realistische Ergänzungen zum Referenzfall betrachtet.

### *Forderung 37*

Das ENSI fordert in Hinblick auf Etappe 2 SGT eine Verarbeitung der vorhandenen Datenbasis in Bezug auf die Grundwasserverhältnisse in den quartären Ablagerungen typischer grosser und kleiner Täler im Gebiet der Nordschweiz.

Die Analyse der sicherheitstechnischen Bedeutung von alternativen Biosphärenszenarien (Gebietsmorphologie, Klimasituationen) innerhalb der Betrachtungszeiträume für das SMA- und HAA-Lager erfolgt stufengerecht. Es besteht diesbezüglich kein weiterer Handlungsbedarf für Etappe 2 SGT.

## Testrechnungen

Die Nagra hat Testrechnungen durchgeführt, um die Auswirkung von Ungewissheiten in den sicherheitsrelevanten Prozessen und Parametern auf die Langzeitsicherheit zu quantifizieren. Die Resultate der Testrechnungen der Nagra zeigen, dass die berechneten Dosiswerte für die betrachteten Standortgebiete sicherheitstechnisch robust gegenüber den bestehenden Ungewissheiten sind. Das ENSI ist mit dem von der Nagra gewählten Vorgehen einverstanden und hat die Modellkonzepte nachvollziehen können. Das ENSI hat mit eigenen Kontrollrechnungen ausgewählte Testrechnungen der Nagra überprüft und die Resultate der Nagra bestätigen können.

In den Testrechnungen hat die Nagra für Eigenschaften des Wirtgesteins teilweise konservative Annahmen verwendet, die aber nicht zu einer Änderung der sicherheitstechnischen Einstufung führten. Dieses Vorgehen stuft das ENSI als sicherheitsgerichtet und zielführend ein.

Da der Beginn der Freisetzung von Radionukliden aus einem Tiefenlager u.a. von der Dauer der Aufsättigung des Nahfelds nach dem Verschluss bestimmt wird, stellt das ENSI die Forderung:

*Forderung 38*

In den künftigen Sicherheitsanalysen der Nagra sind auch die Wechselwirkungen des Aufsättigungsprozesses mit lagerinduzierten Prozessen für alle Wirtgesteine standortspezifisch zu untersuchen.

Hinsichtlich einer Ergänzung der Beschreibung von möglichen Ausbreitungspfaden fordert das ENSI:

*Forderung 39*

Die Nagra hat für Etappe 2 SGT bei der Konzeptualisierung der Exfiltrationspfade die unteren Rahmengesteine in den sicherheitstechnischen Vergleich einzubeziehen.

Die vorgelegten Konzepte für die Transportpfade in den Wirt- und Rahmengesteinen und der den Modellierungen der Nagra zugrunde liegende heutige Kenntnisstand über die geologischen Barrierensysteme sind für das ENSI nachvollziehbar. Die Konzepte sind ausreichend für die Durchführung des sicherheitstechnischen Vergleichs der Standortgebiete. Die Rechenfälle decken eine genügend grosse Konfigurationsbandbreite der möglichen Radionuklid-Ausbreitungspfade mit ihren Ungewissheiten ab.

*Forderung 40*

Für die Wirtgesteine 'Brauner Dogger' und Effinger Schichten fordert das ENSI, dass die Resultate der ergänzenden Untersuchungen in den Modellkonzeptualisierungen für die Ausbreitungsberechnungen berücksichtigt werden.

Es ist beim aktuellen Kenntnisstand nicht sicher, dass die Lagerkammern für ein SMA-Lager in allen Standortgebieten ausschliesslich in tonreichen Bereichen der Wirtgesteine Effinger Schichten und 'Brauner Dogger' platziert werden können, da die laterale und vertikale Verteilung tonärmerer Bereiche in den Effinger Schichten und im 'Braunen Dogger' noch nicht zuverlässig bekannt sind.

*Forderung 41*

Das ENSI fordert deshalb, dass die Nagra für Etappe 2 SGT lithologische Variabilitäten im Bereich der Lagerkammern in die Sicherheitsbetrachtungen einbezieht und die sicherheitsrelevanten Auswirkungen der möglichen Anordnungen von SMA-Lagerkavernen in diesen Gesteinsabschnitten untersucht.

### **Hinweise für Etappe 3 SGT**

Der Bericht der Nagra zur Abklärung notwendiger ergänzender Untersuchungen wurde im Hinblick auf die Etappe 2 SGT erstellt. Aus Sicht des ENSI können jedoch bereits heute Hinweise für das Untersuchungsprogramm der Nagra für Etappe 3 SGT abgegeben werden:

### *Wirtgesteinsspezifische Gaseintrittsdrücke zu 'Braunem Dogger' und Effinger Schichten*

Bei einer Weiterverfolgung eines SMA-Lagerprojekts in den Wirtgesteinen 'Brauner Dogger' und/oder den Effinger Schichten in Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI, dass die Nagra für diese Wirtgesteine experimentell die Gaseintrittsdrücke in den verschiedenen Lithologien und entlang der Lithologiegrenzen bestimmt, um detaillierte Gastransportmodellierungen für den gesamten Wirtgesteinskörper durchführen zu können.

