

Technischer Bericht 08-02

**Bericht zum Umgang mit den
Empfehlungen in den Gutachten
und Stellungnahmen zum
Entsorgungsnachweis**

Oktober 2008

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

Technischer Bericht 08-02

**Bericht zum Umgang mit den
Empfehlungen in den Gutachten
und Stellungnahmen zum
Entsorgungsnachweis**

Oktober 2008

Nationale Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Hardstrasse 73
CH-5430 Wettingen
Telefon 056-437 11 11

www.nagra.ch

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2008 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

Im Rahmen der Beurteilung des Projekts Opalinuston für den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle haben die Behörden und ihre Experten in ihren Gutachten und Stellungnahmen zahlreiche Hinweise und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben. Die Nagra hat die Stellungnahmen und Gutachten diesbezüglich analysiert und die Hinweise und Empfehlungen in ihrem Arbeitsplan berücksichtigt. In der Verfügung des Bundesrats aus dem Jahr 2006, gemäss welcher der Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle erbracht ist, wird von den Kernkraftwerkgesellschaften ein Bericht verlangt, welcher die offenen Fragen, Hinweise und Empfehlungen systematisch erfasst und aufzeigt, wie diese im weiteren Verfahren zeit- und sachgerecht beantwortet werden. Mit vorliegendem Bericht kommt die Nagra dieser Aufforderung im Auftrag der Kernkraftwerkgesellschaften nach. Im Bericht sind die Hinweise und Empfehlungen aufgeführt, und es wird aufgezeigt, wie mit diesen umgegangen wird. Für viele Hinweise und Empfehlungen wurde schon mit entsprechenden Arbeiten begonnen; in den anderen Fällen ist der Umgang mit ihnen definiert und die diesbezügliche Planung erfolgt. Für die Diskussion werden die Hinweise und Empfehlungen sowie die dazu gehörende Stellungnahme der Nagra in übergeordnete Themenbereiche gegliedert; eine zusammenfassende Diskussion erfolgt im Hauptteil des Berichts, wo auch auf die zeitlichen Aspekte bei der Umsetzung hingewiesen wird. Im Anhang des Berichts findet sich eine detaillierte Zusammenstellung aller Hinweise und Empfehlungen sowie der zugehörigen Stellungnahmen der Nagra.

Abstract

In the process of evaluating the Opalinus Clay project demonstrating the feasibility of disposing of spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste in Switzerland, the authorities and their experts made numerous recommendations regarding future procedures and activities to be implemented in the disposal programme. Nagra analysed these reviews and expert opinions and took the recommendations into consideration when preparing its future work programme. In 2006, the Federal Council decided that the feasibility of disposing of these waste categories had been demonstrated successfully, but called on the waste producers to prepare a report that systematically addresses the open questions and recommendations and shows how these will be dealt with in a timely and technically appropriate manner. In the present report, Nagra fulfils this requirement on behalf of the waste producers. The report sets out the recommendations made by the authorities and explains how they will be handled. In many cases, the work required has already begun; in other cases plans are already in place. To facilitate the discussion in the report, the recommendations and the responses of Nagra in each case are divided into topical areas. The main part of the report provides a summary discussion, which also addresses time-related aspects of implementing the recommendations. An appendix to the report provides a detailed overview, in the form of a table, of all the recommendations and the associated responses of Nagra.

Résumé

Dans le cadre de l'évaluation du projet Argiles à Opalinus – la démonstration de faisabilité du stockage géologique pour les éléments combustibles usés, les déchets de haute activité vitrifiés et les déchets de moyenne activité à vie longue – les autorités de sûreté et leurs experts ont effectué de nombreux commentaires et recommandations relatifs à la poursuite des travaux dans ce domaine. En conséquence, la Nagra a analysé les prises de position et expertises et intégré les commentaires et recommandations dans son plan de travail. En 2006, le gouvernement fédéral a approuvé la démonstration de faisabilité du stockage géologique pour les éléments combustibles usés, les déchets de haute activité vitrifiés et les déchets de moyenne activité à vie longue. Parallèlement, il a exigé des exploitants des centrales nucléaires un rapport énumérant de façon systématique les commentaires et recommandations et indiquant de quelle manière et selon quel calendrier ceux-ci seraient pris en compte pour la suite des travaux. Avec le présent rapport, la Nagra remplit cette exigence sur mandat des exploitants des centrales nucléaires. Ce document énumère les commentaires et recommandations et explique comment ils ont été ou seront pris en compte. Dans de nombreux cas, les travaux sont déjà en cours, dans d'autres, ils sont au minimum planifiés. Les commentaires et recommandations, accompagnés des prises de position de la Nagra, ont été regroupés thématiquement. Le rapport proprement dit résume les différents aspects, et indique également un calendrier général pour la mise en application des recommandations. En annexe se trouve la liste détaillée de tous les commentaires et recommandations accompagnés des réponses correspondantes de la Nagra.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract	II
Résumé	III
Inhaltsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
2 Die in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis aufgeführten Hinweise und Empfehlungen	3
2.1 Einleitung.....	3
2.2 HSK-Gutachten	4
2.3 KSA-Stellungnahme.....	5
2.4 KNE-Expertenbericht	7
2.5 OECD / NEA Review der Sicherheitsanalyse	7
3 Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung der zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	9
3.1 Einleitung.....	9
3.2 Realisierungsprogramm für die geologischen Tiefenlager	9
3.3 Eingliederung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in das Realisierungsprogramm.....	11
4 Umsetzung der Empfehlungen	13
4.1 Geologische Untersuchungen (Themenbereich 1).....	13
4.1.1 Standortuntersuchungen (Themenbereich 1.1).....	13
4.1.2 Regionale geologische Untersuchungen (Themenbereich 1.2)	14
4.1.3 Vertiefung Prozessverständnis Wirtgestein (Themenbereich 1.3).....	16
4.2 Beurteilung der Sicherheit (Themenbereich 2).....	22
4.2.1 Methodik der Sicherheitsanalyse (Themenbereich 2.1)	22
4.2.2 Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit (Themenbereich 2.2).....	24
4.3 Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen (Themenbereich 3).....	25
4.3.1 Abfallinventar und Abfalllogistik (Themenbereich 3.1)	25
4.3.2 Glaskorrosion (Themenbereich 3.2)	25
4.3.3 Verhalten der abgebrannten Brennelemente (Themenbereich 3.3)	26
4.3.4 Abfallkonditionierung (Themenbereich 3.4)	27
4.3.5 Abklärungen zur Gasbildung (Themenbereich 3.5)	27
4.4 Barrieren- und Lagerkonzepte (Themenbereich 4).....	27
4.4.1 Konzepte für die technischen Barrieren (Themenbereich 4.1)	27
4.4.2 Prozessverständnis im Nahfeld (Themenbereich 4.2)	31

4.4.3	Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit (Themenbereich 4.3)	33
4.4.4	Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe (Themenbereich 4.4)	35
4.5	Weitere Aspekte (Themenbereich 5)	37
4.5.1	Das Management-System der Nagra (Themenbereich 5.1)	37
4.5.2	Weitere organisatorische Aspekte (Themenbereich 5.2)	37
5	Zeitliche Aspekte	39
5.1	Geologische Untersuchungen (Themenbereich 1)	39
5.2	Beurteilung der Sicherheit (Themenbereich 2)	40
5.3	Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen (Themenbereich 3)	41
5.4	Barrieren- und Lagerkonzepte (Themenbereich 4)	42
5.5	Weitere Aspekte (Themenbereich 5)	43
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	45
7	Literaturverzeichnis	47
8	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen (inkl. Erläuterungen)	59
Anhang 1 – Stellungnahmen der Nagra zu den offenen Fragen, Hinweisen und Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis		
		A-1
1	Geologische Untersuchungen	A-3
1.1	Standortuntersuchungen	A-3
1.1.1	Standortuntersuchungen von der Oberfläche	A-3
1.2	Regionale geologische Untersuchungen	A-10
1.2.1	Langzeitentwicklung und Langzeitstabilität	A-10
1.2.2	Allgemeine Geologie	A-16
1.3	Vertiefung Prozessverständnis Wirtgestein	A-18
1.3.1	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Transportmechanismen	A-18
1.3.2	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Gastransport / Gasfreisetzung	A-21
1.3.3	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Selbstabdichtung	A-25
1.3.4	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. gekoppelter Phänomene	A-27
1.3.5	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Felsmechanik	A-31
2	Beurteilung der Sicherheit	A-32
2.1	Methodik der Sicherheitsanalyse	A-32
2.1.1	Methodik	A-32
2.1.2	Ableitung von Mindestanforderungen für ausgewählte Elemente des Barrierensystems	A-36
2.1.3	Biosphärenmodellierung	A-37
2.2	Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit	A-39
3	Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen	A-41

3.1	Abfallinventar und Abfalllogistik.....	A-41
3.2	Glaskorrosion.....	A-42
3.3	Verhalten der abgebrannten Brennelemente.....	A-43
3.4	Abfallkonditionierung	A-45
3.5	Abklärungen zur Gasbildung.....	A-46
4	Barrieren- und Lagerkonzepte	A-47
4.1	Konzepte für die technischen Barrieren.....	A-47
4.1.1	Bentonithaltige Verfüllmaterialien	A-47
4.1.2	Zementhaltige Verfüllmaterialien.....	A-54
4.1.3	BE- / HAA-Endlagerbehälter	A-54
4.1.5	Versiegelung und Verschluss	A-58
4.2	Prozessverständnis im Nahfeld.....	A-60
4.2.1	Geochemische Immobilisierung und Retardierung	A-60
4.3	Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit.....	A-69
4.3.1	Monitoring.....	A-69
4.3.2	Rückholung.....	A-72
4.4	Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe	A-75
5	Weitere Aspekte	A-86
5.1	Das Management-System der Nagra	A-86
5.2	Weitere organisatorische Aspekte	A-88
 Anhang 2 – Zusammenstellung von Vorgaben in Gesetzen, Verordnungen und behördlichen Dokumenten für die Realisierung der geologischen Tiefenlager in der Schweiz.....		 A-93

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Raster für die Darstellung zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	11
Tab. A.2-1:	Entscheidungspunkte: Erforderliche Genehmigungen und Bewilligungen für die schrittweise Realisierung der geologischen Tiefenlager in der Schweiz.....	A-93
Tab. A.2-2:	Einzureichende Unterlagen für die in Tab. A.2-1 aufgeführten Genehmigungen und Bewilligungen für die Realisierung der geologischen Tiefenlager.....	A-95

1 Einleitung

Im Juni 2006 hat der Bundesrat entschieden, dass der Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle (BE / HAA / LMA) erbracht sei (Schweizerischer Bundesrat 2006). Damit wurde bestätigt, dass keine offenen Fragen bestehen, welche die grundsätzliche Machbarkeit sicherer geologischer Tiefenlager in Frage stellen könnten. Die Berichte zum Entsorgungsnachweis für BE / HAA / LMA, basierend auf dem Projekt Opalinuston im Zürcher Weinland, hatte die Nagra Ende 2002 eingereicht (Nagra 2002a, b und c). 2003 begann eine umfassende behördliche Überprüfung, die im August 2005 abgeschlossen wurde. Die Gutachten und Stellungnahmen (HSK 2005, KSA 2005, KNE 2005, NEA 2004a) kamen zum grundsätzlichen Ergebnis, dass der Entsorgungsnachweis erbracht sei, und die HSK^{1,2} empfahl dem Bundesrat, dem Antrag der Nagra, den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen, zuzustimmen. Sämtliche Unterlagen und Berichte zum Entsorgungsnachweis wurden anschliessend öffentlich aufgelegt.

Der Entsorgungsnachweis wird seit 1978 verlangt (BBAtG 1978) und ist auch im heutigen Kernenergiegesetz enthalten (KEG Art. 13). Nachdem der Bundesrat schon 1988 den Entsorgungsnachweis für die schwach- und mittelaktiven Abfälle (SMA) als erbracht beurteilt hatte, ist seit 2006 für alle in der Schweiz anfallenden radioaktiven Abfälle die grundsätzliche Machbarkeit ihrer sicheren Entsorgung nachgewiesen.

In seiner Verfügung zum Entsorgungsnachweis für BE / HAA / LMA (Schweizerischer Bundesrat 2006) verlangte der Bundesrat, dass die Kernkraftwerkgesellschaften als Ergänzung zum Entsorgungsprogramm nach KEG Art. 32 gleichzeitig einen Bericht unterbreiten, der alle in den Gutachten und Stellungnahmen von HSK, KNE³, KSA⁴ und von einem von der OECD Nuclear Energy Agency (OECD / NEA) zusammengestellten Expertenteam enthaltenen offenen Fragen, Hinweise und Empfehlungen systematisch erfasst und aufzeigt, wie diese im weiteren Verfahren zeit- und sachgerecht beantwortet werden. Mit vorliegendem Bericht kommt die Nagra im Auftrag der Kernkraftwerkgesellschaften bzw. der Entsorgungspflichtigen dieser Forderung nach.

Der vorliegende Bericht steht in engem Zusammenhang mit dem laufenden Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Schweiz zur Entsorgung der radioaktiven Abfälle, welches auf die dazu seit ca. 30 Jahren laufenden Arbeiten aufbaut. Das Forschungs- und Entwicklungsprogramm hat zu einer soliden wissenschaftlichen Basis geführt, die es jetzt erlaubt, die anstehende Aufgabe der Wahl von Standorten für die zukünftige Realisierung von geologischen Tiefenlagern anzugehen; dies geschieht im Rahmen des Sachplans geologische Tiefenlager (BFE 2008), dessen Konzept der Bundesrat am 2. April 2008 genehmigt hat. Neben den Arbeiten im Hinblick auf die Standortwahl wird das Forschungs- und Entwicklungsprogramm weitergeführt, um zielgerichtet die Unterlagen stufengerecht hinsichtlich der verschiedenen Entscheidungspunkte und Bewilligungsverfahren zu vertiefen. Für die zukünftige Ausrichtung dieses Forschungs- und Entwicklungsprogramms bilden die Empfehlungen der Behörden und Experten einen wichtigen Input. Eine Darstellung der künftigen Arbeiten aus übergeordneter Sicht ist im Entsorgungsprogramm enthalten, das zeitgleich mit diesem Bericht bei den Behörden eingereicht wurde (Nagra 2008a).

¹ Abkürzungen werden beim erstmaligen Auftreten im Text in einer Fussnote erläutert; die Erläuterung wird auch im Verzeichnis der Abkürzungen aufgeführt.

² HSK: Hauptabteilung für die Sicherheit von Kernanlagen, ab 1. Januar 2009 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI).

³ KNE: Kommission Nukleare Entsorgung.

⁴ KSA: Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen, seit dem 1. Januar 2008 'Kommission für nukleare Sicherheit' (KNS).

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut: Nach der Einleitung in Kap. 1 werden in Kap. 2 die in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis aufgeführten Hinweise und Empfehlungen zusammenfassend aufgeführt. In Kap. 3 werden die Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms dargestellt. Kap. 4 enthält eine Übersicht, wie mit den Hinweisen und Empfehlungen, unter Berücksichtigung der in Kap. 3 aufgeführten Rahmenbedingungen, umgegangen wird. In Kap. 5 werden die zeitlichen Aspekte bei der Abwicklung der in Kap. 4 diskutierten Tätigkeiten zusammenfassend dargestellt. Kap. 6 enthält die Schlussfolgerungen. Anhang 1 enthält eine detaillierte Zusammenstellung der Hinweise und Empfehlungen aus den verschiedenen Gutachten und Stellungnahmen sowie Stellungnahmen der Nagra zu deren Umsetzung; diese Zusammenstellung ist nach Themenbereichen gegliedert, wie sie in Kap. 3 definiert werden. In Anhang 2 findet sich eine Zusammenstellung der gesetzlichen und behördlichen Vorgaben für die verschiedenen Genehmigungen und Bewilligungen; diese Zusammenstellung ist für das Verständnis der in Kap. 3 aufgeführten Rahmenbedingungen von Bedeutung.

2 Die in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis aufgeführten Hinweise und Empfehlungen

2.1 Einleitung

Von Januar 2003 bis August 2005 fand die Begutachtung des Projekts zum Entsorgungsnachweis für BE / HAA / LMA durch die Behörden und ihre Experten statt. Dies führte zu folgenden Berichten:

- **Gutachten der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen** (HSK 2005). Die HSK hat den Entsorgungsnachweis umfassend überprüft. Für etliche Fragen hat sie auch externe unabhängige Fachleute beigezogen. Das Gutachten der HSK teilt den Entsorgungsnachweis in die drei Teile Standort-, Machbarkeits- und Sicherheitsnachweis auf. Die HSK legte dar, dass die Nagra mit dem von ihr eingereichten Projekt Opalinuston jeden dieser drei Teilnachweise erbracht hat. Auch insgesamt sei der Entsorgungsnachweis für BE / HAA / LMA erbracht.
- **Stellungnahme der Eidgenössischen Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen** (KSA 2005). Die KSA hat Stellung zum eingereichten Entsorgungsnachweis sowie zum Gutachten der HSK und zu weiteren Expertisen genommen. Sie kommt zum Schluss, dass der Entsorgungsnachweis erbracht sei.
- **Expertenbericht der Kommission nukleare Entsorgung** (KNE 2005). Die KNE hat zu den erdwissenschaftlichen und bautechnischen Aspekten des Projekts Opalinuston Stellung genommen sowie das Konzept und die bautechnische Machbarkeit des geologischen Tiefenlagers überprüft. Sie kommt zum Schluss, dass der Standortnachweis erbracht sei. Der Bau des Lagers in der vorgeschlagenen mittleren Tiefenlage von 650 m unter Geländeoberkante im Zürcher Weinland ist aus Sicht der KNE unter den felsmechanischen Gegebenheiten im Opalinuston machbar; die vorgeschlagene Auslegung der Anlage beurteilt die KNE als zweckmässig.
- **Review der internationalen Expertengruppe der OECD / NEA** (NEA 2004a). Auf Ersuchen des Bundesamts für Energie hat die OECD / NEA mit einer internationalen Expertengruppe (International Review Team: NEA-IRT) die Langzeitsicherheitsanalyse der Nagra geprüft. Die Expertengruppe erklärte sich beeindruckt von der Qualität des Sicherheitsnachweises der Nagra; der Sicherheitsnachweis beruhe generell auf einer soliden wissenschaftlichen Basis mit einem ausgewogenen Verhältnis zwischen quantitativen und qualitativen Argumenten. Der Sicherheitsbericht werde in der bevorstehenden nationalen Debatte über die zukünftigen Phasen des schweizerischen Entsorgungsprogramms eine wichtige Diskussionsgrundlage bilden.

Die Gutachten und Stellungnahmen kamen alle zu positiven Schlussfolgerungen bezüglich des Entsorgungsnachweises, und die HSK empfahl dem Bundesrat, dem Antrag der Nagra, den Entsorgungsnachweis als erbracht zu genehmigen, zuzustimmen. Die Gutachten und Stellungnahmen enthalten aber zahlreiche Hinweise und Empfehlungen, und die Nagra hat diese nach deren Publikation auf möglichen Input für die Ausrichtung der zukünftigen Arbeiten analysiert. Dabei wurden im HSK-Gutachten rund 90 Empfehlungen (davon 11 in der zusammenfassenden Beurteilung des Gutachtens als bedeutend dargestellt, vgl. HSK 2006), in der KSA-Stellungnahme rund 30 Empfehlungen (davon im Text der Stellungnahme 13 speziell hervorgehoben)⁵, im Bericht der KNE rund 50 Empfehlungen und im Bericht des NEA-IRT rund 30 Empfehlungen identifiziert; insgesamt handelt es sich somit um rund 200 Empfehlungen. Diese Empfeh-

⁵ In ihrem Abschlussbericht (KSA 2007) hat die KSA diese wichtigsten Empfehlungen nochmals aufgeführt.

lungen sind teilweise deckungsgleich (z.B. Bezugnahme auf Empfehlungen der KNE im HSK-Gutachten, Übernahme von Empfehlungen der KNE und der HSK in der KSA-Stellungnahme, etc.) und betreffen häufig auch die gleichen Themenbereiche.

Die angesprochenen Themenbereiche umfassen:

- Ausrichtung und Inhalt zukünftiger Standortuntersuchungen im Zürcher Weinland, falls das Projekt Opalinuston im Zürcher Weinland für ein Lager für BE / HAA / LMA weiterverfolgt wird
- Vertiefung der Kenntnisse zur regionalen Geologie durch Weiterführung der regionalen Untersuchungen und Messungen (Geodäsie, Mikroseismik, etc.) sowie durch Beteiligung an Untersuchungen Dritter (insbesondere Bohrungen)
- Weiterführung des Versuchsprogramms im Felslabor Mont Terri
- Verbesserung des Verständnisses für wichtige sicherheitsrelevante Prozesse durch Versuche in Felslabors, Weiterführung von Laborexperimenten und Auswertung neuer Daten aus Felduntersuchungen sowie Weiterentwicklung von Prozessmodellen
- Weiterentwicklung der Methodik der Sicherheitsanalysen (Szenarienanalyse, Codes zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung, etc.)
- Gezielte Überprüfung bzw. Vertiefung von Informationen zum Abfallinventar
- Möglichkeiten zur Optimierung der Anlagenauslegung
- Weitere Abklärungen zur Auslegung der technischen Barrieren, Vertiefung der Kenntnisse zu Materialeigenschaften und deren zeitlichen Entwicklung
- Empfehlungen zu organisatorischen Aspekten

Neben den erwähnten Gutachten und Stellungnahmen gab es noch weitere Stellungnahmen anderer Stellen, die aber in der Verfügung des Bundesrats in seinem Entscheid zum Entsorgungsnachweis (Schweizerischer Bundesrat 2006) bezüglich des vorliegenden Berichts nicht erwähnt werden; deren Empfehlungen werden aber bei der Gestaltung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms auch berücksichtigt.