### *Eichbohrung in den westlichen Bereichen Nördlich Lägeren*

Das ENSI empfiehlt der Nagra für Etappe 3 SGT bei der Weiterverfolgung der Option 'Brauner Dogger' für ein SMA-Lager im westlichen Standortgebiet Nördlich Lägeren eine auf den Westen des Standortgebiets bezogene Eichbohrung, die die faziellen Wechsel im 'Braunen Dogger' genauer abklärt.

### *Abstände zu Mineral- und Thermalwasservorkommen*

Das ENSI empfiehlt, dass die Nagra für Etappe 3 SGT mit einer standortspezifischen Sicherheitsanalyse aufzeigt, welche Abstände eines Tiefenlagers zu einem Trinkwasser führenden Gesteinskörper oder zu Mineral- und Thermalwasservorkommen zu beachten sind, um die in der Richtlinie ENSI-G03 festgehaltenen Schutzkriterien einzuhalten.

### *Nutzungskonflikte*

Im Rahmen der Sicherheitsanalysen in Etappe 3 SGT ist im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch der Einfluss allfälliger Nutzungen des Untergrundes (u.a. Erdwärmesonden, Grundwasserfassungen, unbeabsichtigtes Anbohren) auf die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers aufzuzeigen und zu quantifizieren.

### *Vertiefende Untersuchungen zur Glattal-Rinne*

Das ENSI empfiehlt zur Vertiefung des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion in der Nordschweiz für Etappe 3 SGT, die Bildungsgeschichte der Glattal-Rinne in die ergänzenden Untersuchungen mit einzubeziehen.

### *Forschungsbohrung Thurtal-Rinne und Datierung glazialer Ablagerungen*

Bei einer Weiterverfolgung eines Lagerprojekts im HAA-Standortgebiet Zürich Nord-Ost in Etappe 3 SGT empfiehlt das ENSI eine Bohrung in der Thurtal-Rinne südlich des Standortgebiets Zürich Nord-Ost einschliesslich Datierungen der dort vorhandenen Verfüllung und von Sedimenten der von der Thurtal-Rinne nach Norden abzweigenden Basadingen-Rinne.

## **Fazit**

Aus Sicht des ENSI hat die Nagra in ihrem Bericht NTB 10-01 den geologischen Kenntnisstand in den jeweiligen Standortgebieten und die Ableitung der sicherheitstechnisch relevanten Parameter korrekt dargelegt. Sie hat damit die im SGT geforderte Abklärung mit dem ENSI erfüllt.

Nach Prüfung der zugrunde liegenden Modellkonzepte, des Prozessverständnisses und des Kenntnisstands der in die Testrechnungen eingehenden Parameter kommt das ENSI zum Schluss, dass zusammen mit den von der Nagra vorgeschlagenen ergänzenden Untersuchungen und den vom ENSI geforderten Ergänzungen der notwendige Kenntnisstand erreicht werden kann, um in Etappe 2 SGT belastbare Aussagen zur sicherheitstechnischen Einstufung und zur bautechnischen Machbarkeit machen zu können. Das ENSI fordert deshalb für Etappe 2 SGT keine im Sinne der KEV bewilligungspflichtigen erdwissenschaftlichen Untersuchungen (z.B. Sondierbohrungen).

Um stufengerecht in Etappe 3 SGT den gemäss KEV geforderten Kenntnisstand zu erreichen, werden für die in Etappe 2 SGT vorgeschlagenen Standorte ergänzende, bewilligungspflichtige Untersuchungen notwendig sein. Das ENSI erwartet deshalb, dass die Nagra zusammen mit den Standortvorschlägen in Etappe 2 SGT entsprechende Gesuche einreicht.

Vor Einreichung der für Etappe 2 SGT erforderlichen Unterlagen durch die Nagra wird das ENSI im Rahmen einer Grobprüfung feststellen, ob die Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen die Anforderungen gemäss ENSI 33/075 erfüllen.

Brugg, 25. März 2011

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Der Direktor



Dr. Hans Wanner

## 13 Referenzen

- Amann F., Löw S. (2009): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien, Expertenbericht ENSI 33/065, ETH, Ingenieurgeologie, Zürich.
- Amann F., Löw S. (2011): Stellungnahme zur Abklärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen in SGT Etappe 2 für die Beurteilung der Standsicherheit und Erschliessung der Lagerkammern (NTB 10-01: Bautechnische Aspekte), Expertenbericht ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Zürich.
- Anselmetti F.S., Drescher-Schneider R., Furrer H., Graf H.R., Lowick S.E., Preusser F., Riedi M.A. (2010): A ~180,000 years sedimentation history of a perialpine overdeepened glacial trough (Wehntal, N-Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences* 103, 345-361. DOI: 10.1007/s00015-010-0041-1.
- Archer D., Ganopolski A. (2005): A movable trigger: Fossil fuel CO<sub>2</sub> and the onset of the next glaciation. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 6, 1-7. DOI: 10.1029/2004GC000891.
- ARE (2009): Bericht zu den Entwürfen der Planungsperimeter – Vorgehen der Arbeitsgruppe Raumplanung/Methode und Ergebnisse, Bundesamt für Raumentwicklung, Bern.
- Bastug T., Kuyucak S. (2005): Temperature dependence of the transport coefficients of ions from molecular dynamics simulations. *Chemical Physics Letters* 408, 84-88. DOI: 10.1016/j.cplett.2005.04.012.
- Bernet M., Brandon M., Garver J., Balestieri M.L., Ventura B., Zattin M. (2009): Exhuming the Alps through time: clues from detrital zircon fission-track thermochronology. *Basin Research* 21, 781-798. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2009.00400.x.
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern.
- Burkhalter R.M., Bläsi H.-R., Feist-Burkhardt S. (1997): Der «Dogger β» (oberes Aalénien) in den Bohrungen Herdern-1, Berlingen-1 und Kreuzlingen-1 (Nordostschweiz) und seine Beziehung zu gleichaltrigen Schichten im Nordjura. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 90, 269-291.
- Cederbom C.E., Schlunegger F., Sinclair H.D., Van der Beek P.A. (2008): Late Neogene climatic, tectonic and geodynamic(?) forcing on the European Alps recorded by the erosion history of the North Alpine Foreland Basin. *Geophysical Research Abstracts* 10, EGU2008-A-01147.
- Champagnac J.-D., Schlunegger F., K. N., von Blanckenburg F., L.M. A., Schwab M. (2009): Erosion-driven uplift of the modern Central Alps. *Tectonophysics* 474, 236-249.
- CNWRA (2004): Comments on Selected Sections of Nagra Safety Case Document NTB 02-05 and Supporting Documents – Final Report, Expertenbericht HSK 35/94, Center for Nuclear Waste Regulatory Analysis.
- Diebold P., Bitterli-Brunner P., Naef H. (2006): Erläuterungen zum Geologischen Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt 1069 Frick.
- Dr. von Moos AG (2005): Entsorgungsnachweis Quartär-Aquifere Zürcher Weinland – Beurteilung der geologisch-hydrogeologischen Verhältnisse, Expertenbericht 7609, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- Dr. von Moos AG (2009): Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1: Beurteilung der glazialen Tiefenerosion im Rahmen der Festlegung der geologischen Standortgebiete, Expertenbericht ENSI 33/063, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.

- Dr. von Moos AG (2010): Schottersysteme zwischen dem Thurtal und Schaffhausen, Expertenbericht 8600-3, Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- ENSI-G03: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Richtlinie, Würenlingen, 2009.
- ENSI 33/50: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Ein Modell zur Landschaftsentwicklung der Nordschweiz und zur Oberflächenhebung der letzten 10 Million Jahre, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/52: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Überprüfung der Sorptionskoeffizienten für die Geosphäre in den generischen Sicherheitsbetrachtungen der Nagra, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Technische Beurteilung, Brugg, 2010.
- ENSI 33/070: Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- ENSI 33/075: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- ENSI 33/111: Stellungnahme zu NTB 10-01 – Prüfung der Herleitung der sicherheitsrelevanten Prozesse und Parameter, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2011.
- Fraefel M. (2008): Geomorphic response to neotectonic activity in the Jura Mountains and the southern Upper Rhine Graben, Dissertation Universität Basel.
- GNW (1994): Gesuch um Erteilung der Rahmenbewilligung für ein Endlager SMA «Wellenberg» in Wolfenschiessen, NW, Gesuch Genossenschaft für Nukleare Entsorgung Wellenberg.
- Graf H. (2009): Stratigraphie und Morphogenese von frühpleistozänen Ablagerungen zwischen Bodensee und Klettgau. *Quaternary Science Journal* 58, 12-53.
- Graf H.R. (2010): Stratigraphie von Mittel- und Oberpleistozän in der Nordschweiz, Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz 168, Landesgeologie BWG.
- Grenthe I., Plyasunov A.V., Spahiu K. (1997): Estimations of Medium Effects on Thermodynamic Data, *in* Grenthe I., and Puigdomenech I., eds., *Modelling in Aquatic Chemistry*: Paris, OECD-NEA, p. 325-426.
- Haeberli W. (2004): Eishaus + 1 000 000a: Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre, Expertenbericht HSK 35/93.
- Hantke R. (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete, Art Inst. Orell AG, Zürich.
- Häuselmann P., Granger D.E., Jeannin P.-Y., Lauritzen S.E. (2007): Abrupt glacial valley incision at 0.8 Ma dated from cave deposits in Switzerland. *Geology* 35, 143–146.
- Hofmann F. (1967): Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 1052 Andelfingen, Karte Schweiz. geol. Komm., Bern.
- Hofmann F. (1981): Geologischer Atlas der Schweiz, Blatt 1031 Neunkirch, Karte Schweiz. geol. Komm., Bern.