Die wichtigsten Empfehlungen sind in nachfolgendem Kapitel zusammengefasst; eine vollständige Auflistung findet sich in Anhang 1.

2.2 HSK-Gutachten

Die HSK hat in ihrem Gutachten zum Entsorgungsnachweis (HSK 2005) mit einer Vielzahl von Empfehlungen und offenen Fragen auf Punkte verwiesen, die in Zukunft im Programm zur Entsorgung der BE / HAA / LMA zu beachten bzw. die bei einer Fortführung des Projekts Opalinuston im Zürcher Weinland zu klären sind. Aus ihrer Sicht haben die folgenden Punkte – alle in Bezug auf die Sicherheit des künftigen Lagers – höchste Priorität:

- Die Dichtheitskontrolle am beladenen Behälter, die mechanische Festigkeit der BE-Endlagerbehälter, die Auswirkungen einer korrosionsbedingten Volumenzunahme sowie die Möglichkeit einer stärkeren Sulfidkorrosion.
- Das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen, die beim Gasdurchbruch auftretenden Phänomene sowie die Materialeigenschaften des Bentonitgranulats.

- Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager, hauptsächlich aber zur Abfuhr des entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston führen.

Weitere Empfehlungen betreffen den Standort- und Machbarkeitsnachweis und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Standortnachweis:
 - Die Rahmengesteine ober- und unterhalb des Opalinustons sollen detaillierter charakterisiert werden, damit das Einschlussvermögen dieser Schichten quantifiziert werden kann.
 - Der hydrogeologische Datensatz soll erweitert und bestätigt werden und insbesondere auch die Rahmengesteine umfassen.
 - Die Vorgänge der glazialen Tiefenerosion sollen eingehender abgeklärt werden, damit die Möglichkeiten der zukünftigen Auswirkungen durch Modellierungen besser eingegrenzt werden können.
- Machbarkeitsnachweis:
 - Zur Erleichterung der Wasserhaltung und der Lüftung wäre es von Vorteil, den Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenlagen mit dem Lüftungs- und Bauschacht zu verbinden.
 - Die Tunnel- und Schachtquerschnitte sind auf Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenz zu optimieren.
 - Es besteht Abklärungsbedarf im Bauverfahren betreffend Zweckmässigkeit des Raiserdrill-Verfahrens, Wasserhaltung, Einsatz einer Tunnelbohrmaschine und Ausbruchssicherung.
 - Die Auslegung der Lüftung ist insbesondere für die dritte Bauetappe, wenn viel Wärme abzuführen ist, zu optimieren.
 - Die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungseignisse und der zu treffenden Massnahmen ist zu verfeinern.

2.3 KSA-Stellungnahme

Im Hinblick auf die Weiterführung des Programms zur Entsorgung der BE / HAA / LMA machte die KSA in ihrer Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis (KSA 2005) folgende Empfehlungen:

- Nach erfolgter Standortwahl soll die Barrierenwirkung der Rahmengesteine genauer abgeklärt und in der Sicherheitsanalyse auch im Referenzfall berücksichtigt werden.
- Nach erfolgter Standortwahl soll die Robustheit des Tiefenlagersystems hinsichtlich Einhaltung des Schutzziels 1 der Richtlinie HSK-R-21 durch die Analyse weiterer Fälle systematisch und umfassender untersucht werden.
- Um eine Gefährdung der Barrierenwirkung des Opalinustons durch die Gasentwicklung infolge Korrosion der Stahlbehälter zu vermeiden, sollen alternative Behälterwerkstoffe und/oder Behälterkonzepte evaluiert werden. Zudem sollen die Auswirkungen der über längere Zeit erhöhten Gasdrücke und Temperaturen auf die Transporteigenschaften von Opalinuston und Bentonit untersucht werden. Anschliessend soll eine integrale Beurteilung der Gasfrage erfolgen.

- Die Machbarkeit eines Selbstverschlussbauwerks soll in einer Studie abgeklärt werden.
- Für die einzelnen Barrieren sollen Mindestanforderungen bzw. Auslegungskriterien festgelegt werden.
- Beim Betrieb der Kernanlagen sowie der Behandlung und Konditionierung von Abfällen soll der Abstimmung mit den Erfordernissen der Entsorgung bis und mit geologischer Tiefenlagerung im Sinne einer Optimierung vermehrt Rechnung getragen werden; hinsichtlich BE / HAA gilt dies speziell für die Kernauslegung und die Festlegung des maximalen Abbrands, hinsichtlich LMA für den Gehalt an organischen Stoffen.
- Es sollen ein Monitoringkonzept für die Überwachung des Pilotlagers erstellt und die Forschung und Entwicklung für den Einsatz geeigneter langzeitstabiler Messsysteme zielgerichtet vorangetrieben werden.
- Es sollen Anforderungen an Festigkeit und Durchlässigkeit der Verschlüsse quantifiziert und in Ausführungsspezifikationen umgesetzt werden.
- Die Rückholstudie soll bezüglich der Verlässlichkeit bzw. Reparierbarkeit der automatisierten Rückbaugeräte bei den vorherrschenden Einsatzbedingungen und bezüglich der zum Rückbau eventuell notwendigen Oberflächenanlagen vertieft werden.
- Die Nagra soll die im Rahmen der Beurteilung durch HSK, KNE, NEA-IRT und KSA aufgeworfenen Fragen, die Hinweise und Empfehlungen sowie den identifizierten Bedarf an Forschung und Entwicklung – begleitend zum Entsorgungsprogramm gemäss Art. 32 KEG und Art. 52 KEV – im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms weiter verfolgen. Besondere Bedeutung ist dabei der Frage der für die Lagerbehälter zu verwendenden Werkstoffe beizumessen.

Zu grundsätzlichen Fragen im weiteren Vorgehen bei der Entsorgung der radioaktiven Abfälle empfahl die Kommission zusätzlich:

- Im Rahmen des von den Abfallproduzenten vorzulegenden Entsorgungsprogramms soll ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm erstellt werden, das regelmässig dem aktuellen Stand von Wissen und Technik angepasst wird und auch sozialwissenschaftliche Untersuchungen und Projekte umfasst.
- Die Idee des Entsorgungsrats soll durch den Bund möglichst rasch umgesetzt werden.
- Die Nagra soll ihr Management-System unter Berücksichtigung der entsprechenden Empfehlungen der IAEA auf die Norm ISO 9004:2000 ausbauen und künftig laufend dem sich ändernden Stand des Entsorgungsprogramms anpassen.

In Ergänzung dazu soll die Nagra ein ständiges Gremium von unabhängigen externen Experten bestellen, welches ihre Arbeiten auf Qualität, Vollständigkeit der Nachweisführung sowie die Grundausrichtung ihrer Tätigkeit überprüft.

- In die Verfahrensschritte, die zur Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung führen, insbesondere die im Anschluss an den Entsorgungsnachweis anstehende Standortwahl, sollen alle wichtigen betroffenen Kreise einbezogen werden. Dieser Einbezug soll in einem geregelten partizipativen Prozess erfolgen, der gemäss dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführt wird.
- Die Erkenntnisse und Daten aus Entwicklungs- und Forschungsarbeiten der Nagra sowie weiterer beteiligter Organisationen und der Behörden sollen von der Nagra in einer Datenbank zusammengestellt werden. Die Nagra soll zudem in ihr Qualitätsmanagement-System einen Prozess "Wissensmanagement" aufnehmen.

- Die Nagra und die Behörden sollen schon jetzt Forschungsarbeiten zur Weitergabe der Informationen über ein verschlossenes geologisches Tiefenlager an spätere Generationen aktiv verfolgen.

2.4 KNE-Expertenbericht

Die KNE (KNE 2005) hat eine Reihe von Fragen identifiziert, welche in Zukunft behandelt werden sollten. Diese betreffen insbesondere:

- Die Weiterentwicklung des geodynamischen Konzepts.
- Die weitere Absicherung der bei der glazialen Tiefenerosion ablaufenden Prozesse.
- Die Absicherung der geringen Erhöhung der Durchlässigkeit von tektonischen Trennflächen in Tiefen von 600 m (Selbstabdichtungsvermögen des Opalinuston).
- Die Weiterführung der Untersuchungen zur geochemischen Immobilisierung der Radionuklide (thermodynamische Datensätze, Sorptionsverhalten, Einfluss des Wasserstoffgases auf chemische Reaktionsvorgänge, zeitliche Entwicklung des Zementsystems).
- Die vertiefte Abklärung der Eigenschaften und des Verhaltens der Bentonit-Barriere sowie der Prozesse im Grenzbereich zum Gestein angesichts der Wärmeproduktion der BE und HAA (inkl. hydromechanisch gekoppelte Prozesse im Nahfeld).
- Die Optimierung der Auslegung des geologischen Tiefenlagers (Linienführung Zugangstunnel, Tunnel- und Schachtquerschnitte auch unter Berücksichtigung der Bauphase).

2.5 OECD / NEA Review der Sicherheitsanalyse

Eine internationale Expertengruppe unter der Federführung der Nuclear Energy Agency der OECD hat eine wissenschaftliche Begutachtung des Sicherheitsberichts durchgeführt (NEA 2004a). Die wichtigsten Empfehlungen bezüglich des kurz- und mittelfristigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms sind:

- Die Fortsetzung der Forschung zum Verhalten des Bentonits (insbesondere des vorge schlagenen Bentonitgranulats) unter erhöhten Temperaturen und zu thermo-hydro-mechanischen Aspekten im Nahfeld.
- Die Fortsetzung der Untersuchungen zur Radionuklidrückhaltung in Tonsystemen (Bentonit, Opalinuston).
- Die Durchführung weiterer Standortuntersuchungen von der Oberfläche (Rahmengesteine, Vertiefung weiterer Aspekte), falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird.
- Die Weiterentwicklung der Methode der Sicherheitsanalyse und der verwendeten Rechenwerkzeuge.
- Die Fortführung der experimentellen Untersuchungen der Gastransportprozesse mit Feld- und Laborexperimenten sowie deren Modellierung.
- Die Beibehaltung von Kupfer als Option für die BE- bzw. HAA-Endlagerbehälter.

3 Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung der zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

3.1 Einleitung

Im Hinblick auf die Ausgestaltung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms muss festgelegt werden, wann welche Information in welchem Detaillierungsgrad vorliegen muss. Dies ist direkt abhängig vom Realisierungsprogramm der geologischen Tiefenlager, welches einerseits von den gesetzlichen Vorgaben sowie von konzeptuellen Vorgaben und Annahmen abhängt, und andererseits durch die Abwicklung der notwendigen Arbeiten bestimmt wird.

In diesem Kapitel werden zuerst die gesetzlichen Randbedingungen und die konzeptuellen Vorgaben und Annahmen diskutiert. Darauf abgestützt wird aufgezeigt, welche Rahmenbedingungen sich bezüglich des Forschungs- und Entwicklungsprogramms ergeben. Weiter wird dargelegt, wie die Stellungnahme der Nagra zu den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis gegliedert ist. Die hier aufgeführten Rahmenbedingungen für die Ausgestaltung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprogramms basieren auf den im Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) aufgeführten Überlegungen.

3.2 Realisierungsprogramm für die geologischen Tiefenlager

Die Vorgaben im Kernenergiegesetz (KEG 2003) und in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) sowie im Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (kurz: SGT, BFE 2008) definieren die wichtigsten Meilensteine und Entscheidungspunkte bei der Realisierung der geologischen Tiefenlager und legen auch fest, welche Unterlagen bei den verschiedenen Entscheidungspunkten vorliegen müssen. Tabelle A.2-1 (Anhang 2) enthält eine Zusammenstellung der Entscheidungspunkte und Tabelle A.2-2 (Anhang 2) eine Übersicht der dafür erforderlichen Unterlagen. Der aus diesen Vorgaben resultierende grundsätzliche Ablauf der Realisierung mit den dabei erfolgenden wichtigsten Festlegungen wird nachfolgend kurz beschrieben.

Die Standortwahl erfolgt gemäss SGT in drei Etappen, deren Ausgestaltung im Detail in BFE (2008) beschrieben ist. Ausgehend von Vorschlägen der Entsorgungspflichtigen führt Etappe 1 ('Vororientierung') zu geologischen Standortgebieten für das SMA- bzw. das HAA-Lager, welche in Objektblättern festgehalten werden. Etappe 2 des Sachplanverfahrens ('Zwischenergebnis') führt zu mindestens je zwei Standorten für das SMA- bzw. das HAA-Lager. Anschliessend sind für das SMA- und das HAA-Lager mindestens je zwei Standorte auf einen Kenntnisstand zu bringen, der einen abschliessenden Vergleich zulässt. Dazu sind bewilligungspflichtige Feldarbeiten durchzuführen. Der Vergleich führt zur Wahl von je einem Standort (bzw. einem Standort für ein 'Kombi-Lager'⁶) für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche und der Unterlagen für die Festsetzungen gemäss Sachplan für das SMA- und das HAA-Lager (oder das Kombi-Lager). Nach Prüfung der Rahmenbewilligungsgesuche durch die Behörden werden die Rahmenbewilligungen durch den Bundesrat erteilt und die Festsetzungen gemäss Sachplan bzw. Raumplanungsgesetz genehmigt. Die Rahmenbewilligungen sind durch das Parlament zu bestätigen und unterliegen dem fakultativen nationalen Referendum.

⁶ Unter dem Begriff 'Kombi-Lager' wird das Konzept beschrieben, bei dem das HAA- und das SMA-Lager beide am gleichen Standort, die Lagerkammern aber räumlich getrennt angeordnet werden, entweder in der gleichen oder in verschiedenen Gesteinsschichten.

Nach Festlegung der Standorte für das SMA- und das HAA-Lager (oder das Kombi-Lager) durch die Rahmenbewilligungen und nach der Standortuntersuchung Untertag folgen schrittweise weitere nukleare Bewilligungsverfahren (KEG 2003, KEV 2004): Die Baubewilligung, die Betriebsbewilligung und – nach Abschluss der Betriebs- und Beobachtungsphase – die Anordnung des Verschlusses durch den Bundesrat. Diese Bewilligungsverfahren berücksichtigen auch die Aspekte aus anderen Bereichen, insbesondere die Abstimmung mit der Raumplanung und die Prüfung der Umweltverträglichkeit. Die wichtigsten Merkmale der einzelnen nuklearen Bewilligungen sind nachfolgend aufgelistet:

- Die *Rahmenbewilligung*: Mit der Rahmenbewilligung werden insbesondere der Standort und die Grundzüge des Projekts festgelegt. Zu diesen Grundzügen gehören die ungefähre Grösse und Lage der wichtigsten Bauten sowie die Kategorien des Lagerguts und die maximale Lagerkapazität. In der Rahmenbewilligung werden auch die Eignungskriterien definiert, die bei der weiteren Lagerrealisierung einzuhalten sind sowie Konzepte für die Beobachtungsphase und den Verschluss. Weiter wird der vorläufige Schutzbereich festgelegt.
- Die *nukleare Baubewilligung* legt insbesondere die Kapazität der Anlage und die wesentlichen Elemente der technischen Verwirklichung fest. Sie enthält weiter ein Projekt für die Beobachtungsphase und einen Plan für den Verschluss.
- Die *nukleare Betriebsbewilligung* legt insbesondere die Kapazität der Anlage, die Massnahmen zur Überwachung der Umgebung und die Stufen der Inbetriebnahme fest; der Beginn der letzteren bedarf einer vorgängigen Freigabe durch die Aufsichtsbehörden. Weiter legt die Betriebsbewilligung die Anforderungen an die Abfälle und insbesondere die Grenzwerte für die Aktivität der einzulagernden Abfälle fest.
- Die *Anordnung des Verschlusses des geologischen Tiefenlagers* erfolgt durch den Bundesrat nach Ablauf der Beobachtungsphase, wenn der dauernde Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet ist. Nach dem ordnungsgemässen Verschluss kann der Bundesrat eine weitere, befristete Überwachung anordnen.

Bei Abwicklung der Arbeiten und insbesondere bei Festlegungen zur Anlagenauslegung ist darauf zu achten, dass der notwendige Handlungsspielraum erhalten bleibt zur optimalen Auslegung der Anlage. Dies bedeutet insbesondere, dass

- die detaillierte Anordnung der Lagerkammern und die endgültige Auslegung der technischen Barrieren für das nukleare Baubewilligungsgesuch erfolgt, wenn die Informationen auch aus der untertägigen Standorterkundung und die wichtigsten Resultate aus dem standortspezifischen Felslabor vorliegen. Zu diesem Zeitpunkt liegen ebenfalls die für die Erstellung der Anlagen notwendigen Informationen zu den einzulagernden Abfällen vor;
- die abschliessende Wahl der Technologie für das Einbringen der Abfälle und der technischen Barrieren die definitive Auslegung der technischen Barrieren berücksichtigt und die Resultate des Forschungs- und Entwicklungsprogramms sowie die Erfahrungen in anderen Programmen möglichst gut nutzen soll. Deshalb wird die Technologie erst für das nukleare Baubewilligungsgesuch abschliessend festgelegt;
- die endgültige Festlegung des untertägigen Monitoringprogramms (Überwachung Pilotlager, weitere Massnahmen) die Resultate der untertägigen Exploration, die Resultate des Forschungs- und Entwicklungsprogramms, die definitive Auslegung der Lageranlage sowie die Erfahrungen in anderen Programmen möglichst gut nutzen soll und deshalb erst für das nukleare Baubewilligungsgesuch im Detail definiert wird.

3.3 Eingliederung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in das Realisierungsprogramm

Die Eingliederung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms in das Realisierungsprogramm der geologischen Tiefenlager berücksichtigt die in Kap. 3.2 dargestellten gesetzlichen und behördlichen Vorgaben. Für die Darstellung des Umgangs mit den Hinweisen und Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis wird eine thematische Gliederung verwendet, die sich an die Angaben im Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) anlehnt und auch für die Nagra-interne Planung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms verwendet wird (vgl. Tab. 3-1).

Tab. 3-1: Raster für die Darstellung zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Für die kursiv aufgeführten Themenbereiche bestehen keine Hinweise und Empfehlungen bzw. die entsprechenden Hinweise und Empfehlungen sind unter einem anderen Themenbereich aufgeführt.

Nr.	Thema
1	Geologische Untersuchungen
1.1	Standortuntersuchungen
1.1.1	Standortuntersuchungen von der Oberfläche
<i>1.1.2</i>	<i>Standortuntersuchungen Untertag (inkl. In-situ-Felslabor)</i>
1.2	Regionale geologische Untersuchungen
1.2.1	Langzeitentwicklung und Langzeitstabilität
1.2.2	Allgemeine Geologie
1.3	Vertiefung Prozessverständnis Wirtgestein
1.3.1	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Transportmechanismen
1.3.2	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Gastransport / Gasfreisetzung
1.3.3	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Selbstabdichtung
1.3.4	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. gekoppelter Phänomene
1.3.5	Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Felsmechanik
<i>1.4</i>	<i>Erstellung Bericht Geosynthese</i>
2	Beurteilung der Sicherheit
2.1	Methodik der Sicherheitsanalyse
2.1.1	Methodik
2.1.2	Ableitung von Mindestanforderungen für ausgewählte Elemente des Barrierensystems
2.1.3	Biosphärenmodellierung
2.2	Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit
2.3	<i>Erstellung Bericht Langzeitsicherheit</i>
2.4	<i>Analyse der Betriebssicherheit</i>

Nr.	Thema
3	Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen
3.1	Abfallinventar und Abfalllogistik
3.2	Glaskorrosion
3.3	Verhalten der abgebrannten Brennelemente
3.4	Abfallkonditionierung
3.5	Abklärungen zur Gasbildung
4	Barrieren- und Lagerkonzepte
4.1	Konzepte für die technischen Barrieren
4.1.1	Bentonithaltige Verfüllmaterialien
4.1.2	Zementhaltige Verfüllmaterialien
4.1.3	BE- / HAA-Endlagerbehälter
4.1.4	<i>LMA- / SMA-Endlagerbehälter</i>
4.1.5	Versiegelung und Verschluss
4.2	Prozessverständnis im Nahfeld
4.2.1	Geochemische Immobilisierung und Retardierung
4.2.2	Gekoppelte Phänomene im Nahfeld
4.3	Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit
4.3.1	Monitoring
4.3.2	Rückholung
4.4	Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe
4.4.1	<i>Generische Module (inkl. Bauverfahren)</i>
4.4.2	<i>Anpassung an standortspezifische Gegebenheiten</i>
5	Weitere Aspekte
5.1	Das Management-System der Nagra
5.2	Weitere organisatorische Aspekte
6	<i>Information</i>

4 Umsetzung der Empfehlungen

Nachfolgend wird zusammenfassend dargestellt, wie die Empfehlungen zu den verschiedenen Themen umgesetzt werden. Dazu wird die in Tab. 3-1 aufgeführte Gliederung der Themen verwendet (Themenbereich gemäss Tab. 3-1 jeweils in Klammern im Titel). Die zusammenfassende Darstellung der Arbeiten in den nachfolgenden Abschnitten ist teilweise etwas breiter, als die spezifischen Diskussionen zu den Hinweisen und Empfehlungen in Anhang 1, um den Kontext besser sichtbar zu machen. Kap. 4 wird ergänzt durch eine zusammenfassende Diskussion der zeitlichen Aspekte bei der Abwicklung der erwähnten Tätigkeiten in Kap. 5.

4.1 Geologische Untersuchungen (Themenbereich 1)

4.1.1 Standortuntersuchungen (Themenbereich 1.1)

Standortuntersuchungen von der Oberfläche (Themenbereich 1.1.1)

Bezüglich der allfälligen Weiterführung der Standortuntersuchungen im Zürcher Weinland gibt es insgesamt 15 Empfehlungen (HSK: 8, KNE: 4, KSA: 1, NEA-IRT: 2). Diese betreffen weitere Untersuchungen von der Oberfläche (Bohrungen) und in späteren Phasen von Untertag sowie deren Interpretation. Die dazu notwendigen Arbeiten sind in der Planung der Nagra enthalten. Das Vorgehen lässt sich wie folgt zusammenfassen. Falls im Sachplanverfahren in Etappe 3 entschieden wird, den Standort Zürcher Weinland weiterzuverfolgen, werden im Rahmen der Standortcharakterisierung in Etappe 3 des Sachplanverfahrens weitere Arbeiten von der Oberfläche durchgeführt im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch bzw. als ergänzende Untersuchungen vor Beginn des Baus des Felslabors. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Vertiefte Charakterisierung der Rahmengesteine (inkl. Wedelsandstein, Sandsteinkeuper):* Mit weiteren Bohrungen sollen die Rahmengesteine detaillierter untersucht werden, um ihre Transporteigenschaften detaillierter zu erfassen. Dazu gehört auch die Untersuchung der kleinräumigen Variabilität der Transporteigenschaften. Im Hinblick auf die bautechnische Planung des Zugangstunnels (Rampe) bzw. des Schachts werden auch die Eigenschaften der Nebengesteine (inkl. Aquifere) sowie der oberen Rahmengesteine detaillierter erfasst.
- *Weitere Untersuchungen des Opalinustons (Hydrogeologie, Felsmechanik, thermische Eigenschaften) zur Bestätigung der bisher ermittelten Gesteins- und Gebirgseigenschaften und zur detaillierteren Abschätzung der lateralen Variabilität der Wirtgesteinsparameter:* Neben der Erfassung zusätzlicher Daten wird auch eine Vertiefung des Verständnisses verschiedener Einflussgrössen auf wichtige Parameter angestrebt (z.B. Einfluss der lithologischen Beschaffenheit auf das mechanische Verhalten). Mit abgelenkten Bohrungen können allenfalls vorhandene, steilstehende Störungszonen erfasst und charakterisiert werden und, falls nötig, der notwendige Sicherheitsabstand zu auslegungsbestimmenden Störungen detaillierter abgeklärt werden.
- *Erweiterung des Datensatzes bezüglich Zustandsparameter in den verschiedenen Gesteinschichten (hydraulische Druckhöhen, Spannungsfeld, natürliche Gasführung, Sättigungszustand, Porenwasserchemie):* Mit neuen (teilweise auch abgelenkten) Bohrungen werden zusätzliche Daten, verteilt über den Standort, erhoben. Dazu gehören auch spezielle Tiefenpiezometerbohrungen.

- *Erfassung des Ist-Zustands*: Wie bei Feldkampagnen üblich und im Hinblick auf den Bau des Felslabors und dessen Erschliessung sind Nullmessungen für die Beweissicherung notwendig, und es ist ein entsprechendes Monitoringprogramm vorgesehen (vgl. Themenbereich 4.3.1).
- *Standortbezogene Untersuchung der glazialen Tiefenerosion (geplante Bohrung in übertiefter Felsrinne – so weit notwendig)*: Die detaillierten Kernanalysen der erbohrten Sedimente in übertieften Felsrinnen im Umfeld zukünftiger Standorte sollen belastbare Daten zur Talgeschichte liefern. Daraus werden vertiefte Erkenntnisse zur glazialen Tiefenerosion erwartet. Die Evaluation von Untersuchungsmethoden (z.B. Datierungsmethoden) und der weitere Aufbau von Erfahrung erfolgt vorgängig durch Beteiligung an Untersuchungen in Fremdbohrungen, z.B. in der Forschungsbohrung Wehntal (vgl. auch Themenbereich 1.2.1).

Neben den von der Nagra durchgeführten Standortuntersuchungen wird die Nagra sich auch an Untersuchungen Dritter beteiligen, so weit sie einen relevanten Beitrag zu den oben aufgeführten Themen liefern. Die Resultate der Standortuntersuchungen fliessen zusammen mit den Erkenntnissen aus den weiteren geologisch orientierten Themenbereichen in die geologische Synthese ein, welche als Grundlage für die Anlagenplanung und die Sicherheitsanalyse für das Rahmenbewilligungsgesuch dient.

4.1.2 Regionale geologische Untersuchungen (Themenbereich 1.2)

Langzeitentwicklung und Langzeitstabilität (Themenbereich 1.2.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 14 Empfehlungen (HSK: 6, KNE: 6, KSA: 2). Diese betreffen insbesondere die Neotektonik und die glaziale Tiefenerosion und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen: Verfolgung der allgemeinen wissenschaftlichen Entwicklung und Vertiefung der geologischen Kenntnisse bezüglich regionaler Geologie, regionaler Tektonik und Neotektonik sowie bezüglich glazialer Tiefenerosion. Die Resultate werden vor allem für die Rahmenbewilligungsgesuche für das HAA- und das SMA-Lager verwendet, fliessen aber auch in das Standortwahlverfahren gemäss Sachplan (SGT; BFE 2008) ein. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Ergänzung der Datenbasis und Vertiefung des Verständnisses bezüglich Geodynamik und Neotektonik*: Dazu werden periodisch GPS-Messungen (vgl. Wiget et al. 2007) und Präzisionsnivelements (vgl. Schlatter 2007, Zippelt & Dierks 2007) durchgeführt, und die Beobachtung der Seismizität mit periodischer Auswertung der erhobenen Daten (Jahresberichte des Schweizerischen Erdbebendienstes) wird weiter geführt. Zusätzlich wird dem Erhalt der wissenschaftlichen Kontakte zu entsprechenden Kompetenzzentren (swisstopo, Schweizerischer Erdbebendienst, Universitäten, entsprechende Organisationen auf deutscher Seite) zur Diskussion der Resultate ein grosser Stellenwert beigemessen. Weiter ist vorgesehen, das Verständnis der geologischen Langzeitentwicklung der betroffenen Gebiete mit neu entwickelten numerischen Gebirgsbildungsmodellen zu verbessern.
- *Weiterentwicklung der Beckenmodellierung als Evidenz der Versenkungs- und Hebungsgeschichte der Nordschweiz (vgl. Mazurek et al. 2006)*: Sobald bedeutende neue Daten verfügbar sind (z.B. aus Untersuchungen Dritter oder eigenen Messungen in zukünftigen Tiefbohrungen), ist eine Aktualisierung der Beckenmodellierung vorgesehen.
- *Verbesserung des Verständnisses der geologisch-tektonischen Entwicklung des Hegau-Bodensee-Grabens*: Dazu ist eine umfassende Literaturstudie in Bearbeitung, welche auch

die neuesten geodätischen Daten und die Ergebnisse aus der Überwachung der Seismizität in diesem Gebiet berücksichtigt. Dieses Thema wird nur vertieft, falls im Rahmen des Sachplanverfahrens Standortgebiete bzw. Standorte in der Umgebung des Hegau-Bodensee-Grabens für die weitere Bearbeitung gewählt werden.

- *Vertiefte Abklärung der Möglichkeit der Bruchbildung bei seismisch aktiven Störungszonen:* Die Frage der Bruchbildung in und in der direkten Umgebung von seismisch aktiven Störungszonen wird durch das Studium der einschlägigen Literatur aus seismisch aktiven Gebieten sowie durch den Beizug von nationalen und internationalen Experten weiter abgeklärt. Dazu gehört auch die Frage des notwendigen Sicherheitsabstands zu regionalen Störungszonen (vgl. auch Themenbereich 2.1.2).
- *Vertiefung des Prozessverständnisses der Glazialgeschichte des Alpenvorlands:* Dies umfasst insbesondere eine breit angelegte Literaturstudie zur glazialen Tiefenerosion im Rahmen eines Post-Doc-Projekts der Universitäten Zürich und Bern (Entwicklungsgeschichte von übertieften Felsrinnen, Erosionsmodelle). Weiter beteiligt sich die Nagra an Forschungsarbeiten Dritter zur Entwicklung neuer Datierungsmethoden in quartären Sedimenten und zur Kenntnis der Talbildungsgeschichte im Laufe der verschiedenen Eiszeiten (z.B. Beteiligung an der Forschungsbohrung Wehntal). Die neuen Datierungsmethoden sollen – falls entsprechende Fortschritte erzielt werden – auch zur verfeinerten Datierung von Schotterterrassen verwendet werden. Nach der Standortfestlegung sind eventuell Bohrungen in allenfalls vorhandene übertiefte Felsrinnen im Umfeld der Standorte notwendig (vgl. auch Themenbereich 1.1.1).
- *Erstellung eines digitalen Höhenmodells der Felsoberfläche (Basis Quartär):* Dieses dient als Grundlage für das allgemeine Verständnis der glazialen Tiefenerosion sowie als Basis für die Identifizierung und Bewertung möglicher geologischer Standortgebiete (Jordan 2007).

Allgemeine Geologie (Themenbereich 1.2.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 4 Empfehlungen (HSK: 2, KNE: 1, KSA: 1). Diese betreffen lithologische Variationen im Opalinuston sowie die Paläotemperaturgeschichte und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen: Vorbehaltlich der Zustimmung zur Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Sachplanverfahren, werden die generellen (inkl. regionalen) Arbeiten für den Opalinuston weitergeführt. Die Arbeiten umfassen die Auswertung von Daten aus Untersuchungen Dritter (inkl. Beteiligung an Untersuchungen Dritter, so weit sinnvoll), Modellierungsarbeiten und eine Analyse der wissenschaftlichen Fortschritte im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Erweiterung der Datenbasis bezüglich lateraler Veränderungen der sedimentären Fazies des Opalinustons:* Dies erfolgt durch die Auswertung von Daten aus Untersuchungen Dritter sowie durch eine vertiefte Auswertung des Bohrkernmaterials und der bohrlochgeophysikalischen Logs der Nagra-Tiefbohrungen im Hinblick auf die sedimentologische Entwicklung und die regionale Korrelation der Sedimentationszyklen.
- *Verfolgung der methodischen Entwicklung bezüglich Analyse der Paläotemperaturen im Opalinuston und Erweiterung der Datenbasis:* Die bisherigen Arbeiten bestätigen die im Entsorgungsnachweis gemachten Aussagen (Mazurek et al. 2006). Für die nächste umfangreiche geologische Synthese (Rahmenbewilligungsgesuch) wird geprüft, ob eine Aktualisierung angebracht ist (Berücksichtigung neuer Daten). Der Einfluss erhöhter Temperaturen auf Tongesteine wird auch im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit weiterverfolgt (vgl. Themenbereich 1.3.4).

4.1.3 Vertiefung Prozessverständnis Wirtgestein (Themenbereich 1.3)

Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Transportmechanismen (Themenbereich 1.3.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 8 Empfehlungen (HSK: 4, KNE: 3, NEA-IRT: 1). Diese betreffen insbesondere die Porenwasserchemie sowie die Profile natürlicher Tracer (Wasserinhaltsstoffe) und umfassen Arbeiten, die teilweise schon abgeschlossen, im Gange oder die in der Planung enthalten sind (vgl. auch die Diskussion zu Themenbereich 4.2.1). Auf verschiedenen Ebenen (Felduntersuchungen, Versuche in Felslabors, Laborexperimente und Modellierung) werden Transportprozesse und die geochemischen In-situ-Verhältnisse im Opalinuston untersucht. Diese Arbeiten werden im Rahmen internationaler und nationaler Forschungsprojekte oder in bilateraler Zusammenarbeit mit verschiedenen in- und ausländischen Partnern vor allem im Hinblick auf die Rahmenbewilligungsgesuche für das SMA- bzw. das HAA-Lager durchgeführt unter dem Vorbehalt, dass der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Rahmen des Sachplanverfahrens zugestimmt wird. Die Arbeiten zu den verschiedenen Prozessen werden nach Einreichung des Rahmenbewilligungsgesuchs im Hinblick auf die weiteren Bewilligungsschritte stufengerecht vertieft (inkl. Untersuchungen im standortspezifischen Felslabor).

Bezogen auf die Behördenkommentare zum Entsorgungsnachweis werden die folgenden Fragen vertieft untersucht:

- *Vertiefte Analyse von Profilen natürlicher Tracer:* Die Auswertung von gemessenen Profilen natürlicher Tracer (Bohrung Benken, Mont Terri und Mont Russelin) wurde anhand von Sensitivitätsanalysen hinsichtlich unterschiedlicher Randbedingungen für Sauerstoff-, Wasserstoff-, und Chlorisotope sowie Chloridkonzentrationen (vgl. Gimmi & Waber 2004, Gimmi et al. 2007) vertieft. Für die in der Bohrung Benken beobachteten Profile bestätigen die Sensitivitätsanalysen, dass Diffusion im Opalinuston der massgebliche Transportprozess ist, und dass mit den einfachsten Annahmen betreffend Anfangs- und Randbedingungen das gemessene Profil am besten modelliert werden kann.

Die Nagra ist am Projekt CLAYTRAC beteiligt, welches von der Universität Bern (Federführung und Berichterstattung) im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem OECD/NEA-Clay-Club durchgeführt wurde. Die Auswertung der verschiedenen gemessenen Profile natürlicher Tracer in verschiedenen Tongesteinsformationen erfolgt im Hinblick auf eine vertiefte Evaluation des gegenwärtigen Verständnisses des Transports gelöster Stoffe in dichten Tongesteinen. Die Ergebnisse des CLAYTRAC-Projekts werden Ende 2008 in einem umfassenden Bericht publiziert (Mazurek et al. 2008). Erste Ergebnisse wurden bereits am 12. Water Rock Interaction Symposium (Mazurek et al. 2007a) und an der Clay Conference in Lille (vgl. ANDRA 2007) als Abstract veröffentlicht (Mazurek et al. 2007b).

- *Verbesserte Erfassung der Diffusionseigenschaften:* Das Verständnis der Diffusionsprozesse im Opalinuston (v.a. Anisotropieeffekte, Anionenausschluss, Diffusion von Kationen) konnte sowohl mit neueren Resultaten in Feldversuchen im Felslabor Mont Terri (Versuche DI-A⁷ und DI-B⁸, DR⁹) als auch durch zahlreiche zusätzliche Laborexperimente am PSI vertieft werden (Wersin et al. 2004 und 2008, Van Loon et al. 2003, 2004, 2005a, b). Im Felslabor Mont Terri sind weitere Diffusionsversuche geplant (Versuch DR-A¹⁰), die evtl. als Langzeitversuche ausgelegt werden.

⁷ DI-A: Long-Term Diffusion Experiment (Versuch im Felslabor Mont Terri).

⁸ DI-B: Hydrogeochemistry and transport mechanisms (Versuch im Felslabor Mont Terri).

⁹ DR: Radionuclide Diffusion and Retention Experiment (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹⁰ DR-A: Disturbances, Diffusion and Retention (Versuch im Felslabor Mont Terri).

- *Verbesserung der Kenntnisse der Porenwasserchemie (Redox-Potenzial, pCO_2):* Von den Redox-aktiven Elementen Mn, Fe, S scheinen nur Eisen und Schwefel in genügend grossen Konzentrationen vorhanden zu sein, um das Redox-Gleichgewicht zu bestimmen. Auch wenn die abiotische Oxidation des Pyrits relativ gut belegt ist, bleibt die abiotische Reduktion des Sulfats fraglich. Da aber im Gegensatz zu Laborexperimenten bei einem geologischen Tiefenlager sehr lange Zeiträume zur Verfügung stehen, kann die abiotische Reduktion von Sulfat zu Sulfid nicht vollständig ausgeschlossen werden. Deshalb sind weitere Untersuchungen und Modellierungsarbeiten innerhalb des bestehenden Mont Terri Versuchs GD¹¹ geplant, um das Redox-Potenzial und die Redox-Gleichgewichte besser beschreiben zu können.

Zur genaueren Bestimmung der wichtigen Porenwasserparameter werden seit dem Entsorgungsnachweis die Untersuchungsmethoden (z.B. Bohren mit chemisch inerten Gasen wie Stickstoff oder Argon zur Vermeidung von Oxidationsreaktionen, Sterilisation von Bohrwerkzeugen und Testapparaturen zur Vermeidung von mikrobiologischen Störeffekten, Untersuchungen an Porenwässern von Bohrkernen) im Felslabor Mont Terri laufend verbessert (Versuche PC¹² und PC-C¹³). Dadurch konnten die Ungewissheiten betreffend Redox-Potenzial (Eh) und pH-Wert (resp. pCO_2) signifikant reduziert werden.

Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Gastransport / Gasfreisetzung

(Themenbereich 1.3.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 8 Empfehlungen (HSK: 6, KSA: 1, NEA-IRT: 1). Diese Empfehlungen betreffen die phänomenologischen und experimentellen Datengrundlagen zum Wasser- und insbesondere zum Gastransport sowie die Modelle zur Simulation von Gastransportvorgängen im Opalinuston. In den Gutachten und Stellungnahmen wird auch mehrfach die Bedeutung von gekoppelten hydromechanischen und hydrochemischen Prozessen (gasinduzierte Mikrorissbildung, Selbstabdichtung durch hydrochemische Interaktionen) erwähnt.

Mit weiterführenden Arbeiten zum Gastransport im Opalinuston wurde teilweise schon begonnen (Marschall et al. 2005, Croisé et al. 2006, Nagra 2004, 2008b) oder sie sind geplant. Die Resultate und Erkenntnisse sollen einerseits in die provisorischen Sicherheitsanalysen für die verschiedenen Standorte für Etappe 2 des Sachplanverfahrens einfließen und werden andererseits vor allem für die Rahmenbewilligungsgesuche verwendet. Die Frage des Gastransports wird auch später bei den Standortuntersuchungen weiter bearbeitet (inkl. Gasversuche im standortspezifischen Felslabor). Die nachfolgenden Ausführungen gelten mit dem Vorbehalt, dass der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Rahmen des Sachplanverfahrens zugestimmt wird. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung und Verbesserung des Prozessverständnisses des Gastransports:* Dies erfolgt durch In-situ-Versuche in Felslabors, Laborexperimente und Modellentwicklungen sowohl für die "intakte Matrix" als auch für "Kluftnetzwerke" (Auflockerungszone und tektonische Störungen). Die Arbeiten werden grösstenteils in enger Zusammenarbeit mit anderen

¹¹ GD: Analysis of Geochemical Data (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹² PC: Porewater Chemistry Experiment (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹³ PC-C: Gas Porewater Equilibrium (Versuch im Felslabor Mont Terri).

Projektpartnern (z.B. ANDRA, BGR, ENRESA, GRS, IRSN, NWMO¹⁴) durchgeführt. Zu erwähnen sind hierbei insbesondere die In-situ-Versuche im Felslabor Mont Terri (HG-A¹⁵, HG-C¹⁶, HT¹⁷, VE¹⁸), die eine wichtige Rolle spielen bei der Überprüfung der Modellkonzepte zur Gasfreisetzung. Zum Zweck der Qualitätssicherung werden in verschiedenen qualifizierten Labors (z.B. Universität Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spanien; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Aachen, Deutschland; British Geological Survey (BGS), Nottingham, Grossbritannien) vergleichende Gaspermeabilitätstests an Kernmaterial aus dem Felslabor Mont Terri durchgeführt.

- *Erweiterung und Verbesserung der Datenbasis zur Modellierung der Gasfreisetzung:* Neben den laufenden Versuchen im Felslabor Mont Terri (HA¹⁹, VE, HG-A, HG-C) sowie einem geplanten neuen Versuch im 7. Rahmenprogramm der EU (FORGE²⁰) wird seit Jahren ein intensiver Austausch mit anderen geowissenschaftlichen Disziplinen gepflegt (Lagerstättenkunde, CO₂-Sequestrierung); dazu wird auch mit eigenen Beiträgen an wichtigen Konferenzen teilgenommen (IFP 2003, EAGE 2008). Die Zusammenarbeit der Nagra mit Firmen aus der Öl- und Gasindustrie erleichtert den Zugang zu neuen gasbezogenen Datenquellen (z.B. Gastransport in "cap-rock" Formationen).
- *Vertiefte Analyse möglicher Veränderungen des Porenraums in Stollennähe und deren Einfluss auf die Gasfreisetzung:* Neue Schwerpunkte bilden hierbei Untersuchungen zur Auswirkung einer pH-Fahne auf den Gastransport. Im geplanten EU-Projekt FORGE werden umfangreiche Säulenversuche durchgeführt, um den Einfluss der Wechselwirkung zwischen Zementwasser und Tonmaterialien auf die Gaspermeabilität zu untersuchen. Darüber hinaus werden in Zusammenarbeit mit Lawrence Berkeley National Laboratories neue Modellwerkzeuge entwickelt (Projekt Gas-MOD), um den Einfluss hydrochemischer Interaktionen auf den Gastransport im Nahfeld (inkl. Auflockerungszone) zu simulieren (Senger et al., in prep.).
- *Vertiefte Untersuchung der Bedeutung der Heterogenität des Wirtgesteins auf die Gasfreisetzung:* Da selbst kleine räumliche Variabilitäten der hydraulischen Eigenschaften die Gasmobilität im Wirtgestein signifikant erhöhen können, wurde in Zusammenarbeit mit verschiedenen Schweizerischen Forschungseinrichtungen mit theoretischen Studien zur Skalenabhängigkeit des Gastransports (Institut für Umweltingenieurwissenschaften (IfU), ETH Zürich) sowie mit Laboruntersuchungen zur Mikrostruktur des Opalinustons (EMPA Dübendorf) begonnen.
- *Vertiefte Untersuchung des möglichen Einflusses der Gasdrucke bzw. der Gasfreisetzung auf die Transporteigenschaften des Opalinustons:* In Zusammenhang mit der Evaluation der Eignung des Opalinustons für ein SMA-Lager wurden systematische Modellrechnungen durchgeführt (Nagra 2008b). Diese Art von Studien wird weitergeführt. Sie ergänzen auch die bereits für den Entsorgungsnachweis gemachten Studien (Nagra 2002b) für das HAA-Lager.

¹⁴ ANDRA: Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Frankreich; BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland; ENRESA: Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Spanien; GRS: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Deutschland; IRSN: Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Frankreich; NWMO: Nuclear Waste Management Organisation, Kanada.