- HSK 30/9: Gutachten zum Gesuch um Rahmenbewilligung für ein SMA-Endlager am Wellenberg, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 1996.
- HSK 30/18: Organika im Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle: Zellulose-Zerfallsprodukte und ihre Auswirkungen auf die Mobilität der Radionuklide, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2001.
- 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 35/80: Projekt Entsorgungsnachweis: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld BE/HAA, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Technische Beurteilung, Würenlingen, 2003.
- HSK 35/85: Projekt Entsorgungsnachweis: Sorptionskoeffizienten im Fernfeld (Opalinuston), Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 2004.
- HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen, 2005.
- Hübscher J. (1961): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000, Blatt 1032 Diessenhofen, Schweizerische Geologische Kommission.
- INTERREG IIIA (2008): Grenzüberschreitende Bewirtschaftung des Grundwassers im Raum Hegau – Schaffhausen, Abschlussbericht.
- 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, Dissertation Universität Basel.
- Kottke M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. (2006): World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- Mazurek M., Hurford A.J., Leu W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *Basin Research* 18, 27-50.
- Meier D. (in Vorb.): Ancillary rock and pore-water studies on drillcores from northern Switzerland (working title), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Metcalfe R., Walker C. (2004): Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, Nuclear Waste Management Organization of Japan, Tokyo, Japan.
- Müller E.R. (1996): Die Ittinger Schotter und ihr morphogenetisches Umfeld. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 89, 1077-1092.
- Nagra (1981): Sedimentologische, mineralogische und geochemische Untersuchungen an Bohrkernen der Bohrung Nr. 7904 der NOK beim KKW Beznau, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

- Nagra (1991): Der Opalinus-Ton des Mt. Terri (Kanton Jura): Lithologie, Mineralogie und Physikochemische Gesteinsparameter, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2001a): Sondierbohrung Benken: Geological and mineralogical investigations, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2001b): Stratigraphie Nordostschweiz, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2002): Benken Reference, Water Chemistry, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2003): Sondierbohrung Benken: Characterisation of pore water from argillaceous rocks, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2004): Entsorgungsnachweis für hochaktive Abfälle. Nagra Bulletin 35.
- Nagra (2009): Felsmechanisch relevante Eigenschaften von Trennflächensystemen im Opalinuston, Aktennotiz AN 09-269 (Entwurf), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010a): Bautechnische Beschreibung des mit Zugangsbauwerken zu geologischen Tiefenlagern zu durchfahrenden Gebirges in der Nordschweiz, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010b): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Elektronischer Daten- und Resultateordner (EDR) zu den Testrechnungen zur Ermittlung der Dosisintervalle, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010c): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2: Ableitung der wirtgesteinsbezogenen Diffusions- und Sorptionsdatenbanken für Testrechnungen, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010d): Bohrungen in den Effinger Schichten im Raum Aarau und Umgebung, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010e): Geotechnische Probleme und deren Lösungen im österreichischen Tunnelbau – Erfahrungen aus Tunnel-, Stollen und Schachtbauwerken in Österreich, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010f): Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE/SUG 2.1 – Orientierende felsmechanische Berechnungen und Vordimensionierung für SMA-Lagerkavernen in 300 bis 800 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston, Palfris und Effinger Schichten für Kavernentypen K06, K09, K12 und K16, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010g): Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE/SUG 2.2 – Orientierende felsmechanische Berechnungen für BE/HAA-Lagerstollen in 400 m, 650 m und 900 m im intakten und gestörten Opalinuston, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010h): Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE/SUG 2.3 – Orientierende Vordimensionierung für BE/HAA-Lagerstollen in 900 m Tiefe im intak-

- ten und gestörten Opalinuston für verschiedene Ausbaukonzepte, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2010i): Zusammenstellung von geotechnischen Erfahrungen bei Tunnel- und Schachtbauwerken in der Schweiz, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- NAB 07-02: ESDRED: Low pH Shotcrete for Rock Support – Spraying Tests in the Hagerbach Test Gallery, 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 08-02: NOK EWS-Bohrung Oftringen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-18: Borehole Oftringen: Mineralogy, Porosimetry, Geochemistry, Pore Water Chemistry, 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 09-13: Reference pore water for the Effingen Member (Standortregion Südjura) for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NAB 09-14: Reference pore water for the Opalinus Clay and «Brown Dogger» for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NAB 09-15: Reference pore water for the Helvetic marls for the provisional safety-analysis in the framework of the sectoral plan – interim results (SGT-ZE), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 09-31: Geologisches 3D-Modell Wellenberg, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NAB 10-15: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 Biosphärenmodellierung: Grundlagen für die Testrechnungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 10-17: An Analysis of Potential Changes to Barrier Components due to Interaction with a Concrete Liner in a Repository for SF/HLW in Opalinus Clay, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 10-19: Kompilation von Gesteinsparametern für die Wirtgesteine Opalinuston, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums, Nationale Ge-

- nossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 10-25: Kurzarbeitsprogramm Geothermiebohrung Schlattingen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2010.
- NAB 11-04: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Fragen des ENSI und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, in Vorbereitung.
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, 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 langlebige 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 02-16: NAGRA/PSI Chemical Thermodynamic Data Base 01/01, 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 03-07: Diffusion of HTO;  $^{36}\text{Cl}$ ;  $^{125}\text{I}$  and  $^{22}\text{Na}^+$  in Opalinus Clay: Effect of confining pressure, sample orientation, sample depth and temperature, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2003.

- 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 (Textband & Beilagenband), 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 08-07: 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 09-03: Sorption Data Bases for Generic Swiss Argillaceous Rock Systems, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Technischer Bericht, Wettingen, 2010.
- NTB 10-01: Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 – Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2010.
- NTB 84-25: Erläuterung zur geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100 000, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1984.
- NTB 85-02: Sondierbohrung Böttstein – Geologie (Textband und Beilagenband), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1986.
- NTB 86-01: Sondierbohrung Weiach – Geologie; Textband & Beilagenband, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1988.
- NTB 86-02: Sondierbohrung Riniken – Geologie; Textband & Beilagenband, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1987.
- NTB 86-03: Sondierbohrung Schafisheim – Geologie; Textband & Beilagenband, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1988.
- NTB 86-04: Sondierbohrung Kaisten – Geologie; Textband & Beilagenband, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1989.
- NTB 86-05: Sondierbohrung Leuggern: Geologie; Textband & Beilagenband, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1989.
- NTB 90-34: Sondierbohrung Siblingen – Untersuchungsbericht (Technischer Bericht mit Beilageband), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1992.

- NTB 93-04: TAME – The Terrestrial-Aquatic Model of the Environment: Model definition, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 1996.
- NTB 93-34: Erosionsszenarien Wellenberg, 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 99-08: Geologische Entwicklung der Nordschweiz; Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.
- NEA (2009): Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations: The CLAYTRAC Project, NEA No. 6253, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- Olin A., Noläng B., Osadchii E.G., Öhman L.O., Rosén E. (2005): Chemical Thermodynamics of Selenium, *in* Mompean F.J., Perrone J., and Illemassène M., eds., OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- Pearson F.J., Arcos D., Bath A., Boisson J.-Y., Fernández A.M., Gäbler H.-E., Gaucher E., Gautschi A., L. Griffault, Hernán P., Waber H.N. (2003): Mont Terri Project – Geochemistry of Water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri Rock Laboratory, Berichte des BWG, Serie Geologie No. 5, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- Pfiffner O.A., Burkhard M., Hänni R., Kammer A., Kligfield R., Mancktelow N.S., Menkveld J.W., Ramsay J.G., Schmid S.M., Zurbruggen R. (2010): Structural Map of the Helvetic Zone of the Swiss Alps, including Vorarlberg (Austria) and Haute Savoie (France), ohne Erläuterungen, Tektonische Karte swisstopo, Wabern.
- Powell K.J., Brown P., Byrne R.H., Gadjia T., Hefter G., Leuz A.-K., Sjöberg S., Wanner H. (2009): Chemical Speciation of Environmentally Significant Metals with Inorganic Ligands – Part 3: The  $\text{Pb}^{2+}$  –  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{PO}_4^{3-}$  Systems (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry 81, 2425-2476.
- Preusser F., Reitner J.M., Schlüchter C. (2010): Distribution, geometry, age and origin of overdeepened valleys and basins in the Alps and their foreland. Swiss Journal of Geosciences 103, 407–426. DOI: 10.1007/s00015-010-0044-y.
- Rai D., Hess N.J., Xia Y.X., Rao L.F., Cho H.M., Moore R.C., Van Loon L.R. (2003): Comprehensive thermodynamic model applicable to highly acidic to basic conditions for isosaccharinate reactions with Ca(II) and Np(IV). Journal of Solution Chemistry 32, 665-689.
- Rand M., Fuger J., Grenthe I., Volker N., Dhanpat R. (2009): Chemical Thermodynamics of Thorium, *in* Mompean F.J., Perrone J., and Illemassène M., eds., OECD Nuclear Energy Agency, Paris.
- Savage D., Noy D., Mihara M. (2002): Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. Applied Geochemistry 17, 207-223.
- Schlüchter C.E., Bini A., Buoncristiani J.-F., Couterrand S., Ellwanger D., Felber M., Florineth D., Graf H.R., Keller O., Kelly M., Schoeneich P. (2009): Die Schweiz während des