¹⁵ HG-A: Gas paths through host rocks and along seals (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹⁶ HG-C: Long-term gas migration in undisturbed argillaceous formations (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹⁷ HT: Hydrogen Transfer (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹⁸ VE: Ventilation Test (Versuch im Felslabor Mont Terri).

¹⁹ HA: Hydrogeological analyses (Versuch im Felslabor Mont Terri).

²⁰ FORGE: Fate of Repository Gases (EU-Projektvorschlag).

Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Selbstabdichtung (Themenbereich 1.3.3)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 5 Empfehlungen (alle von der KNE). Diese betreffen die Transmissivität und den Einfluss der Selbstabdichtung für bestehende und neu gebildete Diskontinuitäten als Folge natürlicher Prozesse (reaktivierte Störungszonen) oder als Folge lagerbedingter Einflüsse (Bau- und Betriebsphase). Dazu wurde schon mit Arbeiten begonnen (Bernier et al. 2007, Aranyosy et al. 2008, Blümling et al. 2008, Marschall et al. 2008) oder sie sind in der Planung enthalten. Die geplanten Arbeiten sind vor allem auf die Rahmenbewilligungsgesuche fokussiert, schon vorhandene Zwischenresultate werden zudem in Etappe 2 des Sachplanverfahrens für die provisorischen Sicherheitsanalysen verwendet. Das Thema der Selbstabdichtung wird auch in späteren Phasen noch relevant sein (inkl. Versuche im Standort-spezifischen Felslabor). Die nachfolgenden Ausführungen gelten mit dem Vorbehalt, dass der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Rahmen des Sachplanverfahrens zugestimmt wird. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Verbessertes Verständnis zur Selbstabdichtung natürlicher Störungen:* Es wurden zu dieser Problematik zusätzliche In-situ-Untersuchungen im Mont Terri Tunnel und Mont Russelin Tunnel durchgeführt; weitere Arbeiten sind geplant. Weiter werden Erfahrungen aus seismisch aktiven Gebieten als Fallbeispiele (z.B. Kalifornien) ausgewertet und das Prozessverständnis anhand von Laborexperimenten (Scherung unter unterschiedlichen Normalspannungen auf der Diskontinuität) vertieft. Zusätzlich sollen die Erkenntnisse bei der Selbstabdichtung (induzierter) Diskontinuitäten auf natürliche Systeme übertragen werden.
- *Verbessertes Verständnis zur Selbstabdichtung von (induzierten) Diskontinuitäten durch Versuche im Felslabor Mont Terri:* Untersuchungen auf unterschiedlichen Skalen (Labor und Massstab 1:1) werden sowohl unter isothermen Bedingungen (EU-Projekt SELFRAC²¹ sowie Mont Terri Versuche HG-A, HG-C und EB²²) als auch unter erhöhter Temperatur (EU-Projekt TIMODAZ²³ bzw. EU-Projektvorschlag PEBS²⁴) durchgeführt bzw. sind zurzeit in Planung. Im Versuch HG-C werden hydromechanische Untersuchungen zur Selbstabdichtung eines Hydrofracs durchgeführt. Die Modellierung dieses Versuchs ist als Benchmark im EU-Projekt FORGE vorgesehen. Die Exkavation des auf das Stollennahfeld und die technischen Barrieren fokussierten Mont Terri-Versuchs EB nach jahrelanger Aufsättigung sowie die Untersuchung der Wasserflüsse in der Auflockerungszone im Versuch HG-A werden wertvolle Informationen zur Evaluation des Selbstabdichtungsprozesses liefern, die auch als Input für die Planung des im Felslabor Mont Terri vorgesehenen 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs dienen. Dieser Versuch wird als Langzeitversuch konzipiert, der das natürliche Aufsättigungsverhalten des Nahfelds unter Berücksichtigung der Wärmeleistung, wie sie für die BE- bzw. HAA-Lagerbehälter erwartet werden, untersucht. Zusätzlich wird dabei die zeitliche Entwicklung der Auflockerungszone unter realistischen Bedingungen untersucht.
- *Vertiefte Analyse des Einflusses der Stollenventilation auf Diskontinuitäten in der Stollenwand:* Induzierte Risse und natürliche Störungen im Stollennahfeld reagieren sehr sensitiv auf Unterschiede in der relativen Luftfeuchte der ventilierten Luft. Zyklisches Öffnen und

²¹ SELFRAC: Fractures and self-healing within the excavation disturbed zone in clays (EU-Projekt und Versuch im Felslabor Mont Terri).

²² EB: Engineered Barriers (EU-Projekt und Versuch im Felslabor Mont Terri).

²³ TIMODAZ: Thermal impact on the damaged zone around a radioactive waste disposal in clay host rocks (EU-Projekt und Versuch im Felslabor Mont Terri).

²⁴ PEBS: Long-term performance of Engineered Barrier Systems (vorgeschlagenes EU-Projekt und Versuch im Felslabor Mont Terri).

Schliessen dieser Diskontinuitäten wird zurzeit am Mont Terri in einem Versuch (CD²⁵) gemessen. Zusätzlich wurden entsprechende Untersuchungen zum Prozessverständnis im Rahmen des EU-Projekts NF-PRO²⁶ für verschiedene Tonsteine in-situ in Felslabors (inkl. Weiterführung des Versuchs VE im Felslabor Mont Terri, Mayor et al. 2007) und im Labor durchgeführt.

- *Ergänzende Untersuchung der Bedeutung der Durchlässigkeit der Auflockerungszone in der Sicherheitsanalyse:* Der Einfluss von erhöhten Durchlässigkeiten der Auflockerungszone auf den Radionuklidtransport und somit die Relevanz dieser Zone für die Sicherheit der geologischen Tiefenlager wurde untersucht. Dieses Thema wird im Rahmen der Sicherheitsanalyse für das Rahmenbewilligungsgesuch weiter verfolgt.

Vertiefung des Prozessverständnisses bezüglich gekoppelter Phänomene

(Themenbereich 1.3.4)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 7 Empfehlungen (HSK: 1, KNE: 3, KSA: 1, NEA-IRT: 2). Diese betreffen insbesondere den Einfluss der Temperaturerhöhung (Wärmeintrag durch die BE- / HAA-Endlagerbehälter) und die Phase der Aufsättigung. Dazu wurde schon mit entsprechenden Arbeiten begonnen oder sie sind in der Planung enthalten (Mayor et al. 2005, 2007, Aranyosy 2008). Die Arbeiten sind vor allem auf das Rahmenbewilligungsgesuch fokussiert und werden bei Bedarf später noch weitergeführt. Zwischenresultate werden jedoch auch in die provisorischen Sicherheitsanalysen für Etappe 2 des Sachplanverfahrens einfließen. Die nachfolgenden Ausführungen gelten mit dem Vorbehalt, dass der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Rahmen des Sachplanverfahrens zugestimmt wird; andernfalls sind sie sinngemäss anzupassen. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Analyse der Wiederaufsättigung unter Berücksichtigung der erhöhten Temperaturen:* Die Untersuchung des Aufsättigungsprozesses im Verfüllmaterial und im Wirtgestein soll zunächst im Rahmen des EU-Projektvorschlags PEBS erfolgen. Die Verifikation des Prozessverständnisses ist im Rahmen des geplanten 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs unter realistischen Bedingungen am Mont Terri geplant. Beide Versuche werden durch entsprechende numerische Modellierungen begleitet.
- *Vertiefte Analyse des Einflusses der Temperaturerhöhung auf das Stollenumfeld und auf das geologische Umfeld:* Die zeitliche Änderung der thermisch induzierten Spannungen und Porendruckerhöhungen soll in Laborversuchen und In-situ-Versuchen im Felslabor Mont Terri untersucht werden, um das Prozessverständnis zu verbessern (Verhältnis thermische und hydraulische Diffusivität, Änderungen der Effektivspannungen, etc.). Das verbesserte Prozessverständnis wird in weiterführende gekoppelte Rechnungen einfließen, und es werden vertiefte numerische Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt.
- *Vertiefte Untersuchung des Einflusses der Tunnelventilation (Feuchtigkeitstransfer, Rissbildung) auf die Entwicklung des Stollenumfelds:* Die Untersuchungen wurden im Felslabor Mont Terri im VE-Versuch begonnen und im EU-Projekt NF-PRO weitergeführt (Mayor et al. 2007). Die Untersuchung des Einflusses nicht-isothermer Bedingungen auf die Entwicklung eines partiell entsättigten Nahfelds ist im Rahmen des EU-Projektvorschlags PEBS geplant. Weitere Untersuchungen sind in einem 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch (Nachbildung eines Lagerstollens und der zeitlichen Entwicklung unter realistischen Randbedingungen wie Temperaturerhöhung und natürliche Aufsättigung) vorgesehen.

²⁵ Cyclic Deformation (Versuch im Felslabor Mont Terri).

²⁶ NF-PRO: Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies (EU-Projekt).

- *Verbesserung der Datenbasis zu gekoppelten Prozessen:* Für die detaillierte Modellierung gekoppelter Prozesse gibt es bis heute nur wenige Daten. Mit den oben erwähnten In-situ-Versuchen im Felslabor Mont Terri wird die Datenbasis erheblich erweitert. Auch die weltweit laufenden THM-bezogenen Laborarbeiten an verschiedenen Tonsteinformationen, die teilweise auch in Zusammenarbeit mit der Öl- und Gasindustrie durchgeführt werden, tragen zur Vertiefung des Verständnisses bei (siehe insbesondere: IRSN, Station expérimentale de Tournemire: Untersuchungen zur Auflockerungszone und zur ungesättigten Zone; ANDRA, Laboratoire souterrain de Meuse-Haute-Marne: In-situ-Versuche zur Stabilität von Untertagebauwerken, Gastransport; SCK-CEN, HADES Underground Research Facility: PRACLAY Demonstrationsversuch zur Einlagerung hochradioaktiver Abfälle).
- *Überprüfung des Einflusses der Temperaturerhöhung auf die Mineralogie des Opalinustons:* Der Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Mineralogie des Opalinustons wird über die Analyse der Paläotemperaturen des Wirtgesteins untersucht, vgl. dazu die Ausführungen zum Themenbereich 1.2.2 (Beckenmodellierung). Die Untersuchungen zeigen, dass die erwartete Temperaturerhöhung mit den Paläotemperaturen vergleichbar, aber die Dauer der Temperaturerhöhung im Vergleich sehr kurz ist. Somit werden keine mineralogischen Veränderungen erwartet. Wie bei Themenbereich 1.2.2 erwähnt, werden neue Daten bezüglich Paläotemperaturen periodisch neu ausgewertet. Weitere Standortuntersuchungen für die Rahmenbewilligungsgesuche werden dazu auch zusätzliche Informationen bringen.

Vertiefung des Prozessverständnisses bezüglich Felsmechanik (Themenbereich 1.3.5)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt eine Empfehlung (HSK). Diese betrifft die Streubreite der felsmechanischen Parameter und umfasst Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Diese Arbeiten sind auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die spätere Realisierung der Lageranlagen fokussiert, werden aber auch in das Sachplanverfahren einfließen. Die nachfolgenden Ausführungen gelten mit dem Vorbehalt, dass der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein im Rahmen des Sachplanverfahrens zugestimmt wird. Bezogen auf die Empfehlung verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Verbesserung des Verständnisses und Erweiterung der Datenbasis durch Versuche im Felslabor Mont Terri:* Die gute Datenbasis am Mont Terri und die zurzeit laufenden In-situ-Versuche ermöglichen es, das Verständnis felsmechanischer Prozesse weiter zu verbessern und vor allem skalenabhängige Effekte zu untersuchen. Dabei ist vor allem der Mine-by-Test (MB) im Felslabor Mont Terri von grossem Wert, weil hier die gebirgsmechanischen Effekte im grossen Massstab beobachtet werden können.
- *Weiterführung der Modellierungsstudien:* Alle Arbeiten im Felslabor Mont Terri werden durch numerische Studien unterstützt, und die felsmechanischen Materialgesetze werden laufend verbessert. Zudem wird die Integration gekoppelter Prozesse in die Modellierungen laufend verbessert.
- *Erweiterung der Standortdaten:* Im Rahmen von zukünftigen Standortuntersuchungen (vgl. Themenbereich 1.1.1) im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und auf die untertägigen Standortuntersuchungen werden Bohrkerne verwendet für weitere Laboruntersuchungen. Dabei werden die methodologischen Erkenntnisse aus den Labortests an Kernen aus dem Felslabor Mont Terri einfließen. Die Standortuntersuchungen werden auch genutzt für zusätzliche Messungen des Spannungsfelds. Dabei kommen evtl. neue methodische Ansätze zum Einsatz, die zurzeit evaluiert werden (Kombination aus Messungen im Nebengestein und Modellierungen). Die Evaluation neuer Messansätze (z.B. Berechnung der Spannungen aus Logging-Daten) wird u.a. in Zusammenarbeit mit Forschergruppen aus der Erdölindustrie durchgeführt.

4.2 Beurteilung der Sicherheit (Themenbereich 2)

4.2.1 Methodik der Sicherheitsanalyse (Themenbereich 2.1)

Methodik (Themenbereich 2.1.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 10 Empfehlungen (HSK: 5, KNE: 2, KSA: 1, NEA-IRT: 2). Diese betreffen insbesondere den Umgang mit FEPs (FEP: Features, Events and Processes), die Ableitung von Rechenfällen, die Durchführung der Rechnungen für Schutzziel 2 gemäss Richtlinie HSK-R-21 bzw. Schutzkriterium 2 gemäss Entwurf der HSK-Richtlinie G03 sowie organisatorische Aspekte. Mit den diesbezüglichen Arbeiten wurde teilweise schon begonnen oder sie sind in der Planung enthalten. Die Weiterentwicklung erfolgt in erster Linie im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch; die Resultate werden aber z.T. auch im Sachplanverfahren verwendet für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung der Methodik zur Ableitung von Rechenfällen:* Zurzeit wird in einem internen Projekt die Methodik zur Ableitung von Rechenfällen geprüft als Teil einer umfassenden Überprüfung der verwendeten Methodik zur Erarbeitung des Sicherheitsnachweises. Dazu gehört die Prüfung der Notwendigkeit der Erweiterung des Spektrums der Rechenfälle²⁷. Weiter wird auch die Methodik zur Quantifizierung des Risikos überprüft (Schutzziel 2 gemäss Richtlinie HSK-R-21 (HSK & KSA 1993) bzw. Schutzkriterium 2 gemäss Entwurf der HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008)) und bei Bedarf angepasst. Ebenfalls im Rahmen der Überprüfung der generellen Methodik zur Erarbeitung des Sicherheitsnachweises wird die organisatorische Abwicklung von Sicherheitsanalysen überprüft (evtl. stärkere personelle Trennung für die Wahrnehmung von spezifischen Funktionen).
- *Überprüfung des FEP-Managements:* Es wird zurzeit geprüft, wie zukünftig die FEPs erfasst und in der Sicherheitsanalyse verwendet werden sollen; dazu gehört auch die Erfassung der Wechselwirkungen zwischen FEPs. Da der internationalen FEP-Datenbank (NEA 2006) voraussichtlich wiederum eine wichtige Rolle zukommen wird bei der Überprüfung der Vollständigkeit der projektspezifischen Datenbank, ist geplant, dass sich die Nagra auch an der nächsten Aktualisierung beteiligt. In der gegenwärtig laufenden Evaluation des FEP-Managements werden auch die Erfahrungen in anderen Programmen mit berücksichtigt (insbesondere Schweden, Finnland, Frankreich und Belgien, vgl. SKB 2006, Smith et al. 2007, ANDRA 2005, ONDRAF 2001, ONDRAF 2007) sowie die internationale Entwicklung generell auf dem Gebiet der Szenarienanalyse (NEA 2008).
- *Vertiefte Analyse des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Lager:* Die Wirksamkeit von möglichen Massnahmen gegen menschliches Eindringen werden im Hinblick auf die Rahmenbewilligungsgesuche und die nachfolgenden Projektphasen näher untersucht (inkl. Bedeutung von "Markern" und der Langzeitarchivierung, vgl. dazu auch Themenbereich 5.2). Dazu sollen beispielhaft einige denkbare Szenarien, die zu einem menschlichen Eindringen in das geologische Tiefenlager führen könnten, aufgezeigt und die Wirksamkeit von möglichen Massnahmen diskutiert werden.

In den Sicherheitsberichten für die Rahmenbewilligungsgesuche ist vorgesehen, zusätzliche Fälle bezüglich unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen zu analysieren (inkl. Fälle, bei denen z.B. die LMA-Lagerkammern unter erhöhtem Gasdruck stehen).

²⁷ Dazu gehören z.B.: kombinierte Effekte, alternative Konzeptualisierung der Transportpfade im Nahfeld, Sensitivitätsbetrachtungen zum Radionuklidtransport bei Variation der Durchlässigkeit der Bentonitbarriere und der Versiegelungsstrecken, Prüfung von Szenarien, die zu einer Freisetzung von Radionukliden in den ersten 10'000 Jahren führen könnten, Umgang mit sehr langen Zeiten (erosive Freilegung).

- *Analyse des Einflusses der Erosion nach sehr langen Zeiten:* Gemäss Entwurf der HSK-Richtlinie G03 sind für den Zeitraum nach einer Million Jahren die infolge der Erosion zunehmenden Einflüsse der Erdoberfläche auf das geologische Tiefenlager in die Betrachtungen der regionalen Auswirkungen des Lagers mit einzubeziehen. Dazu werden die vorhandenen Modelle verfeinert, und in zukünftigen Sicherheitsanalysen werden entsprechende Rechnungen durchgeführt.
- *Weiterentwicklung von probabilistischen Methoden und Codes sowie Weiterentwicklung der Instrumente für Sensitivitätsanalysen:* Die Methodik und die Codes für die probabilistische Sicherheitsanalyse werden in einem über mehrere Jahre laufenden Projekt weiterentwickelt; diese erlauben auch die Durchführung von Sensitivitätsanalysen. Mit diesem Projekt beteiligt sich die Nagra auch am EU-Projekt PAMINA²⁸.
- *Sicherstellung des aktuellen Stands von Technik und Wissenschaft für die Methodik der Sicherheitsanalyse:* Mit der laufenden aktiven Mitarbeit von Nagra-Vertretern in den relevanten internationalen Gremien bzw. Projekten (NEA Integration Group for the Safety Case of Radioactive Waste Repositories, NEA-Projekte "Safety Assessment Methodology", INTERSC (International Experiences in Safety Cases, Bericht in Vorbereitung), Handling of Timescales (NEA 2002, NEA 2004b), etc.), in EU-Projekten (PAMINA, NF-PRO, FUNMIG²⁹, etc.) und in bilateralen Projekten mit Schwesterorganisationen wird sichergestellt, dass die verwendete Methodik und die Werkzeuge (inkl. Rechencodes) für jeden Projektmeilenstein aktuell sind. Diesbezüglich beteiligen sich auch Nagra-Mitarbeiter an Reviews von Sicherheitsberichten anderer Organisationen, und die Entwürfe der Nagra-Sicherheitsberichte werden durch Experten von Schwesterorganisationen begutachtet. Weiter ist der Einsatz einer Expertengruppe für die Begleitung der Arbeiten vorgesehen.

Ableitung von Mindestanforderungen für ausgewählte Elemente des Barrierensystems (Themenbereich 2.1.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es eine Empfehlung (KSA), welche die Festlegung von Mindestanforderungen bzw. Auslegungskriterien betrifft. Zielvorgaben bzw. Mindestanforderungen sowie Vorgaben für Komponenten des Lagers werden verfeinert und überprüft. Dazu gehören z.B. die im Sicherheitsbericht zum Entsorgungsnachweis aufgeführten Zielwerte bezüglich Maximaltemperaturen im Bentonit oder Abstände zu regionalen Störungszonen (Neuhauser Störung). Zusätzlich werden Zielvorgaben für verschiedene Lagerkomponenten ausgearbeitet. Die Bearbeitung von solchen Zielvorgaben bzw. Mindestanforderungen erfolgt im Rahmen des "Requirements Managements" (vgl. Themenbereich 5.1). Diese bilden einen wichtigen Input für das Sachplanverfahren (Vorbereitung von Vorschlägen für geologische Standortegebiete für Etappe 1) und für das Rahmenbewilligungsgesuch und werden anschliessend stufengerecht weiter konkretisiert.

²⁸ PAMINA: Performance Assessment Methodologies to Guide the Development of the Safety Case (EU-Projekt).

²⁹ FUNMIG: Fundamental processes in radionuclide migration (EU-Projekt).

Biosphärenmodellierung (Themenbereich 2.1.3)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 6 Empfehlungen (HSK: 2, KSA: 2, NEA-IRT: 2). Diese betreffen konzeptuelle Annahmen, die Parameterwahl in den Biosphärenmodellen sowie organisatorische Aspekte. Es wurde schon mit diesbezüglichen Arbeiten begonnen oder sie sind in der Planung enthalten. Die Arbeiten sind auf die Erarbeitung der Unterlagen für das Rahmenbewilligungsgesuch fokussiert; Zwischenresultate werden aber auch in den provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens berücksichtigt. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Vertiefte Analyse der Auswirkungen der Geomorphologie und des Klimas:* Diese werden durch Modellszenarien berücksichtigt, denen verschiedene mögliche geomorphologische Situationen sowie verschiedene Klimaregimes zugrunde gelegt werden. Die Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Langzeitentwicklung werden durch entsprechende Wahl der Modelleigenschaften in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt. Es werden systematische Sensitivitätsanalysen bezüglich der verschiedenen Modelleigenschaften und -parameter durchgeführt. Diese Sensitivitätsanalysen liefern einen wichtigen Beitrag für die robuste Auswahl der zu betrachtenden Modellszenarien und Parametervariationen.
- *Vertiefte Analyse der Entwicklung der Radionuklidkonzentrationen in den verschiedenen Biosphärensystemen:* Dazu werden vertiefte Abklärungen und Studien durchgeführt, wobei insbesondere die Analysen unterschiedlicher Klimaregimes sowie die Sensitivität der verschiedenen Modellparameter berücksichtigt werden. Es wird zudem geprüft, ob zusätzliche experimentelle Informationen die Zweckmässigkeit und Belastbarkeit der Modellierung zukünftiger Biosphärensysteme verbessern können.
- *Einbezug des Expertenwissens über die Biosphärenmodellierung:* Das Expertenwissen an der Nagra wird laufend gefördert, indem Vertreter der Nagra aktiv in internationalen Gremien mitarbeiten (z.B. BIOPROTA: Key issues in biosphere aspects of assessment of the long-term impact of contaminant releases associated with radioactive waste management, IAEA / EMRAS: Environmental Modelling for Radiation Safety, Berichte in Vorbereitung), im bilateralen Austausch mit verschiedenen spezialisierten Institutionen stehen und die Fortschritte in der ökologischen Risikoanalyse mitverfolgen (z.B. Arbeiten der ICRP³⁰). Weiter werden für die Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch die Möglichkeiten von zusätzlichen alternativen Sicherheitsindikatoren evaluiert.