- letzteiszeitlichen Maximums (LGM) 1:500 000, Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern.
- Schlunegger F., Mosar J. (2010): The last erosional stage of the Molasse Basin and the Alps. *International Journal of Earth Sciences*. DOI: 10.1007/s00531-010-0607-1.
- Van Loon L.R. (2003): Diffusion of HTO,  $^{36}\text{Cl}^-$  and  $^{125}\text{I}^-$  in Opalinus Clay samples from Mont Terri Effect of confining pressure. *Journal of Contaminant Hydrology* 61, 73-83.
- Van Loon L.R., Muller W., Iijima K. (2005): Activation energies of the self-diffusion of HTO, Na-22(+) and Cl-36(-) in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). *Applied Geochemistry* 20, 961-972.
- Waber H.N. (in Vorb.): Mineralogie, Porosität, Cl- Gehalte und  $\delta^{37}\text{Cl}$  im Dogger der Bohrung Weiach, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Waber H.N., Mäder U., Koroleva M. (in Vorb.): Borehole Gösgen: Mineralogy, porosimetry, pore water chemistry, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Wang L., Jacques D., De Cannière P. (2007): Effects of an alkaline plume on the Boom Clay as a potential host formation for geological disposal of radioactive waste – First full draft. SCK•CEN-ER-28, Studiecentrum voor Kernenergie Centre d'étude de l'énergie Nucléaire, Mol, Belgium.
- Wersin P., Appelo C.A.J., Baeyens B., Bossart P., Dewonck S., Eikenberg J., Fierz T., Fisch H.R., Gimmi T., Grolimund D., Leupin O.X., Möri A., Soler J.M., Dorp F.v., Loon L.V. (2010): Long-term Diffusion (DI-A) Experiment: DI-A2: Diffusion of HTO, Br-, I-, Cs+,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$  and  $^{60}\text{Co}^{2+}$ : Field activities, data and modelling, Technical Report 2009-04, Mont Terri Project.
- Wersin P., Soler J.M., Van Loon L., Eikenberg J., Baeyens B., Grolimund D., Gimmi T., Dewonck S. (2008): Diffusion of HTO, Br-, I-, Cs+,  $^{85}\text{Sr}^{2+}$  and  $^{60}\text{Co}^{2+}$  in a clay formation: Results and modelling from an in situ experiment in Opalinus Clay. *Applied Geochemistry* 23, 678-691.
- Willenbring J.K., von Blanckenburg F. (2010): Long-term Stability of Global Erosion Rates and Weathering during late Cenozoic Cooling. *Nature* 465, 211-214.
- Willet S.D., Schlunegger F. (2009): The last phase of deposition in the Swiss Molasse Basin: from fore deep to negative-alpha basin. *Basin Research* 1-17. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2009.00435.x.
- Willet S.D. (2010): Late Neogene erosion of the Alps: A climate driver? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 38, 409-435.

## 14 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.
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
ATA	Alphatoxische Abfälle: radioaktive Abfälle mit einem hohen Gehalt an Alphastrahlern (Art. 31 KEV)
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.
BE	Abgebrannte Brennelemente, die ohne vorgängige Wiederaufarbeitung in ein HAA-Lager verbracht werden.
BFE	Bundesamt für Energie: verfahrensleitende Behörde im Sachplan geologische Tiefenlager ( <a href="http://www.bfe.admin.ch">www.bfe.admin.ch</a> )
Biosphärenmodell	Transport- und Expositionsmodell zur Umrechnung von Radionuklidfreisetzungen aus der Geosphäre in die Biosphäre in eine Strahlenexposition für die zu betrachtende Bevölkerungsgruppe (hier Individualdosis). Grundlage bildet ein Transport- und Akkumulationsmodell für die Berechnung der Radionuklid- und Radionuklid-Exposition im menschlichen Lebensraum (Wasser, Luft, Boden) und ein Modell für die Berechnung der Strahlendosis unter Berücksichtigung der Radionuklid- und Radionuklid-Exposition über das Trinkwasser, die Nahrung und die Atemluft sowie unter Berücksichtigung der direkten Bestrahlung.
BTK	Biosphärentransferkoeffizient
CERN	<b>C</b> onseil <b>E</b> uropéen pour la <b>R</b> echerche <b>N</b> 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.
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).
EAWAG	Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz

EG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: 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.
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.
EWS	Erdwärmesonde
Fernfeld	Das Fernfeld umfasst das Wirtgestein und die dazugehörigen Rahmengesteine bis zur Biosphäre. Das Fernfeld wird für die Berechnungen der Radionuklid Ausbreitung definiert, um die jeweiligen Modellannahmen für die verschiedenen Bereiche zu definieren.
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).
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
HAA	Hochaktive Abfälle: Darunter fallen nach Art. 31 KEV abgebrannte Brennelemente und verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung. Durch den radioaktiven Zerfall entsteht eine grosse Wärmeentwicklung.
HPM	Homogen-Poröses Medium
ISRAM	Informationssystem für Radioaktive Materialien: Datenbank der existierenden radioaktiven Abfälle in der Schweiz
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
KNS	Kommission für Nukleare Sicherheit

LGM	Letzteiszeitliches Maximum
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle: Als LMA werden diejenigen ATA und SMA bezeichnet, die in einem separaten Teil des HAA-Lagers eingelagert werden.
MIF	Radioaktive Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung
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 Abfallgebinde, die technischen Barrieren, insbesondere Verfüllungen und die Auflockerungszone des Wirtgesteins. Das Nahfeld wird für die Berechnungen der Radionuklidausbreitung definiert, um die jeweiligen Modellannahmen für die verschiedenen Bereiche zu definieren.
NEA	Nuclear Energy Agency der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development)
NTB	Nagra Technischer Bericht
PB	Prozesse und Parameter, welche über Parameterwerte für die Beurteilung der technischen Machbarkeit verwendet bzw. in der standort-spezifischen Anlagenplanung berücksichtigt werden.
PG	Prozesse und Parameter, welche direkt als Parameterwerte in den Systemanalysen bzw. in den Dosisberechnungen (Testrechnungen) verwendet werden, mit Bezug zu den geologischen Barrieren.
PI	Prozesse und Parameter, die ausschliesslich in die qualitative Bewertung einfließen und dort bei der Evaluation der zugehörigen Kriterien bzw. Indikatoren verwendet werden.
PICNIC	Programm zur Berechnung des Radionuklidtransports in der Geosphäre
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.

PT	Prozesse und Parameter, welche direkt als Parameterwerte in den Systemanalysen bzw. in den Dosisberechnungen (Testrechnungen) verwendet werden, mit Bezug zu den technischen Barrieren.
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. 31. KEV).
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPV	Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung
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.

## Anhang: Zuordnung der Prozesse und Parameter zu den sicherheitstechnischen Kriterien gemäss Konzeptteil Sachplan

**Tabelle A-1:** Gegenüberstellung der 13 Kriterien gemäss Sachplan und den abgeleiteten relevanten Prozessen der Nagra gemäss Anhang A-2 aus NTB 10-01. Gemäss den Angaben der Nagra fließen **fett** markierte Prozesse und Parameter direkt in die quantitative Analyse der Sicherheit (Systemanalysen bzw. Berechnung der Dosiskurven) ein und/oder werden als quantitativer Eingabewert bei der Anlagenplanung zur Berücksichtigung standort-spezifischer Aspekte verwendet. *Kursiv markierte Prozesse und Parameter* fließen in die qualitative Bewertung ein (Kombination fett/kursiv möglich). Prozesse/Parameter für die Anlagenauslegung/Anordnung der Lagerkammern werden mit PB, Prozesse/Parameter für die Sicherheit mit Bezug zu den technischen Barrieren mit PT und diejenigen mit Bezug zu den geologischen Barrieren mit PG bezeichnet. Mit PI bezeichnete Prozesse/Parameter fließen ausschliesslich in die qualitative Bewertung ein.

1.1	<b>Räumliche Ausdehnung</b>
	<b>Platzangebot untertags</b> (PB-4)
	<b>Mächtigkeit</b> (PG-5)
	<b>Sedimentäre Architekturelemente</b> (PG-11)
	<b>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit</b> (PB-1)
	<b>In-situ-Gebirgsspannungen</b> (PB-6)
	<b>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung</b> (PG-1)
	<b>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion</b> (PG-3)
	<b>Gebietsbegrenzende geologische Elemente</b> (PB-2)
	<b>Anordnungsbestimmende geologische Elemente</b> (PB-3)
<b>Glazial übertiefte Felsrinnen</b> (PG-2)	
1.2	<b>Hydraulische Barrierenwirkung</b>
	<b>Grossräumige hydraulische Durchlässigkeit</b> (PG-6)
	<b>Sedimentäre Architekturelemente</b> (PG-11)
	<b>Einfluss Dekompaktion auf hydraulische Durchlässigkeit</b> (PG-7)
	<b>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion</b> (PG-3)
	<b>Hydraulischer Gradient</b> (PG-8)
	<b>Transportrelevante Eigenschaften Interface BE/HAA-Lagerstollen/Wirtgestein</b> (PT-6)
	<b>Diffusionskoeffizienten für WG/EG</b> (PG-22)
	<b>Porosität</b> (PG-10)
	<b>Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation</b> (PI-4)
	welche beeinflussen:
<b>Advektion bzw. Diffusion im Nahfeld</b> (PT-5)	