4.2.2 Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit (Themenbereich 2.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 3 Empfehlungen (HSK: 1, NEA-IRT:2). Diese betreffen die Weiter- bzw. Neuentwicklung von Rechencodes und Datensätzen und Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Diese Arbeiten werden z.T. in die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens und vor allem in die Rahmenbewilligungsgesuche einfließen. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die durchzuführenden Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Weiterentwicklung von Werkzeugen für die Sicherheitsanalyse:* Für die probabilistische Sicherheitsanalyse ist zurzeit eine Neuentwicklung eines integrierten Radionuklid-Freisetzungs- und Transportcodes in Arbeit, der sowohl für deterministische als auch für probabilistische Analysen eingesetzt werden kann. Weiter wurde die Modellierung des Übergangs zwischen den technischen Barrieren und dem Wirtgestein verbessert, um die relevanten physikalischen Prozesse besser abzubilden. Dies wurde für die LMA-Lagerkammern im

³⁰ ICRP: International Commission on Radiological Protection.

Rahmen der Neuentwicklung eines integrierten Nahfeld- und Geosphärentransportcodes berücksichtigt (Holoher et al. 2008). Für eine Nahfeld-Situation, bei der die Diffusion als Transportprozess dominiert, wurde das bestehende System der Nahfeldcodes STMAN für BE / HAA / LMA modifiziert, mit expliziter Berücksichtigung eines advektiven Wasserflusses an der Schnittstelle zwischen den technischen Barrieren und dem Wirtgestein (Nagra 2008c).

- Weiter wird für die verschiedenen Meilensteine der aktuelle Kenntnisstand aus den anderen Themenbereichen in geeigneter Form in die Rechencodes und Datensätze für die Sicherheitsanalyse eingearbeitet, damit der vorhandene Kenntnisstand in den Sicherheitsberichten adäquat abgebildet wird.

4.3 Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen (Themenbereich 3)

4.3.1 Abfallinventar und Abfalllogistik (Themenbereich 3.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 2 Empfehlungen (KSA: 1, NEA-IRT: 1). Diese betreffen die Abschätzung der Nuklidinventare sowie organisatorische Aspekte und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Zusammenfassend handelt es sich um die Inventarisierung von Brennstoff und Wiederaufarbeitungsabfällen sowie um Untersuchungen zur Einlagerungslogistik von BE und HAA in das HAA-Lager. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung des Inventars von kritischen Radionukliden:* Dies betrifft insbesondere Abfälle aus der Wiederaufarbeitung. Die Abklärungen erfolgen in Zusammenarbeit mit Partnerorganisationen, welche Abfälle gleichen Ursprungs haben.
- *Vertiefung von Fragen zur Abfalllogistik:* Unter Berücksichtigung der Charakteristika des UO_2 - und MOX-Brennstoffs (insbesondere die Nachzerfallswärme) wird in Zusammenarbeit mit den Betreibern die Beladung der Endlagerbehälter optimiert unter Berücksichtigung einer gesamtheitlichen Optimierung der Entsorgung (insbesondere Optimierung des Abbrands und des Letztkerns).

4.3.2 Glaskorrosion (Themenbereich 3.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 2 Empfehlungen (HSK: 1, NEA-IRT: 1). Diese betreffen die Weiterführung der Experimente zur Glaskorrosion und die Zusammenarbeit mit Experten im Ausland und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Die Arbeiten sind auf das Rahmenbewilligungsgesuch für das HAA-Lager fokussiert. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Weiterführung der Glaskorrosionsexperimente:* Die am PSI seit 1990 laufenden Langzeitversuche, bei denen an einem englischen und einem französischen Glastyp die Glaskorrosion in Wasser untersucht wird, werden fortgesetzt, um die Entwicklung der Auflösungsraten über möglichst lange Zeiträume verfolgen zu können (vgl. Curti 2003, Curti et al. 2006).
- *Weiterführung der Zusammenarbeit mit international anerkannten Experten:* Die Fortsetzung der Zusammenarbeit mit internationalen Experten hauptsächlich aus Frankreich und

Belgien (vgl. Van Iseghem et al. 2006) betrifft die Analyse des Einflusses der SiO₂-Senke, bewirkt durch Eisenkorrosionsprodukte und Tonminerale, und der Temperaturen auf die Glasauflösungsrate.

- *Vertiefte Evaluation des Verständnisses im Hinblick auf die Modellierung der Glasauflösung*: Die aktuellsten Resultate bezüglich Auflösungsmodellen in der Sicherheitsanalyse wurden innerhalb des EU-Projekts NF-PRO neu evaluiert (Grambow et al. 2008). Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird erneut eine Evaluation vorgenommen.

4.3.3 Verhalten der abgebrannten Brennelemente (Themenbereich 3.3)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 5 Empfehlungen (HSK: 4, KNE: 1). Diese betreffen die Kritikalität, die Eigenschaften der Hüllrohre und der Brennstoffmatrix sowie die Brennstoffauflösung und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Die Weiterentwicklung erfolgt im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch für das HAA-Lager. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Weitere Untersuchungen zur Kritikalität*: Dazu sind weitere Untersuchungen und Modellrechnungen geplant, welche insbesondere auch die Veränderungen über lange Zeiten berücksichtigen (insbesondere Einfluss der Änderung der Brennstoffgeometrie nach Behälterversagen durch Brennstoffauflösung und allfälliger Wiederausfällung).
- *Vertiefung des Verständnisses zu Veränderungen in den Brennstoffeigenschaften bis zum Ende des vollständigen Einschlusses im Endlagerbehälter*: Hierzu beteiligt sich die Nagra an internationalen Projekten (insbesondere EU-Projekte) und arbeitet mit Partnerorganisationen zusammen. Die Arbeiten betreffen vor allem die zeitliche Entwicklung der bevorzugten Freisetzung einiger wichtiger Radionuklide (Bedeutung der Diffusion der Radionuklide zu den Korngrenzen).
- *Vertiefung des Verständnisses zur Freisetzung von C-14 aus den Hüllrohren*: Dazu arbeitet die Nagra mit japanischen Organisationen zusammen, welche auch Messungen zu C-14 und dessen chemischer Form machen. Weiter sind am PSI Arbeiten angelaufen, welche die Mobilität des in den Bentonit bzw. das Wirtgestein freigesetzte C-14 in organischer Form untersuchen.
- *Verbesserung der Datengrundlagen zur bevorzugten Freisetzung ('Instant Release Fraction', IRF)*: Dazu beteiligt sich die Nagra an internationalen Projekten (insbesondere EU-Projekte) und arbeitet mit Partnerorganisationen zusammen. Weiter werden für wichtige Radionuklide und für hohe Abbrände am PSI gezielt Messungen durchgeführt.
- *Verfolgen des Stands von Wissenschaft und Technik bezüglich Verhalten der Brennelement-Hüllrohre*: Dies betrifft vor allem das Verhalten bei erhöhten Temperaturen während der Zwischenlagerung (speziell relevant für Brennelemente mit hohem Abbrand). Dieses Thema wird zusammen mit den Betreibern bearbeitet. Dieses Gebiet findet auch international ein breites Interesse, sodass diesbezüglich in den nächsten Jahren ein erheblicher Fortschritt erwartet wird, welcher durch die Nagra eng verfolgt wird.
- *Vertiefung des Verständnisses zur Brennstoffauflösung*: Dazu beteiligt sich die Nagra an EU-Projekten (MICADO³¹, NF-PRO). Weiter tragen auch die Untersuchungen in anderen Programmen zum Fortschritt bei. Diese werden von der Nagra aktiv verfolgt, teilweise auch über den Einbezug von Nagra-Mitarbeitern in deren wissenschaftlichen Review. Schliesslich werden auch die vorhandenen Synthesearbeiten benutzt (z.B. Cui et al. 2008).

³¹ MICADO: Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in a nuclear waste repository.

4.3.4 Abfallkonditionierung (Themenbereich 3.4)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es 2 Empfehlungen (KSA). Diese betreffen die Vermeidung von organischen Materialien im geologischen Tiefenlager und umfassen Arbeiten, die schon seit längerer Zeit im Gange sind (insbesondere zu den Wiederaufarbeitungsabfällen) oder die aufgenommen wurden. Dabei ist bezüglich Organika zu beachten, dass diese für die LMA nicht sehr bedeutend sind, weil gemäss heutigem Stand die LMA nur wenig Organika enthalten (Wegfall der LMA-Wiederaufarbeitungsabfälle von Sellafield Ltd. wegen Substitution durch wenige HAA-Kokillen, die erwartete Reduktion der bituminierten Abfälle von AREVA, der voraussichtliche Wegfall alphahaltiger technologischer Abfälle mit Organika von AREVA aufgrund einer Vereinbarung).

Bezüglich der Empfehlungen wird zurzeit eine Evaluation von Möglichkeiten zur Reduzierung organischer Materialien bei zukünftigen Konditionierverfahren durchgeführt, und die Bedeutung der Organika für die Langzeitsicherheit wird im Rahmen der periodischen Sicherheitsanalysen beurteilt (insbesondere bezüglich Gasbildung bzw. Mobilität der Radionuklide). Dabei tragen jedoch die Organika im LMA-Lager im Vergleich zu den Metallen nur einen kleinen Teil zur Gasbildung bei. Weiter werden die Lager so ausgelegt, dass die Gasbildung keine weitreichenden sicherheitsrelevanten Auswirkungen hat. Schliesslich ist zu beachten, dass Abfälle mit erhöhtem Anteil an Komplexbildnern (Abbauprodukte der Organika) von Abfällen mit geringem Anteil an Komplexbildnern in den Lagern räumlich getrennt werden.

4.3.5 Abklärungen zur Gasbildung (Themenbereich 3.5)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es eine Empfehlung (HSK). Diese betrifft den Einfluss der Temperatur auf die Gasbildung und umfasst Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Die Arbeiten erfolgen in erster Linie im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch; die Resultate werden aber auch im Sachplanverfahren verwendet (provisorische Sicherheitsanalysen in der Etappe 2). Bezogen auf die Empfehlung wird der Stand von Wissenschaft und Technik bezüglich Gasbildung aufgrund der Zersetzung von Organika verfolgt im Hinblick auf eine mögliche Reduktion der Ungewissheiten. Aus heutiger Sicht werden die bisher verwendeten Abbauraten für organische Materialien als eher hoch angesehen, sodass sie die Ungewissheiten abdecken; ob in Zukunft eine Reduktion der in der Sicherheitsanalyse verwendeten Abbauraten rechtfertigbar ist, bleibt noch offen. Dabei ist auch der relativ kleine Beitrag der Organika zur Gasproduktion im Vergleich zur Gasbildung aus Korrosion metallischer Materialien zu berücksichtigen. Deshalb wird Gasbildung aus Korrosion metallischer Materialien im Hinblick auf zukünftige Sicherheitsberichte erneut evaluiert.

4.4 Barrieren- und Lagerkonzepte (Themenbereich 4)

4.4.1 Konzepte für die technischen Barrieren (Themenbereich 4.1)

Bezüglich dieses allgemeinen Themenbereichs gibt es eine Empfehlung (NEA-IRT). Diese betrifft die Robustheit des Systems der technischen Barrieren. Dazu wird die Systemanalyse zur Überprüfung der Systemanforderungen (vgl. auch Requirements Management, Themenbereich 5.1) bzw. zur Sicherstellung der Robustheit weitergeführt. Dies umfasst auch Sensitivitätsanalysen zur Identifikation von Schlüssel-Ungewissheiten als Input für den Entscheid bezüglich Modifikation der Lagerauslegung bzw. zur Planung des Forschungs- und Entwicklungsprogramms.

Bentonithaltige Verfüllmaterialien (Themenbereich 4.1.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 13 Empfehlungen (HSK: 8, KNE: 1, NEA-IRT: 4). Diese betreffen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind, und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Weiterführung der Untersuchungen zur Radionuklid-Rückhaltung im Bentonit:* Kompaktierter Bentonit hat eine sehr gute Barrierenwirkung für Radionuklide auf Grund der chemischen Bedingungen, welche die Löslichkeiten von gewissen Radionukliden limitieren, und der günstigen Sorptions- und Diffusionseigenschaften. Die Umsetzung der Empfehlungen zu Untersuchungen zu diesen Rückhalteeigenschaften wird im Themenbereich 4.2.1 diskutiert.
- *Abklärungen zur Herstellung und zum Einbringen von Bentonitgranulat:* Im Rahmen der EU-Projekte EB (Mayor et al. 2005) und ESDRED³² (Plötze & Weber 2007) wurden semi-industrielle Verfahren zur Herstellung von Bentonitgranulat erfolgreich getestet. Das Einbringen von Granulat mit Hilfe von Schraubenförderern wurde im Massstab 1:1 untersucht und zeigte, dass die Lagerstollen mit der gewünschten Dichte und Homogenität verfüllt werden können. Weitere Entwicklungen sind im Rahmen des in Themenbereich 1.3 erwähnten 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs im Felslabor Mont Terri geplant.
- *Vertiefte Abklärung der Eigenschaften von Bentonitgranulat:* Untersuchungen zur Charakterisierung von Bentonitgranulat sind teils abgeschlossen, teils in Bearbeitung. Messungen der mechanischen Parameter unter nicht-isothermen Bedingungen zur Erstellung von Materialgesetzen werden an der EPF Lausanne durchgeführt. Untersuchungen zur thermischen Leitfähigkeit wurden an der ETH Zürich begonnen. Erste Studien zur Hydraulik und Quellfähigkeit von Bentonitgranulat wurden durchgeführt (Karlund et al. 2007). Weitere Arbeiten werden im Rahmen des geplanten EU-Projekts PEBS und des 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs im Felslabor Mont Terri durchgeführt.
- *Vertiefte Abklärung der Langzeitbeständigkeit von Bentonit (Temperatureinfluss):* Die Auswirkung von erhöhten Temperaturen und der Dehydrierung auf die Eigenschaften des Bentonits werden im Rahmen von Labor-Experimenten an der ETH Zürich und im Felslabor Grimsel (Weiterführung des Versuchs FEBEX-e³³) sowie im Felslabor Äspö in Schweden untersucht. Zusätzliche Laboruntersuchungen sind auch im Rahmen des geplanten 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs im Felslabor Mont Terri vorgesehen.

Der Einfluss der Temperatur auf die Porenwasserchemie und Radionuklidrückhaltung wird im Themenbereich 4.2.1 behandelt.

- *Vertiefte Abklärung der Langzeitbeständigkeit von Bentonit (Einfluss der Interaktion mit anderen Materialien):* Der Einfluss von Lagermaterialien wie Stahl bzw. Eisen und Zement auf die Eigenschaften von Bentonit wurde innerhalb des EU-Projekts NF-PRO (Johnson et al. 2008) und im Rahmen anderer internationaler Zusammenarbeit (zum Beispiel KBS-3H, vgl. Gribo et al. 2008) untersucht. Zusätzliche Experimente und Modellierungsarbeiten werden zurzeit sowohl am PSI als auch an der Universität Bern durchgeführt.
- *Vertiefte Abklärung des Gastransports im Bentonit:* Arbeiten zur Verbesserung des Verständnisses bezüglich des Einflusses des Gasdurchbruchs auf die Transport-Eigenschaften des Bentonits (kombinierter Einfluss mit Temperatur) erfolgen durch die Teilnahme an EU-Projekten (NF-PRO, FORGE). Zusätzliche Informationen liefern auch die Ergebnisse ver-

³² ESDRED: Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (EU-Projekt).

³³ FEBEX-e: Full-scale High Level Waste Engineered Barriers Experiment-Extension (Versuch im Felslabor Grimsel).

schiedener, teilweise schon abgeschlossener Versuche im Felslabor Mont Terri wie SB³⁴, HE³⁵ und EB). Darüber hinaus werden Laboruntersuchungen zum Zweiphasenfluss in granularem Bentonit durchgeführt, die auch den Transport von gelösten Stoffen einschliessen. Die Nagra nimmt zudem an der internationalen Arbeitsgruppe "EBS-Task Force" des Äspö-Projekts teil. Diese Arbeitsgruppe hat sich unter anderem zum Ziel gesetzt, Gastransportprozesse im Bentonit besser zu konzeptualisieren und modellieren (Senger & Marschall 2008).

- *Vertiefte Abklärung des Behälterabsinkens*: Neue Modellrechnungen zum Behälterabsinken im Bentonit wurden im Auftrag von SKB durchgeführt (Börgesson & Hernelind 2006). Sie zeigen deutlich, dass beim KBS-3V-Konzept (Lagerung der Behälter in vertikalen Grossbohrungen) die Behälter selbst bei geringen Bentonitdichten nur wenige Millimeter bis Zentimeter absinken können. Diese Resultate werden von der Nagra überprüft, auf das Lagerkonzept der Nagra (horizontale Lagerung der Behälter) übertragen und im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch neu beurteilt. Eine Verifikation der Modellierungsergebnisse kann voraussichtlich zumindest teilweise für isotherme Bedingungen mit den Daten des Versuchs EB im Felslabor Mont Terri (vgl. Mayor et al. 2005) erfolgen. Für nicht-isotherme Bedingungen wird eine Verifikation mit Hilfe der Daten aus dem geplanten EU-Projekt PEBS und dem 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch angestrebt.

Zementhaltige Verfüllmaterialien (Themenbereich 4.1.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es eine Empfehlung (NEA-IRT), welche die Verwendung alternativer Zemente betrifft. Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Abklärung der Einsatzmöglichkeit von Zement mit abgeschwächter Reaktivität gegenüber Tonmineralen (tieferer pH-Wert des Porenwassers)*: Die Nagra beteiligt sich innerhalb des EU-Projekts ESDRED an der Entwicklung von Portlandit-freiem Zement (Fries et al. 2007, Alonso et al. 2008). Im Felslabor Mont Terri ist ein Test mit entsprechendem Spritzbeton in Vorbereitung.
- *Vertiefung des Verständnisses der Wechselwirkung verschiedener Zemente mit dem Wirtsgestein und tonhaltigen Verfüllmaterialien*: Der im Jahr 2007 im Felslabor Mont Terri implementierte Versuch CI³⁶ dient der Untersuchung der Wechselwirkung von herkömmlichem und Portlandit-freiem Zement mit Opalinuston und Bentonit.

BE- / HAA-Endlagerbehälter (Themenbereich 4.1.3)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 10 Empfehlungen (HSK: 5, KNE: 1, KSA: 3, NEA-IRT: 1). Diese betreffen das Behältermaterial sowie die Herstellung von Behältern (inkl. Prüfmethoden) und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Die Arbeiten erfolgen in erster Linie im Hinblick auf die Erarbeitung der Unterlagen für das Rahmenbewilligungsgesuch, werden aber in späteren Phasen stufengerecht vertieft. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

³⁴ SB: Self-sealing barriers of clay-sand mixtures (Teil des EU-Projekts ESDRED und Versuch im Felslabor Mont Terri).

³⁵ HE: Heater Experiment (Versuch im Felslabor Mont Terri).

³⁶ CI: Cement Clay Interaction (Versuch im Felslabor Mont Terri).

- *Erneute Evaluation von Behältermaterialien:* Eine Gruppe unabhängiger Korrosionsspezialisten evaluiert zurzeit die verschiedenen metallischen Behältermaterialien unter den relevanten In-situ-Bedingungen und wird 2009 einen Bericht mit Empfehlungen verfassen. Das resultierende Programm und dessen Resultate werden in das Rahmenbewilligungsgesuch einfließen. In die gesamtheitliche Beurteilung bezüglich der weiter zu verfolgenden Behälterkonzepte fließt auch der Themenbereich der Gasbildung und Gasfreisetzung ein. Parallel dazu werden auch die Entwicklungen auf dem Gebiet der keramischen Werkstoffe verfolgt. Die definitive Wahl des Behältermaterials soll erst im Rahmen des nuklearen Baubewilligungsverfahrens erfolgen, um von den Erfahrungen in anderen Programmen zu profitieren. In die Evaluation der Behälterkonzepte fließen auch die Arbeiten anderer Endlagerorganisationen ein (z.B. Cu-Behälter (vgl. z.B. SKB 2008), Möglichkeiten und Entwicklungen bezüglich keramischer Materialien).
- *Re-Evaluation des Stahlbehälters:* Parallel zur Evaluation möglicher Behältermaterialien werden für das Auslegungskonzept des Stahlbehälters kritische Aspekte des Herstellungsprozesses (Schweissmethoden, Spannungsanalyse und Inspektion) bearbeitet. Weiter werden kritische Fragen zur Stahlkorrosion (Gasbildung, Lochfrass, Sulfidkorrosion, etc.) periodisch neu beurteilt. Die durch Korrosionsprodukte bedingte Zunahme des Behältervolumens und die damit verbundene Kompaktion des Bentonits werden im Rahmen der Untersuchungen des THMC-Verhaltens von Bentonit und Wirtgestein untersucht (vgl. Themenbereich 4.2.2).
- *Ableitung der Anforderungen an die mechanische Festigkeit der BE-Behälter:* Es wird auch an den Anforderungen an die mechanische Festigkeit der BE-Behälter sowie an deren Bewertung gearbeitet; dies geschieht insbesondere im Hinblick auf die im Rahmenbewilligungsgesuch aufzuführenden Behälterkonzepte. Die Festlegung der Anforderungen erfolgt im Rahmen des Requirements Management (vgl. Themenbereich 5.1).
- *Herstellung von Prototypen:* Die Abklärung bezüglich detaillierter Ziele und optimalem Zeitpunkt der Prototypenherstellung, inkl. Schweißen der Deckel erfolgt stufengerecht im Rahmen der mittelfristigen Planung; bezüglich Prototypenherstellung wird die Planung erst nach der Rahmenbewilligung im Detail festgelegt.