1.3	<b>Geochemische Bedingungen</b>
	<b>Redox-Bedingungen</b> (PG-17)
	<b>Salinität</b> (PG-18)
	<b>pH</b> (PG-16)
	<b>Mineralogie</b> (PG-15)
	<b>Mikrobielle Prozesse</b> (PG-19)
	<b>Kolloidfiltration</b> (PG-20)
	welche evtl. beeinflussen:
	<b>Sorptionskoeffizienten für WG/EG</b> (PG-21)
	<b>Sorptionskoeffizienten im Nahfeld</b> (PT-4)
	<b>Diffusionskoeffizienten für WG/EG</b> (PG-22)
	<b>Löslichkeitslimiten im Nahfeld BE/HAA/LMA</b> (PT-3)
	<b>Auflösungsrate für Brennstoffmatrix und Hüllrohre BE</b> (PT-2)
<b>Behälterlebensdauer BE/HAA</b> (PT-1)	
1.4	<b>Freisetzungspfade</b>
	<b>Art der Transportpfade</b> (PG-9)
	<b>Porosität</b> (PG-10)
	<b>Sedimentäre Architekturelemente</b> (PG-11)
	<b>Transmissivität Störungszonen</b> (PG-14)
	<b>Selbstabdichtungsvermögen</b> (PI-6)
	<b>Relevante Exfiltrationspfade</b> (PG-27)
	<b>Länge der Transportpfade</b> (PG-13)
2.1	<b>Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften</b>
	<b>Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins</b> (PG-12)
	<b>Geodynamische und neotektonische Aktivität</b> (PI-2)
	<b>Selbstabdichtungsvermögen</b> (PI-6)
	<b>Vulkanische Aktivität</b> (PI-3)
2.2	<b>Erosion</b>
	<b>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf erosive Freilegung</b> (PG-1)
	<b>Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis</b> (PG-4)
	<b>Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung</b> (PG-28)
	<b>Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung</b> (PG-30)
	<b>Glazial übertiefte Felsrinnen</b> (PG-2)

2.3	<b>Lagerbedingte Einflüsse</b>
	<i>Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten (PG-23)</i>
	<i>In-situ-Gebirgsspannungen (PB-6)</i>
	<i>Auswirkungen pH-Fahne auf Wirtgestein (PG-24)</i>
	<i>Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas (PG-25)</i>
	<i>Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur (PG-26)</i>
	<i>In-situ-Temperatur (PB-5)</i>
	<i>Selbstabdichtungsvermögen (PI-6)</i>
2.4	<b>Nutzungskonflikte</b>
	<i>Nutzung der Gesteine als Rohstoff (PI-1)</i>
	<i>Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtgesteins (PG-32)</i>
	<i>Nutzungskonflikte hinsichtlich Rohstoffvorkommen oberhalb des Wirtgesteins (PG-33)</i>
	<i>Nutzungskonflikte hinsichtlich Mineralquellen und Thermen (PB-10)</i>
	<i>Nutzungskonflikte hinsichtlich Geothermie (PG-34)</i>
3.1	<b>Charakterisierbarkeit der Gesteine</b>
	<i>Variabilität der Gesteinseigenschaften (PI-5)</i>
	<i>Art der Transportpfade (PG-9)</i>
	<i>Sedimentäre Architekturelemente (PG-11)</i>
	<i>Erfahrungen (PI-7)</i>
3.2	<b>Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse</b>
	<i>Gebietsbegrenzende geologische Elemente (PB-2)</i>
	<i>Anordnungsbestimmende geologische Elemente (PB-3)</i>
	<i>Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund (PI-8)</i>
	<i>Explorationsbedingungen an Oberfläche (PI-9)</i>

3.3	<b>Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen</b>
	<i>Zeitliche Entwicklung regionale Erosionsbasis</i> (PG-4)
	<i>Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung</i> (PG-28)
	<i>Glazial übertiefte Felsrinnen</i> (PG-2)
	<i>Klimaentwicklung im Hinblick auf geologische Langzeitentwicklung</i> (PG-30)
	<i>Geodynamische und neotektonische Aktivität</i> (PI-2)
	<i>Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation</i> (PI-4)
	<i>Vulkanische Aktivität</i> (PI-3)
	<i>Lage und Beschaffenheit von verkarstungsfähigen Gesteinen innerhalb des Wirtgesteins</i> (PG-12)
	<i>Zeitliche Entwicklung der lokalen Topographie im Hinblick auf Biosphärenmodellierung</i> (PG-29)
	<i>Relevante Exfiltrationspfade</i> (PG-27)
	<i>Klimaentwicklung im Hinblick auf Abschätzung der Wasserflüsse bei der Biosphärenmodellierung</i> (PG-31)
4.1	<b>Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen</b>
	<i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit</i> (PB-1)
	<i>Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein</i> (PB-7)
	<i>In-situ-Gebirgsspannungen</i> (PB-6)
	mit Einfluss auf:
	<i>Auslegung der Lagerkammern</i> (PT-7)
4.2	<b>Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung</b>
	<i>Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen</i> (PB-8)
	<i>Natürliche Gasführung des Wirtgesteins</i> (PB-9)
	<i>Oberflächensituation</i> (PB-11)



ENSI 33/115

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, Fax +41 (0)56 460 84 99, [www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)