Versiegelung und Verschluss (Themenbereich 4.1.5)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 5 Empfehlungen (HSK: 2, KNE: 1, KSA: 2). Diese betreffen konzeptuelle Fragen (schneller Verschluss bzw. Selbstverschluss), die Konkretisierung der Konzepte sowie Materialfragen und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Diese Arbeiten sind auf die Rahmenbewilligungsgesuche ausgerichtet, werden aber in späteren Phasen stufengerecht verfeinert. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung des Versiegelungskonzepts:* Das Konzept mit einem Versiegelungssystem bestehend aus verschiedenen Komponenten wurde ursprünglich im Rahmen des Wellenberg-Programms entwickelt und für die Anwendung im HAA-Programm modifiziert. Der vorbereitende Versuch SB im reduzierten Masstab läuft zurzeit im Felslabor Mont Terri. Neben Bentonit als Versiegelungsmaterial werden auch Bentonit / Sand-Gemische bezüglich ihrer Transporteigenschaften untersucht (Gas- und Wassertransporteigenschaften). Zusätzlich wurde im Rahmen des Versuchs EZ-A³⁷ im Felslabor Mont Terri die Machbarkeit und Effektivität von künstlichen Unterbrüchen der Versiegelungszone durch Bentonit-

³⁷ EZ-A: EDZ cut-off (Versuch im Felslabor Mont Terri).

gefüllte Schlitze (Cut-offs als "O-Ring-Abdichtung") getestet. Wichtige Erkenntnisse werden auch beim Versuch HG-A im Felslabor Mont Terri erwartet (Wasserfluss durch die Auflockerungszone entlang eines Mega-Packers). Es wurden Kontakte zur Bergwerk-Industrie in Deutschland geknüpft, um Einblick in deren Untersuchungen von Strecken- und Schachtverschlüssen mit Bentonit im Salz zu erhalten.

- *Detailliertere Auslegung der Verschlussbauwerke (inkl. Ableitung von Anforderungen):* Im Rahmen des Requirements Managements werden die Anforderungen an die Festigkeit und die hydraulischen Parameter präzisiert, vgl. Themenbereich 5.1. Weitere In-situ-Daten für die Auslegung werden vom geplanten Stollenversiegelungsversuch im Felslabor Mont Terri erwartet.
- *Überprüfung der Sensitivität auf Abweichungen bei der Versiegelung:* Einerseits werden numerische Sensitivitätsanalysen zur Stabilität der Widerlager und zur axialen Durchlässigkeit von Versiegelungselement und Auflockerungszone durchgeführt, andererseits werden die Auswirkungen auf den Radionuklidtransport für unterschiedliche, auch sehr ungünstige Eigenschaften der Versiegelungsstrecken weitergehend untersucht (vgl. auch Themenbereich 2.1.2).
- *Erarbeitung eines Konzepts zum schnellen Verschluss:* Wie im Entwurf der HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008) aufgeführt, sind technische und betriebliche Vorkehrungen zu treffen, um die Einlagerungsbereiche des Tiefenlagers während Betriebs- und Beobachtungsphase rasch in einen passiv sicheren Zustand überführen zu können. Dazu wird im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch ein entsprechendes Konzept ausgearbeitet, welches in den nachfolgenden Phasen stufengerecht verfeinert wird. In einem ersten Schritt wird mit den Behörden geklärt, welche Anforderungen an einen "raschen Verschluss" zu stellen sind.

4.4.2 Prozessverständnis im Nahfeld (Themenbereich 4.2)

Geochemische Immobilisierung und Retardierung (Themenbereich 4.2.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 24 Empfehlungen (HSK: 10, KNE: 8, KSA: 1, NEA-IRT: 5). Diese betreffen die Sorption und Löslichkeit wichtiger Nuklide sowie diesbezügliche Grundlagen (z.B. Speziation) und umfassen Arbeiten, mit denen teilweise schon begonnen wurde oder die in der Planung enthalten sind. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Weiterentwicklung der thermodynamischen Datenbank:* Eine wichtige Grundlage für die Bestimmung von maximalen Löslichkeiten und der Speziation von Radioelementen im Porenwasser ist die thermodynamische Modellierung. Die entsprechende Nagra / PSI-Datenbank (Hummel et al. 2002) wird für das Rahmenbewilligungsgesuch aufdatiert und insbesondere unter Berücksichtigung höherer pH-Werte (Zement) und erhöhter Temperaturen verbessert. Diese Datenbank stützt sich auch auf die im TDB-Projekt der NEA evaluierten Daten (NEA 2005) ab. Die Nagra wird dieses Projekt weiterhin fördern, und die Wissenschaftler des LES / PSI werden im Projekt mitarbeiten. Die Arbeiten an den thermodynamischen Datenbanken umfassen auch die Beurteilung der Rolle, welche die Bildung von Mischphasen (Solid Solutions) spielt.
- *Vertiefte Abklärung des Einflusses erhöhter Temperaturen auf den Chemismus des Porenwassers und die Radionuklidrückhaltung:* Dazu wird im Rahmen von Modellierungsstudien der Einfluss der Temperatur auf das Porenwasser und vor allem auf die Löslichkeit und Sorption von Radionukliden weitergehend untersucht. Neben der Referenztemperatur von 25°C werden die langfristige In-situ-Temperatur (ca. 40°C) und zusätzlich auch die Tempe-

ratur im Falle eines hypothetischen initialen Behälterdefekts (90°C) betrachtet. Die Resultate der Analyse der Ungewissheiten werden in den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

- *Vertiefung des Verständnisses der geochemisch bedingten Radionuklidretention im Opalinuston, Bentonit und Zement:* Die Radionuklidretention wird in der Sicherheitsanalyse über Löslichkeitslimiten und Sorptionswerten quantitativ berücksichtigt. Für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens und im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden die Löslichkeitslimiten und Sorptionswerte in Zusammenarbeit mit dem LES / PSI neu evaluiert und die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse (inkl. der Resultate aus den Untersuchungen am PSI, siehe weiter unten) berücksichtigt. Dazu sind in Bezug auf den Opalinuston auch die Hinweise und Empfehlungen zu Themenbereich 1.3.1 zu beachten.
- *Erarbeitung neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse:* Die Erarbeitung neuer Erkenntnisse für den Opalinuston, Bentonit und Zement werden mit verschiedenen Untersuchungsmethoden gewonnen. Dazu gehören Messungen der Sorption in wässrigen Suspensionen (z.B. Bradbury & Baeyens 2005a, Bradbury & Baeyens 2005b), Diffusionsmessungen im Labor und im Felslabor Mont Terri (Wersin et al. 2008), Spektroskopie (z.B. Bonhoure et al. 2006, Dähn et al. 2006, Rabung et al. 2005), thermodynamische Modellierung und Modellierung auf molekularer Ebene (z.B. Kosakowski et al. 2008).
- *Vertiefung des mechanistischen Verständnisses und Quantifizierung der Radionuklid-Sorption:* Die Arbeiten über die Vertiefung des mechanistischen Verständnisses und die Quantifizierung der Radionuklid-Sorption im Zement (z.B. Tits et al. 2006a, Tits et al. 2006b, Wieland et al. 2008), in Tonsystemen (Bentonit und Opalinuston, vgl. z.B. Bradbury & Baeyens 2005c, Bradbury & Baeyens 2006b, Gautschi et al. 2004) werden fortgesetzt. Einen Schwerpunkt bildet die Abklärung des Sorptionsverhaltens von Redox-sensitiven Elementen in Abhängigkeit ihres Redox-Zustands, welche innerhalb des EU-Projekts ReCosy³⁸ durchgeführt wird, und die Abklärung der Redox-Verhältnisse in Zement sowie ihre Abhängigkeit vom Fe(II) / Fe(III)-Redox-Paar. Der Einfluss von Komplexbildnern, insbesondere Karbonat, auf die Radionuklid-Retention wird innerhalb der EU-Projekte NF-PRO (Marques et al. 2008) und FUNMIG (Bradbury & Baeyens 2006c) abgeklärt. Dagegen hat die Untersuchung der Komplexbildner, die durch die Degradation von Zellulose neben Isosaccharinsäure entstehen und eine Affinität zu weichen Kationen wie Nickel (II) haben, zweite Priorität, da ihre Bedeutung für die Sicherheit weniger gross ist; der Gehalt an sicherheitsrelevanten Nukliden ist in Abfällen mit höherem Gehalt an Organika vergleichsweise klein.
- *Vertiefung des Verständnisses des Transports im Porenraum von Tonsystemen:* Die Verbesserung des Verständnisses über den Transport im Porenraum von Tonsystemen (Bentonit und Opalinuston) bleibt Schwerpunkt der PSI / Nagra-Forschung (im Labor und im Felslabor). Diese Arbeiten erfolgen teilweise in internationaler Zusammenarbeit (z.B. EU-Projekt FUNMIG) oder werden durch Arbeiten anderer internationaler Institutionen unterstützt. Die Frage nach der Abhängigkeit der Teilchen-Diffusion von der Ladung (An- und Kationen) und von der Grösse (Organika) soll weiter abgeklärt (Van Loon et al. 2007) und mit natürlichen Profilen in Tonformationen verglichen werden (s. auch Themenbereich 1.3.1). Die Kenntnisse bzw. die Konsistenz von Sorptionsmessungen für Radionuklide in wässrigen Suspensionen mit den Resultaten aus Diffusionsexperimenten (Van Loon et al. 2005b) sowie über die Abhängigkeit scheinbarer Diffusionskoeffizienten von der Porenwasserchemie (Glaus et al. 2007) werden weiter verbessert.

³⁸ ReCosy: Investigations of Redox Controlling systems (EU-Projekt).

- *Vertiefung des Verständnisses bezüglich Löslichkeit wichtiger Isotope:* Die Untersuchungen zur Löslichkeit wichtiger Isotope wird weitergeführt. Dazu gehört die Evaluation thermodynamischer Konstanten in Zusammenarbeit mit anderen Organisationen sowie Abklärungen bezüglich der Bildung von Mischphasen.

Gekoppelte Phänomene im Nahfeld (Themenbereich 4.2.2)

Zu gekoppelten Phänomenen im Nahfeld gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen, die im vorliegenden Bericht im Rahmen anderer Themenbereiche behandelt werden (1.3.2, 1.3.3, 1.3.4, 4.1.1, 4.1.5). Die Arbeiten zu diesem Themenbereich verfolgen aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung und Verbesserung des Verständnisses bezüglich der Entwicklung des Nahfelds eines BE / HAA-Lagersystems in der frühen Nachverschlussphase (THMC-Prozesse im Bentonit während der Aufsättigungsphase):* Grundlegende Untersuchungen hinsichtlich des Aufsättigungsprozesses des Verfüllmaterials wurden im Rahmen des EU-Projekts NF-PRO durchgeführt; im EU-Projektvorschlag PEBS sollen Modellvorhersagen zur nicht-isothermalen Wiederaufsättigung im Rahmen eines In-situ-Versuchs im Felslabor Mont Terri überprüft werden. Im Rahmen einer Dissertation an der EPF Lausanne wird zurzeit ein verbessertes THM-Materialgesetz für granularen Bentonit entwickelt (vgl. auch Themenbereich 4.1.1).
- *Überprüfung und Verbesserung des Verständnisses bezüglich der Langzeitentwicklung des Nahfelds:* Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf dem Gastransport sowie auf den hydrochemischen Interaktionen zwischen Abfallbehältern (Korrosionsprodukte, Volumenzunahme; siehe auch Themenbereich 4.1.3), Nahfeldmaterialien und Wirtgestein (BE / HAA-Lagersystem: Eisen – Bentonit, Bentonit – Wirtgestein; LMA-Lagersysteme: Zement – Wirtgestein, Zement – Sand/Bentonit). Grundlegende Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Verfüllmaterialien wurden im Rahmen des EU-Projekts NF-PRO durchgeführt. Im EU-Projekt FORGE sind Labor- und In-situ-Versuche zum Gastransport in Verfüllmaterialien (Bentonit, Zement) geplant.

4.4.3 Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit (Themenbereich 4.3)

Monitoring (Themenbereich 4.3.1)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 8 Empfehlungen (HSK: 3, KNE: 3, KSA: 2). Diese betreffen die Beweissicherung sowie das Monitoring des Lagers in seinen verschiedenen Phasen (inkl. Massnahmen bezüglich Safeguards). Dazu wurde schon mit den Arbeiten begonnen, und es kann auch auf die im Rahmen der Versuche in den verschiedenen Felslabors gesammelten Erfahrungen abgestützt werden. Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden die Arbeiten weitergeführt; für das Rahmenbewilligungsgesuch wird ein Bericht zum vorgeschlagenen Monitoringkonzept vorbereitet. Dieses Konzept wird anschliessend hinsichtlich der weiteren Bewilligungsverfahren stufengerecht verfeinert und umgesetzt, beginnend mit der Erfassung des Ist-Zustands vor Beginn der Feld- und Bauarbeiten.

Die in den nächsten Jahren zu bearbeitenden Themen betreffen:

- *Vertiefung des Konzepts für die Überwachung (Pilotlager, weitere Massnahmen):* Die repräsentative Überwachung eines geologischen Tiefenlagers mit Hilfe eines Pilotlagers sowie anhand weiterer Massnahmen wird im Rahmen des geplanten EU-Projekts MoDeRn³⁹ diskutiert und in mögliche übergeordnete Monitoringkonzepte integriert. Zusätzliche Information wird aus den Versuchen in den verschiedenen Felslabors erwartet; dabei spielt auch der geplante 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch im Felslabor Mont Terri eine wichtige Rolle. Neben direkten Messungen relevanter Parameter (z.B. Temperatur, Porendruck) werden auch die Möglichkeiten eines indirekten Monitorings (z.B. zeitabhängige seismische Tomographie) untersucht. Erste diesbezügliche Tests und Methodenentwicklungen werden zurzeit im Rahmen des EU-Projekts ESDRED im Felslabor Mont Terri (Manukyan et al. 2008) und im TEM-Projekt⁴⁰ im Felslabor Grimsel (Marelli et al. 2008) durchgeführt.
- *Vertiefung des Konzepts für die Überwachung nach Lagerverschluss von der Oberfläche:* Im Rahmen des EU-Projekts MoDeRn werden auch Konzepte für das Monitoring eines Lagers von der Oberfläche erarbeitet. Die Erkenntnisse aus diesem Projekt werden in das für das Rahmenbewilligungsgesuch zu erarbeitende Monitoringkonzept einfließen.
- *Evaluation langzeitstabiler, zuverlässiger Instrumente (inkl. Analyse der Bedeutung der Wartungs- bzw. Reparaturmöglichkeiten):* Wichtige Monitoringkomponenten (kabellose Datenübertragung, dauerhafte wartungsfreie Energiequellen) sollen im geplanten EU-Projekt MoDeRn evaluiert werden. In-situ-Versuche bezüglich Monitoringmethoden sind zurzeit schon im Felslabor Mont Terri (Versuche HG-A und MB) und im Felslabor Grimsel (Versuch TEM) im Gange. Eine Analyse der Langzeitstabilität von existierenden Sensoren und Datenübertragungssystemen soll im Rahmen einer Literaturstudie durchgeführt werden. Möglichkeiten zur Verbesserung sollen mit Herstellern diskutiert werden. Eine direkte Weiterentwicklung von Sensoren erfolgt erst, wenn absehbar ist, welche Parameter gemessen werden sollen.
- *Überprüfung der Ausgestaltung des Lagers für die Überwachung (z.B. Linienführung Zugangstunnel, Empfehlung der EKRA bezüglich unabhängiger Zugänge zum Pilotlager):* Eine Optimierung der Linienführung von Zugangsstollen bzw. die Erwägung zusätzlicher Zugänge zum Pilotlager wird aufgrund der Planung der Anlage bei der Vorbereitung des Rahmenbewilligungsgesuchs auf Stufe Konzept erfolgen und in späteren Phasen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet. Dazu sind in einem ersten Schritt die Vorgaben zu klären und mit den Behörden abzustimmen.
- *Durchführung von Nullmessungen von der Oberfläche:* Für die Feldarbeiten (vgl. Themenbereich 1.1.1) bzw. im Hinblick auf den Bau des Felslabors sind Nullmessungen an der Oberfläche vorgesehen, insbesondere für die Beweissicherung. Felduntersuchungen (Bohrungen) und vor allem Baumassnahmen an den Standorten (z.B. Schachtbau, Bau Zugangstunnel) können einen Einfluss auf Grundwasserspiegel und Potenziale der Tiefengrundwässer sowie auf die Wasserchemie haben. Ein Netz aus (z.T. tiefen) Piezometerbohrungen sowie Langzeitbeobachtungssysteme in Tiefbohrungen und die Erstellung eines Quellenkatasters sowie eine regelmässige Analyse von Wasserproben dienen der Untersuchung des ungestörten Zustands (Ist-Zustand) und erlauben die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung. Zusätzlich werden der radiologische Zustand und die meteorologischen Verhältnisse am Standort beobachtet, einerseits für die Beweissicherung und andererseits als Input für die Ausbreitungsrechnungen für die Analyse der Betriebssicherheit. Zur Ver-

³⁹ MoDeRn: Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure (EU-Projekt).

⁴⁰ TEM: Test and Evaluation of Monitoring Techniques (Versuch im Felslabor Grimsel).

meidung von Fehlinterpretationen sollen diese Messungen einen gewisse Zeit vor dem eigentlichen Beginn der Bohr- bzw. Bauarbeiten beginnen, damit natürliche Schwankungen (z.B. Variationen bedingt durch klimatische Änderungen, längere Regen- oder Trockenperioden) abgeschätzt werden können. Es wird ein ähnliches Vorgehen geplant wie am Wellenberg bei der Vorbereitung des Sondierstollens (Grundwasser- und Quellenbeobachtungen, Langzeitbeobachtungssysteme in Tiefbohrungen, Meteostation) bzw. wie z.B. beim ZWILAG (radiologische Überwachung).

Rückholung (Themenbereich 4.3.2)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 6 Empfehlungen (HSK: 5, KSA: 1). Diese betreffen einerseits die Kriterien, welche zu einer Rückholung führen können und andererseits eine vertiefte Darstellung sowohl der Abläufe und Einrichtungen zur Rückholung unter Berücksichtigung der In-situ-Bedingungen zum Zeitpunkt der Rückholung (Temperatur, radiologische Strahlung, Standsicherheit, etc.) als auch der grundsätzlichen Möglichkeiten zum Umgang mit den rückgeholten Abfällen. Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung und Vertiefung des Rückholungskonzepts:* Die Rückholung wird für das Rahmenbewilligungsgesuch in einem Rückholungskonzept dargelegt und in den anschließenden Phasen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet. Dazu gehört auch die Auslegung der Rückholungseinrichtungen auf Stufe Konzept, wobei der Zuverlässigkeit und Robustheit spezielle Beachtung geschenkt wird. Im Hinblick auf das nukleare Baubewilligungsgesuch jedoch spätestens vor Inbetriebnahme des Tiefenlagers wird die Technik der Rückholung von Abfallbinden in den Testbereichen am Standort im Rahmen eines Rückholversuchs erprobt und deren Funktionstüchtigkeit nachgewiesen.
- *Vertiefte Untersuchung und Beschreibung der Abläufe zur Rückholung bis und mit Klärung des Umgangs mit den rückgeholten Abfällen:* Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden standortunabhängige Konzepte zu den Abläufen zur Rückholung erarbeitet, soweit sie für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Dazu werden auch modellhaft mögliche Gründe und zugehörige Szenarien für die Rückholung der Abfälle dargestellt. Die Auslegung (inklusive Ableitung der Anforderungen) wird stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Management festgehalten (vgl. Themenbereich 5.1).
- *Abklärung der erwarteten Bedingungen für die Rückholung:* Es werden orientierende Abklärungen bezüglich der erwarteten In-situ-Bedingungen (Standfestigkeit untertägige Bauten, Temperaturen, Qualität der Schienen etc.) zum Zeitpunkt der Rückholung (in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Szenarien) durchgeführt. Wichtige Grundlagen und Erkenntnisse diesbezüglich sind aus der Vertiefung des Prozessverständnisses bezüglich gekoppelter Phänomene (Themenbereich 1.3.4) und Felsmechanik (Themenbereich 1.3.5) zu erwarten.

4.4.4 Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe (Themenbereich 4.4)

Bezüglich dieses Themenbereichs gibt es insgesamt 22 Empfehlungen (HSK: 12, KNE: 10). Diese betreffen in erster Linie die Auslegung, Dimensionierung und Anordnung der untertägigen Anlagenteile (Lichtraumprofil, Linienführung der Erschliessung, Dimensionierung der Tunnelgewölbe, Lüftungskonzept, etc.) unter dem Gesichtspunkt baulicher, betrieblicher und insbesondere bezüglich sicherheitsrelevanter Aspekte. Generell wird empfohlen, die Planung weiter zu vertiefen und einzelne Lagerelemente zu optimieren.

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Planung der Anlagen- und Betriebskonzepte soweit vertieft, wie dies für die Festlegung des Projekts in den Grundzügen notwendig ist. Die Planung sieht vor, standortunabhängige Projektkonzepte für die verschiedenen Anlagenelemente zu entwickeln. Die Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung (inklusive Ableitung der Anforderungen) stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten (vgl. Themenbereich 5.1). Ziel ist es, zuverlässige und robuste Lagermodule als Grundlage für die Standortevaluation zu entwickeln. Weiterführende Arbeiten (Projektierung, Dimensionierung, Spezifikation, Baumethoden) und die definitive Auslegung erfolgen auf Grundlage standortbezogener Randbedingungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei für das Rahmenbewilligungsgesuch für einzelne Elemente noch Alternativen offen gehalten werden.

Bezüglich der Hinweise und Empfehlungen verfolgen die Arbeiten aus heutiger Sicht folgende Ziele:

- *Überprüfung und Anpassung der Anlagenauslegung:* Dazu werden die möglichen variierenden standortbezogenen Randbedingungen (Tiefenlage, räumliche Ausdehnung) berücksichtigt. Dies führt zur Untersuchung von alternativen Anlagenkonfigurationen zur Ermittlung der Spielräume und zur bautechnischen Optimierung (Anordnung / Linienführung, Querschnitte / Lichtraumprofile, Art und Anzahl Zugänge und Lüftungsschächte, etc.).
- *Überprüfung und orientierende Dimensionierung der hohlraumsichernden Massnahmen:* Dazu sind insbesondere auch die langen Standzeiten für die Beobachtungsphase zu berücksichtigen, inkl. Evaluation des Unterhalts und der Erneuerungsmassnahmen.
- *Überprüfung der Bauverfahren (Vortriebskonzepte, Ausbruchsicherung):* Dies betrifft die BE- / HAA-Lagerstollen (mechanisierte Vortriebseinrichtung) und die LMA-Lagerkammern sowie die untertägigen Erschliessungsbauwerke (Zugangstunnel, Schächte). Basis dieser Untersuchungen bilden orientierende felsmechanische Berechnungen und die Untersuchung alternativer Bauverfahren (inkl. Einsatz von Spritzbeton bei den BE- / HAA-Lagerstollen).
- *Überprüfung und Optimierung der Lüftungskonzepte:* Dazu werden für die verschiedenen Phasen des Lagers (Bau-, Betriebs- und Beobachtungsphase) insbesondere die Anforderungen an die klimatischen Verhältnisse (Gesundheitsschutz), Fragen des Strahlenschutzes und der Betriebssicherheit, die Verhütung von Unfällen durch Erdgas und die Auslegung für Ereignislüftung (Brand) sowie die diversen Wärmelasten (Gebirgstemperatur, Wärmeabgabe von Baugeräten und der BE- / HAA-Endlagerbehälter) berücksichtigt.
- *Überprüfung und vertiefte Beschreibung der Abläufe (Prozesse):* Dies betrifft die Abläufe und Prozesse bei Bau, Betrieb, Überwachung, Verfüllung und Verschluss der Lageranlage und resultiert in verfeinerten Baukonzepten, Betriebskonzepten, Störfallkonzepten, Erhaltungskonzepten und Überwachungskonzepten.
- *Vertiefte Analyse der Betriebssicherheit:* Dies umfasst die Störfall- und Gefährdungsanalyse und deren Rückwirkung auf die Auslegung der Anlage und der Betriebsabläufe sowie vereinfachte Konsequenzenanalysen für ausgewählte Szenarien.
- *Modellhafte modulare Konzepte der Oberflächeninfrastruktur:* Diese Konzepte bilden die Grundlage für die Erarbeitung von standortbezogenen Konzepten zur Anordnung der Oberflächeninfrastruktur im Rahmen der Etappe 2 des Sachplanverfahrens und im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch.
- *Orientierende Abklärungen von Aspekten der Umweltverträglichkeit und der Raumplanung:* Es werden die notwendigen Grundlagen erarbeitet für die Abklärungen im Rahmen der Etappe 2 des Sachplanverfahrens sowie für die UVP Stufe 1 und die Abstimmung mit der Raumplanung für das Rahmenbewilligungsgesuch.

4.5 Weitere Aspekte (Themenbereich 5)

4.5.1 Das Management-System der Nagra (Themenbereich 5.1)

Es gibt insgesamt 7 Empfehlungen (KSA: 5, NEA-IRT: 2), die den Themenbereich des Management-Systems der Nagra betreffen. Dazu gehören die Zertifizierung des Qualitätsmanagement-Systems der Nagra, das Wissensmanagement und das Reviewsystem. Bezogen auf die Hinweise und Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis lässt sich der Stand wie folgt zusammenfassen:

- *Zertifizierung des Qualitätsmanagement-Systems der Nagra:* Die Nagra hat nach Abschluss des Entsorgungsnachweises ihr Management-System ergänzt und es als Qualitätsmanagement-System im Juni 2005 nach ISO 9001 zertifizieren lassen. Das Qualitätsmanagement-System wird laufend ergänzt; 2008 wurde das Qualitätsmanagement-System erfolgreich re-zertifiziert. Es werden regelmässig interne und externe Audits durchgeführt, welche auch die Projekte umfassen.
- *Ausbau des Qualitätsmanagement-Systems:* Das Qualitätsmanagement-System wird bei Bedarf ausgebaut. Dazu orientiert sich die Nagra an den ISO-Standards und berücksichtigt die Empfehlungen der IAEA (IAEA 2006, IAEA 2008).
- *Beizug von externen Experten:* Für verschiedene Themenbereiche werden unabhängige Expertenteams für Reviews eingesetzt (Geologie, Gasfreisetzung, Behältermaterialien). Dazu werden hochqualifizierte und anerkannte Experten aus dem In- und Ausland beigezogen. Diese ergänzen die Reviews der Berichte (Nagra-interne Qualitätskontrolle). Es ist vorgesehen, ergänzend für weitere Themenbereiche Expertenteams einzusetzen.
- *Ergänzung des Informationsmanagements:* Die Erfassung wichtiger Informationen und Daten in Datenbanken ist als Teil des Qualitätsmanagement-Systems implementiert (Projektdokumentationen, Fachdokumentationen) und wird momentan verbessert (Projekt-Informationsmanagement). Weiter enthält das Qualitätsmanagement-System das Wissensmanagement (Requirements Management, Configuration Data Management, Knowledge Management). Ein weiteres wichtiges Element des Wissensmanagements sind für die Nagra die Syntheseberichte für wichtige Meilensteine, in welchen das gegenwärtige Wissen und dessen Bedeutung evaluiert und in Form einer umfangreichen Sammlung von Referenzberichten dargestellt wird (z.B. Berichterstattung zum Entsorgungsnachweis, Berichterstattung zu den Vorschlägen von geologischen Standortgebieten für Etappe 1 des Sachplanverfahrens).

4.5.2 Weitere organisatorische Aspekte (Themenbereich 5.2)

Bezüglich organisatorischer Aspekte gibt es insgesamt 9 Empfehlungen (KNE: 2, KSA: 6, NEA-IRT: 1). Diese betreffen die Publikation von Forschungsergebnissen, die Langzeitarchivierung sowie durch die Behörden zu treffende Massnahmen (Einsetzen eines Entsorgungsrats, Verpflichtung der Entsorgungspflichtigen zur Erstellung eines Entsorgungsprogramms, Vorgaben bezüglich Umgang mit Behördenempfehlungen). Diesbezüglich ist der Stand wie folgt:

- *Abklärungen zur Langzeitarchivierung:* Das Thema der langfristigen Weitergabe von Information (Langzeitarchive) wird durch verschiedene Entsorgungsorganisationen bereits seit mehreren Jahren bearbeitet und von der Nagra verfolgt. Die Arbeiten der Nagra im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch sind in Vorbereitung und sind mit den Behörden zu koordinieren (Kontakte zu Bundesarchiv, etc.). Zu diesem Gebiet gehört auch das Thema der "Markierung" der Tiefenlager.

- *Publikation von Forschungsergebnissen:* Die Nagra macht ihre Arbeit den Behörden, der Fachwelt und dem breiten Publikum zugänglich und publiziert ihre Resultate offen. Neben der Publikation in Nagra Technischen Berichten strebt die Nagra eine möglichst breite Veröffentlichung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in Fachpublikationen an und unterstützt diesbezüglich ihre Wissenschaftler sowie ihre wissenschaftlichen Kompetenzzentren, Partner und Auftragnehmer.
- *Durch die Behörden zu treffende Massnahmen:* Verschiedene Anregungen betreffen die Behörden, welche diesbezügliche Massnahmen getroffen haben bzw. diese Anregungen zurzeit bearbeiten. Es betrifft dies das Einsetzen eines Entsorgungsrats, den Auftrag an die Entsorgungspflichtigen zur Erstellung eines Forschungs- und Entwicklungsplans bzw. eines langfristigen Arbeitsprogramms, die Regelung des Umgangs mit Behördenempfehlungen zum Entsorgungsnachweis sowie eine breite Auslegung des Standortwahlverfahrens.

5 Zeitliche Aspekte

In Kap. 4 wurden die Tätigkeiten bezüglich Empfehlungen aus den Gutachten und Stellungnahmen der Behörden und ihrer Experten zusammenfassend diskutiert und teilweise auf die zeitlichen Aspekte hingewiesen. Nachstehend werden die zeitlichen Aspekte für alle Themenbereiche zusammenfassend dargestellt. Die Rahmenbedingungen für die Festlegung der Zeiten bildet der Realisierungsplan, wie er im Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) dargestellt ist.

5.1 Geologische Untersuchungen (Themenbereich 1)

Standortuntersuchungen (Themenbereich 1.1)

- Gemäss Sachplan geologische Tiefenlager (BFE 2008) sind in Etappe 3 Standortuntersuchungen je in mindestens zwei am Schluss von Etappe 2 ausgewählten Standorten für das HAA- bzw. SMA-Lager durchzuführen⁴¹. Für den im Rahmen eines Vergleichs ausgewählten Standort müssen die Untersuchungen genügend umfangreich sein für die Vorbereitung der Rahmenbewilligungsgesuche. Gemäss Sachplan beginnt die Etappe 3 in ca. 5 Jahren, d.h. ca. 2013.
- Nach Erteilung der Rahmenbewilligung folgen die untertägigen Standortuntersuchungen (Bau des Felslabors). Dazu sind ergänzende Untersuchungen von der Oberfläche vorzunehmen. Gemäss Realisierungsplan (Nagra 2008a) wird 2018 mit einer rechtsgültigen Rahmenbewilligung gerechnet, sodass die Feldarbeiten im Hinblick auf den Bau des Felslabors nicht vor 2018 beginnen können. Vorgängig zu den Feld- bzw. Bauarbeiten ist als Teil des Monitoringprogramms (vgl. Themenbereich 4.3.1) der Ist-Zustand zu erfassen.
- Die untertägigen Untersuchungen (inkl. der Resultate aus den Versuchen im standortspezifischen Felslabor) und die ergänzenden Untersuchungen von der Oberfläche bilden die Basis für das Nukleare Baubewilligungsgesuch. Das nukleare Baubewilligungsgesuch ist gemäss Realisierungsprogramm (vgl. Entsorgungsprogramm, Nagra 2008a) für das HAA-Lager ab ca. 2035 zu erwarten. Während dem Bau des geologischen Tiefenlagers erfolgt die baubegleitende Charakterisierung, deren Resultate auch in die Unterlagen für die nukleare Betriebsbewilligung (ab ca. 2040 für das HAA-Lager, vgl. Nagra 2008a) einfließen.

Regionale geologische Untersuchungen (Themenbereich 1.2)

- Die regionalen Untersuchungen bilden eine laufende Aktivität, welche den Zeitraum bis zur nuklearen Baubewilligung und für gewisse Tätigkeiten (geodätische Messungen, Betrieb des Mikroseismik-Netzes, Verfolgen der Wissenschaft bzgl. relevanter geologischer Aspekte (Geodynamik, allgemeine Geologie, etc.)) auch noch darüber hinaus geht.
- Periodisch und insbesondere für jeden wichtigen Entscheidungspunkt (geologische Synthesen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens (zurzeit in Vorbereitung), Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015), nukleare Baubewilligung (für das HAA-Lager ab ca. 2035), etc.) werden die Erkenntnisse zur regionalen Geologie ausgewertet als Input für die geologischen Synthesen.

⁴¹ Falls die vorhandenen Unterlagen eine provisorische Sicherheitsanalyse nicht zulassen, sind schon in Etappe 2 Untersuchungen notwendig.

Vertiefung Prozessverständnis Geologie (Themenbereich 1.3)

- Die Vertiefung des Prozessverständnisses bildet für die in Kap. 4.1.3 aufgeführten Prozesse eine länger andauernde Aktivität, welche während der nächsten Jahre vor allem auf das Rahmenbewilligungsgesuch ausgerichtet ist (frühestens ca. 2015). Für die meisten Prozesse wird deren Untersuchung auch nachher noch weitergeführt. Verschiedene der Prozesse werden im Felslabor abgeklärt, wobei die Arbeiten bis zur Inbetriebnahme des standort-spezifischen Felslabors in anderen Felslabors abgewickelt werden (vgl. dazu die zusammenfassende Darstellung in Tab. A.3-7 im Entsorgungsprogramm, Nagra 2008a).
- Für die Entscheidungspunkte und Meilensteine (provisorische Sicherheitsanalysen und zugehörige geologische Synthesen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens (zurzeit in Vorbereitung), Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015), nukleares Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035), weitere nukleare Bewilligungsverfahren) wird jeweils eine Auswertung vorgenommen, deren Resultate in die Geosynthesen und Sicherheitsberichte einfließen.

5.2 Beurteilung der Sicherheit (Themenbereich 2)

Methodik der Sicherheitsanalyse (Themenbereich 2.1)

- Der aktuelle Stand der Technik bezüglich Methodik der Sicherheitsanalysen (inkl. Modellierung der Biosphäre) wird durch aktive Mitarbeit in internationalen Arbeitsgruppen und Pflege des Fachnetzwerks laufend verfolgt. Im Hinblick auf die periodisch zu erstellen- den Sicherheitsberichte werden die Methodik und die zugehörigen Werkzeuge jeweils vorgängig überprüft und bei Bedarf aktualisiert. Dies wird zurzeit im Hinblick auf die provisorischen Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens gemacht und wird anschliessend auch für das Rahmenbewilligungsgesuch und die weiteren Bewilligungsschritte jeweils wiederum notwendig sein.
- Die Ableitung von Mindestanforderungen bzw. deren Überprüfung und Aktualisierung ist eine dauernde Aufgabe, wobei für spezifische Meilensteine eine gesamthafte Auswertung erfolgt. Eine solche Auswertung ist zurzeit im Hinblick auf Etappe 2 gemäss Sachplanverfahren in Arbeit; für das Rahmenbewilligungsgesuch ist wiederum eine solche Auswertung notwendig.

Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit (Themenbereich 2.2)

- Im Hinblick auf spezifische Meilensteine (provisorische Sicherheitsanalysen für Etappe 2 des Sachplanverfahrens, Rahmenbewilligungsgesuch, spätere nukleare Bewilligungsverfahren) wird zusammen mit den Fachspezialisten für die verschiedenen Fachbereiche der aktuelle Stand des Wissens evaluiert und geprüft, ob die vorhandenen Modelle (Rechencodes) für die Abbildung des Wissens in den Sicherheitsanalysen adäquat sind; bei Bedarf werden die Rechencodes angepasst oder neue Rechencodes beschafft bzw. entwickelt. Zurzeit sind im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch Entwicklungen von Rechencodes für die probabilistische Sicherheitsanalyse im Gange.
- Weiter werden für die Meilensteine in Zusammenarbeit mit den Fachspezialisten auch die Datensätze für die Rechnungen der Sicherheitsanalyse so abgeleitet, dass sie das gegenwärtige Verständnis (inkl. Ungewissheiten) adäquat abbilden.

5.3 Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen (Themenbereich 3)

Abfallinventar und Abfalllogistik (Themenbereich 3.1)

- Die Bearbeitung der Daten und Informationen zu den radioaktiven Materialien und Abfällen ist eine laufende Arbeit in enger Zusammenarbeit mit den Abfallverursachern. Dazu gehört auch die Evaluation der Konditionierverfahren.
- Für die Entscheidungspunkte und Meilensteine (provisorische Sicherheitsanalysen in Etappe 2 des Sachplanverfahrens (in Vorbereitung), Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015), weitere nukleare Bewilligungsverfahren) wird jeweils eine Auswertung vorgenommen, deren Resultate in die Anlagenplanung und den Sicherheitsbericht einfließen.

Glaskorrosion sowie Verhalten der abgebrannten Brennelemente (Themenbereich 3.2 bzw. 3.3)

- Die Vertiefung des Verständnisses bzgl. Glaskorrosion für die verglasten hochaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sowie für wichtige Eigenschaften der UO₂- bzw. MOX-Matrix für abgebrannte Brennelemente wird weitergeführt und periodisch für wichtige Entscheidungspunkte ausgewertet. Deren Resultate fließen in die Sicherheitsberichte für die wichtigen Entscheidungspunkte ein (Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015), weitere Bewilligungsschritte).

Abfallkonditionierung (Themenbereich 3.4)

- Zurzeit läuft eine Studie zur Abklärung alternativer Konditioniermöglichkeiten im Hinblick auf die Reduktion des Gehalts an organischen Materialien in ausgewählten Abfallströmen. Wie die Erkenntnisse aus dieser Studie umgesetzt werden, kann erst bei Vorliegen der Resultate festgelegt werden. Weiter werden im Rahmen der Endlagerfähigkeitsbeurteilungen bei neuen Abfallgebindetypen die vorgeschlagenen Konditioniermethoden bezüglich der Eignung der entstehenden Abfallgebinde für die geologische Tiefenlagerung geprüft. Periodisch werden im Rahmen der Sicherheitsberichte auch die sicherheitsrelevanten Abfalleigenschaften und damit auch die verwendeten Konditionierverfahren neu beurteilt (z.B. Sicherheitsbericht für das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015)).

Abklärungen zur Gasbildung (Themenbereich 3.5)

- Zur Verbesserung der Kenntnisse zur Gasbildung (Degradation organischer Stoffe, anoxische Metallkorrosion) beteiligt sich die Nagra an Projekten zur Gasbildung (z.B. EU-Projekt FORGE) und verfolgt diesbezüglich generell die Fortschritte in der Wissenschaft. Für wichtige Meilensteine erfolgt eine Auswertung des Stands der Kenntnisse; die nächste Auswertung erfolgt für das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015).

5.4 Barrieren- und Lagerkonzepte (Themenbereich 4)

Konzepte für die technischen Barrieren (Themenbereich 4.1)

- Die heute vorhandenen Konzepte werden im Grundsatz beibehalten, wobei die verschiedenen Komponenten vertieft bearbeitet werden (vgl. die nachstehend diskutierten Elemente der technischen Barrieren). Für die Entscheidungspunkte und Meilensteine (provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 des Sachplanverfahrens (zurzeit in Vorbereitung), Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015), weitere Bewilligungsschritte) wird für die verschiedenen Elemente der technischen Barrieren jeweils eine Auswertung des Stands der Untersuchungen und eine gesamthafte Bewertung auch bezüglich ihres Zusammenwirkens vorgenommen. Deren Resultate fließen in die Anlagenplanung und die Sicherheitsanalyse ein. Die definitive Auslegung der technischen Barrieren erfolgt für das nukleare Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035), welche auch die Resultate der untertägigen Exploration und der Untersuchungen im standortspezifischen Felslabor berücksichtigt.
- Die bentonithaltigen Verfüllmaterialien (Schwerpunkt: Bentonitgranulat, Bentonitblöcke) werden weiter untersucht, und der Stand der Kenntnisse wird für das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015) in einem Bericht dokumentiert. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Möglichkeit offen gehalten, neben dem Referenzmaterial auch noch alternative Materialzusammensetzungen vorzuschlagen; der definitive Entscheid bzgl. Verfüllmaterialien wird erst mit dem nuklearen Baubewilligungsgesuch (ab ca. 2035) erfolgen.
- Für das zementhaltige Verfüllmaterial für die LMA-Lagerkammern wird für das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015) eine Referenzrezeptur festgelegt und deren Eigenschaften werden bestimmt. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Möglichkeit offen gehalten, neben dem Referenzmaterial auch noch alternative Materialzusammensetzungen vorzuschlagen; der definitive Entscheid bzgl. Verfüllmaterialien wird erst mit dem nuklearen Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035) erfolgen.
- Für die BE- bzw. HAA-Behälter werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015) die Behältermaterialien nochmals evaluiert und die Behälterkonzepte überprüft. Es ist vorgesehen, auf Stufe Rahmenbewilligungsgesuch alternative Behälterkonzepte offen zu halten (z.B. alternative Behältermaterialien). Erst für das nukleare Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035) ist die definitive Festlegung der Behälterausslegung vorgesehen. Der genaue Zeitpunkt für die Herstellung von Prototypen ist noch offen, wird aber in die Periode zwischen Erteilung der Rahmenbewilligung (ab ca. 2018) und dem nuklearen Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035) fallen; damit ist es möglich, auch die Erfahrungen aus anderen Programmen zu nutzen.
- Für die Versiegelung und den Verschluss werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015) die Materialien nochmals evaluiert und die Konzepte überprüft. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Möglichkeit offengehalten, alternative Versiegelungs- und Verschlusskonzepte (Materialien, Auslegung) vorzuschlagen. Erst für das nukleare Baubewilligungsgesuch (für das HAA-Lager ab ca. 2035) ist die definitive Festlegung der Versiegelung und des Verschlusses vorgesehen, basierend auf entsprechenden Versuchen im standortspezifischen Felslabor; der effektiv zu realisierende Verschluss wird erst in Zusammenhang mit der Anordnung des Verschlusses abschliessend festgelegt.

Prozessverständnis im Nahfeld (Themenbereich 4.2)

- Die Vertiefung des Verständnisses bezüglich geochemischer Immobilisierung und Retardierung von sicherheitsrelevanten Radionukliden und die Verbesserung der diesbezüglichen

Datenbasis bildet eine länger andauernde Aktivität, welche für die nächsten Jahre vor allem auf das Rahmenbewilligungsgesuch ausgerichtet ist (frühestens ca. 2015). Die Arbeiten werden auch nachher im Hinblick auf die weiteren Bewilligungsschritte weitergeführt.

- Die Vertiefung des Verständnisses zu den gekoppelten Phänomenen im BE / HAA-Nahfeld bildet eine länger andauernde Aktivität, welche für die nächsten Jahre vor allem auf das Rahmenbewilligungsgesuch ausgerichtet ist (frühestens ca. 2015), die Arbeiten werden aber auch nachher im Hinblick auf die weiteren Bewilligungsschritte weitergeführt. Dazu werden auch Versuche im Felslabor durchgeführt, wobei die Arbeiten bis zur Inbetriebnahme des standortspezifischen Felslabors (frühestens ab ca. 2025) vor allem im Felslabor Mont Terri abgewickelt werden sollen.

Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit (Themenbereich 4.3)

- Als Teil des Rahmenbewilligungsgesuchs (frühestens ca. 2015) ist ein Bericht zum Monitoringkonzept vorgesehen. Zusätzlich wird auch an den Instrumenten gearbeitet. Im Anschluss an die Rahmenbewilligung ist eine stufengerechte Vertiefung und anschliessend eine stufenweise Umsetzung vorgesehen (z.B. Erfassung des Ist-Zustands für die Beweis-sicherung vor Beginn von Bohrungen bzw. Bauarbeiten). Für das nukleare Baubewilligungsgesuch ist das Monitoring im HAA-Lager (Pilotlager, weitere Aktivitäten im HAA-Lager) auszulegen und die Rückholbarkeit ist spätestens vor der Inbetriebnahme mit einem entsprechenden Versuch nachzuweisen.

Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe (Themenbereich 4.4)

- Zurzeit laufen die Arbeiten zur Verfeinerung der Konzepte für die verschiedenen Anlagenmodule (Erschliessung, Installationsplätze, Empfangsanlage, Schachtköpfe, Erschliessung Untertag (Zugangstunnel, Schacht), untertägige Bauten (Bau- und Betriebstunnel, Pilotlager, Hauptlager, Testlager bzw. Felslabors). Diese berücksichtigen auch die Betriebskonzepte. Die Module der Oberflächeninfrastruktur bilden die Bausteine für die standortspezifische Anordnung dieser Module in Etappe 2 des Sachplanverfahrens (Unterlagen in Vorbereitung).
- Für das Rahmenbewilligungsgesuch (frühestens ca. 2015) sind die Konzepte für alle Module stufengerecht für den in Etappe 3 des Sachplanverfahrens gewählten Standort auszuarbeiten.
- Anschliessend an das Rahmenbewilligungsgesuch sind die Projekte stufengerecht zu vertiefen. Für den Bau des Felslabors (Teil der Gesamtanlage) ist vorgesehen, die Gesuchsunterlagen ab 2015 für eine behördliche Prüfung bereit zu haben. Die detaillierte Festlegung der Auslegung der restlichen Anlage (Empfangsanlage, Lagerkammern, etc.) erfolgt im Rahmen des nuklearen Baubewilligungsgesuchs (für das HAA-Lager ab ca. 2035).

5.5 Weitere Aspekte (Themenbereich 5)

- Nach der Zertifizierung des Qualitätsmanagement-Systems der Nagra wird dieses alle 3 Jahre re-zertifiziert; jährlich werden sowohl interne wie auch externe Audits durchgeführt. Das Qualitätsmanagement-System wird entsprechend den Bedürfnissen laufend ergänzt.
- Das Review-System und der Beizug von Experten erfolgt entsprechend den laufenden Projektbedürfnissen. Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden die Beratergremien zurzeit ausgebaut.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der Beurteilung des Projekts Opalinuston für den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle und langlebige mittelaktive Abfälle haben die Behörden und ihre Experten in ihren Gutachten und Stellungnahmen zahlreiche Hinweise und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen gegeben. Die Nagra hat diesbezüglich die Stellungnahmen und Gutachten analysiert und die Hinweise und Empfehlungen in ihrem Arbeitsplan berücksichtigt. Entsprechend der Aufforderung des Bundesrats bei seiner Entscheidung zum Entsorgungsnachweis für das HAA-Lager im Jahr 2006 hat die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen vorliegenden Bericht erstellt, welcher zeitgleich mit dem Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) eingereicht wurde. Die in vorliegendem Bericht analysierten Hinweise und Empfehlungen betreffen ein breites Spektrum an Themen und sind teilweise auch für das SMA-Programm relevant.

Viele der in den Gutachten und Stellungnahmen gemachten Hinweise und Empfehlungen betreffen grösstenteils den Opalinuston bzw. das Zürcher Weinland. Die diesbezüglichen Arbeiten werden deshalb unter dem Vorbehalt diskutiert, dass im Rahmen des Sachplanverfahrens der Opalinuston als bevorzugtes Wirtgestein und das Zürcher Weinland als geologisches Standortgebiet bzw. möglicher Standort für das HAA-Lager bestätigt werden. Andere Hinweise und Empfehlungen haben eher generischen Charakter und sind direkt relevant unabhängig von den spezifischen Entscheidungen im Rahmen des Sachplanverfahrens.

Die in diesem Bericht diskutierten zeitlichen Aspekte bei der Umsetzung der Hinweise und Empfehlungen sind in Übereinstimmung mit dem Realisierungsplan gemäss Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a).

7 Literaturverzeichnis

- Alonso J., García-Siñeriz J.L., Bárcena I., Alonso M.C., Fernández Luco L., Fries T., Pettersson S., Bodén A. & Salo J.-P. (2008): Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs: ESDRED: Deliverable 9 of Module 4 (Temporary Sealing Technology). Final technical report. Project F16W-CT-1004-508851. European Commission, Brussels, Belgium. In prep.
- ANDRA (2005): Dossier 2005 Argile: Safety evaluation of a geological repository. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, France.
- ANDRA (2007): Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: Abstracts. 3rd international meeting, Lille, September 17–20, 2007. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, France.
- Aranyosy J.F., Mayor J.C., Marschall P., Plas F., Blümling P., Van Geet M., Armand G., Techer I., Alheid H.J., Rejeb A., Pinettes P., Balland C., Popp T., Rothfuchs T., Matray J. M., De Craen M., Wieczorek K., Pudewills A., Czaikowski O., Hou Z. & Fröhlich H. (2008): EDZ development and evolution (RTDC 4) – Final Synthesis Report to EC (RTDC 4 NF-PRO). European Commission, Brussels, Belgium. In prep.
- BBAtG (1978): Bundesbeschluss vom 6.10.1978 zum Atomgesetz (BBAtG). SR 732.01.
- Bernier F., Li X.L., Bastiaens W., Ortiz L., Van Geet M., Wouters L., Frieg B., Blümling P., Desrues J., Viaggiani G., Coll C., Chanchole S., De Greef V., Hamza R., Malinsky L., Vervoort A., Vanbrabant Y., Debecker B., Verstraelen J., Govaerts A., Wevers M., Labiouse V., Escoffier S., Mathier J.F., Gastaldo L. & Bühler C. (2007): Fractures and self-healing within the excavation disturbed zone in clays (SELFRAC). Final report to EC (Project FIKW-CT2001-00182). EUR 22585. European Commission, Brussels, Belgium.
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager: Konzeptteil. Bundesamt für Energie, Bern, Schweiz.
- Blümling P., Bernier F., Lebon P. & Martin C.D. (2007): The excavation damaged zone in clay formations: Time-dependent behaviour and influence on performance assessment. *Physics and Chemistry of the Earth* 32, 588–599.
- Blümling P., Aranyosy J-F., Jing L., Li X.L., Marschall P., Rothfuchs T. & Vietor T. (2008): Disturbed and damaged zones around underground openings – effects induced by construction and thermal loading. Presented at EURADWASTE 08, Luxembourg, 20–23 October 2008. In press.
- Bonhoure I., Baur I., Wieland E., Johnson C.A. & Scheidegger A.M. (2006): Uptake of Se(IV/VI) oxyanions by hardened cement paste and cement minerals: An X-ray absorption spectroscopy study. *Cement & Concrete Research* 36:1, 91-98.
- Börgesson L. & Hernelind J. (2006): Canister displacement in KBS-3V: A theoretical study. SKB Technical Report TR 06-04. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.

- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2002): A comparison of apparent diffusion coefficients measured in compacted Kunigel V1 bentonite with those calculated from batch sorption measurements and De (HTO) data: A case study for Cs(I), Ni(II), Sm(III), Am(III), Zr(IV) and Np(V). Nagra Technischer Bericht NTB 02-17. Nagra, Wettingen, Switzerland. (Auch als PSI-Bericht 03-02 veröffentlicht).
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2005a): Experimental and modelling investigations on Na-illite: Acid-base behaviour and the sorption of strontium; nickel, europium and uranyl. Nagra Technical Report 04-02. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2005b): Experimental measurements and modeling of sorption competition on montmorillonite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69:17, 4187-4197.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2005c): Modelling the sorption of Mn(II), Co(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Eu(III), Am(III), Sn(IV), Th(IV), Np(V) and U(VI) on montmorillonite: Linear free energy relationships and estimates of surface binding constants for some selected heavy metals and actinides. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69:4, 875-892.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2006a): Modelling sorption data for the actinides Am(III), Np(V) and Pa(V) on montmorillonite. *Radiochimica Acta* 94, 619-625.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2006b): A quasi-mechanistic non-electrostatic modelling approach to metal sorption on clay minerals. – In: Lützenkirchen J., ed.: *Surface Complexation Modelling*, Elsevier Series Interface Science and Technology, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 518-538.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2006c): Effect of inorganic carbon on the sorption of Ni(II), U(VI) and Eu(III) on illite. – In: Reiller P. [et al.]: 1st annual workshop proceedings of integrated project fundamental processes of radionuclide migration IP FUNMIG, Saclay, 28 November – 1 December 2005. CEA-R-6122. Commissariat à l'énergie atomique CEA / Saclay, Gif-sur-Yvette, France, 225-229.
- Bradbury M.H. & Baeyens B. (2007): FUNMIG 3rd annual workshop. NDA report. Nuclear Decommissioning Authority, Moor Row (Cumbria), United Kingdom. In press.
- Bradbury M.H., Baeyens B., Geckeis H., Rabung T. (2005): Sorption of Eu(III)/Cm(III) on Ca-montmorillonite and Na-illite Part 2: Surface complexation modelling. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69:23, 5403-5412.
- Croisé J., Mayer G., Marschall P., Matray J.-M., Tanaka T. & Vogel P. (2006): Gas Threshold Pressure Test performed at the Mont Terri Rock Laboratory (Switzerland): Experimental data and data analysis. *Oil & Gas Science and Technology: Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 61:5, 631-645.
- Cui D., Ekeröth E., Fors P. & Spahiu K. (2008): Surface mediated processes in the interaction of spent fuel or α -doped UO₂ with H₂. – In: MRS Spring Meeting 2008, Proceedings Volume 1104: Actinides 2008. Materials Research Society (MRS), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1104-NN03-05.
- Curti E. (2003): Glass dissolution parameters: Update for Entsorgungsnachweis. Nagra Technical Report 02-21. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Curti E., Crovisier J.L., Morvan G. & Karpoff A.M. (2006): Long-term corrosion of two nuclear waste reference glasses (MW and SON68): A kinetic and mineral alteration study. *Applied Geochemistry* 21, 1152–1168.
- Dähn R., Scheidegger A.M., Manceau A., Schlegel M.L., Baeyens B., Bradbury M.H. & Chateigner D. (2003): Structural evidence for the sorption of Ni(II) atoms on the edges of montmorillonite clay minerals: A transmission electron microscopy and extended x-ray absorption fine structure study. *Geochimica Cosmochimica Acta* 67:1, 1-15.
- Dähn R., Jullien M., Scheidegger A.M., Poinssot C., Baeyens B., & Bradbury M.H. (2006): Identification of neoformed Ni-phylosilicates upon Ni uptake on montmorillonite: A transmission electron microscopy study. *Clays and Clay Minerals*. 54:2, 209-219.
- EAGE (2008): Research Workshop 'Compacting and stressing out shales: From geological to production timescales', 28 – 29 April 2008, Berlin. European Association of Geoscientists and Engineers, Houten, The Netherlands. [Workshop handout, unveröffentlicht]
- Electrowatt Infra (2004): Entsorgungsprogramm 2005 – Lagerkonzepte SMA: Unterlagen zur Beurteilung Standortoptionen SMA aus baulicher und wirtschaftlicher Sicht – Felsmechanische Berechnung Kavernenquerschnitte. Nagra Arbeitsbericht NAB 04-11. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Ferry C., Lovera P., Poinssot C. & Johnson L. (2003): Quantitative assessment of the instant release fraction (IRF) for fission gases and volatile elements as a function of burnup and time under geological disposal conditions. – In: Scientific basis for nuclear waste management XXVII, June 15-19, 2003, Kalmar, Sweden. MRS Symposium Proceedings vol. 807. Materials Research Society (MRS), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 35-40.
- Fries T., Weber H.P. & Wetzig V. (2007): ESDRED: Low pH shotcrete for rock support: Spraying tests in the Hagerbach Test Gallery. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-02. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Gaucher E., Tournassat C., Jacquot E., Altmann S. & Vinsot A. (in prep.): Improvements in the modelling of the porewater chemistry of the Callovo-Oxfordian formation. In prep.
- Gautschi A., Marschall P., Schwyn B., Wersin P., Baeyens B., Bradbury M.H., Gimmi T., Mazurek M., Van Loon L.R. & Waber N. (2004): Geoscientific basis for making the safety case for a SF/HLW/ILW repository in Opalinus clay in NE Switzerland (Project Entsorgungsnachweis) – II: The geosphere as a transport barrier: Hydraulic, diffusion and sorption properties. – In: Geological disposal: Building confidence using multiple lines of evidence. First AMIGO workshop proceedings, Yverdon-les-Bains 3-5 June 2003. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France, 63-70.
- Gimmi T. & Waber H.N. (2004): Modelling of tracer profiles in pore water of argillaceous rocks in the Benken borehole: Stable water isotopes, chloride, and chlorine isotopes. Nagra Technical Report NTB 04-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Gimmi T., Waber H.N., Gautschi A. & Rübel A. (2007): Stable water isotopes in pore water of Jurassic argillaceous rocks as tracers for solute transport over large spatial and temporal scales. *Water Resources Research* 43, W04410.

- Glaus M.A., Baeyens B., Lauber M., Rabung Th., Van Loon L.R. (2005): Influence of water-extractable organic matter from Opalinus Clay on the sorption and speciation of Ni(II), Eu(III) and Th(IV). *Applied Geochemistry* 20, 443-451.
- Glaus M.A., Baeyens B., Bradbury M.H., Jakob A., Van Loon L.R. & Yaroschchuk A. (2007): Diffusion of ^{22}Na and ^{85}Sr in montmorillonite: Evidence of interlayer diffusion being the dominant pathway at high compaction. *Environmental Science & Technology* 41, 478-485.
- Grambow B., Lemmens K., Minet Y., Poinssot C., Spahiu K., Bosbach D., Cachoir C., Casas I., Clarens F., Christiansen B., de Pablo J., Ferry C., Giménez J., Gin S., Glatz J.P., Gago J.A., Gonzalez Robles E., Hyatt N.C., Iglesias E., Kienzler B., Luckscheiter B., Martinez-Esparza A., Metz V., Ödegaard-Jensen A., Ollila K., Quiñones J., Rey A., Ribet S., Rondinella V.V., Skarnemark G., Wegen D., Serrano-Purroy D. & Wiss T. (2008): RTDC-1 Final Synthesis Report, Dissolution and release from the waste matrix. EU NF-PRO Project FI6W-CT-2003-02389. European Commission, Brussels, Belgium. In prep.
- Gribi P., Johnson L., Suter D., Smith P., Pastina B. & Snellman M. (2008): Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto: Process Report. POSIVA 2007-09; SKB R-08-36. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland; Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- Harfouche M., Wieland E., Dähn R., Fujita T., Tits J., Kunz D. & Tsukamoto M. (2006): EXAFS study of U(VI) uptake by calcium silicate hydrates. *Journal of Colloid and Interface Science* 303, 195-204.
- HSK & KSA (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle: Richtlinie für schweizerische Kernanlagen. HSK-R-21/d. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen; Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen, Villigen, Schweiz.
- HSK (2005): Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). HSK 35/99. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.
- HSK (2006): Auflistung der Hinweise und offenen Fragen im Gutachten der HSK 35/99 zum Entsorgungsnachweis der Nagra. HSK 35/104. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.
- HSK (2008): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen HSK-G03. Entwurf: März 2008. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz. In Vorb.
- Holocher J., Mayer G., Namar R., Siegel P., Hubschwerlen N. (2008): VPAC – a numerical model for groundwater flow and radionuclide transport. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Hummel W., Berner U., Curti E., Pearson F.J. & Thoenen T. (2002): Nagra / PSI: Chemical Thermodynamic Data Base 01/01. Nagra Technical Report 02-16. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- IAEA (2006): The management system for facilities and activities: Safety requirements. IAEA Safety Standards Series GS-R-3. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
- IAEA (2008): The management system for the disposal of radioactive waste. Safety Guide. IAEA Safety Standards Series GS-G-3.4. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
- IFP (2003): Gas-water-rock interactions induced by reservoir exploitation, CO₂ sequestration, and other geological storage. IFP International Conference, 18-20 November 2003, Rueil-Malmaison. Special Issue of Oil & Gas Science and Technology: Revue de l'Institut français du pétrole, 2005, 60:1-2.
- Johnson L.H. & Schwyn B. (2008): Proceedings of a Nagra/RWMC Workshop on the release and transport of C-14 in repository environments. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-22. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Johnson L.H., Niemeyer M., Klubertanz G., Siegel P. & Gribi P. (2002): Calculations of the temperature evolution of a repository for spent fuel, vitrified high-level waste and intermediate level waste in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 01-04. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Johnson L., Alonso J., Plas F., Pellegrini D., Bildstein O., Van Geet M., Becker D., Sellin P., Cormenzana J.L., Nordman H., Lehikoinen J., Sillen X., Weetjens E., Schnier H., Vokal A., Hodgkinson D., Serres C., Norris S., Amme M., Bauer C., Mathieu G. & Hautojärvi A. (2008): Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies. RTDC-5 Synthesis Report, Deliverable (D-N°:5.2.3), EU NF-PRO Project FI6W-CT-2003-02389. European Commission, Brussels, Belgium.
- Jolley S.J., Dijk H., Lamens J.H., Fisher Q.J., Manocochi T., Eikmans H. & Huang Y. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models: Brent Province, northern North Sea. *Petroleum Geoscience* 13, 321-340.
- Jordan P. (2007): Digitales Höhenmodell Basis Quartär. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-12. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Karland O., Nilsson U., Weber H-P. & Wersin P. (2007): Sealing ability of Wyoming bentonite pellets foreseen as buffer material: Laboratory results. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-23. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21. März 2003 (KEG). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung vom 10. Dezember 2004 (KEV). Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- King F. (2008): Corrosion of carbon steel under anaerobic conditions in a repository for SF and HLW in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 08-12. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Klinkenberg M., Kaufhold S., Dohrmann R. & Siegesmund S. (2007): Microstructural investigation of Opalinus Clay – Proposal of a carbonate distribution model: Abstract. – In: Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement. 3rd international meeting, Lille, September 17–20, 2007. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, France, 345-346.
- Klinkenberg M. (2008): Einfluss des Mikrogefüges auf ausgewählte petrophysikalische Eigenschaften von Tongesteinen und Bentoniten. Dissertation. Mathematisch-Naturwiss. Fakultät der Georg-August-Universität, Göttingen, Deutschland.
- KNE (2005): Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra: Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit. Expertenbericht der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). HSK 35/98. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Villigen, Schweiz.
- Kosakowski G., Churakov S.V. & Thoenen T. (2008): Diffusion of Na and Cs in montmorillonite. *Tectonophysics* 56, 190-206.
- KSA (2005): Stellungnahme zum Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston). KSA 23/170. Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Schweiz.
- KSA (2007): Abschlussbericht der KSA. KSA-Report No. 07-03. Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen (KSA), Schweiz.
- Lanyon G.W. (2007): iCONNECT-Club / Year 5: Nagra supported studies on understanding flow in fractured rock. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-30. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Manukyan E., Maurer H., Marelli S., Greenhalgh S.A. & Green A.G. (2008): Non-intrusive monitoring using seismic tomography at the Mont Terri rock laboratory: Abstract. – In: SEG 2008 Annual Meeting, 9-14 November 2008, Las Vegas. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA. In press.
- Manzocchi T., Walsh J.J., Nell P. & Yielding G. (1999): Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience* 5, 53-63.
- Marelli S., Maurer H.R., Manukyan E., Greenhalgh S.A. & Green A.G. (2008): Monitoring changes in bentonite at the Grimsel Test Site using crosshole seismic tomography: Abstract – In: Near Surface 2008: 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.
- Marques M., Baeyens B. & Bradbury M.H. (2008): The influence of carbonate complexation on lanthanide/actinide sorption on montmorillonite. *Radiochimica Acta*. In press.
- Marschall P., Horseman S. & Gimmi T. (2005): Characterisation of gas transport properties of the Opalinus Clay, a potential host rock formation for radioactive waste disposal. *Oil & Gas Science and Technology: Revue de l'Institut Français du Pétrole* 60:1-2.
- Marschall P., Trick T., Lanyon G.W., Delay J. & Shao, H. (2008): Hydro-mechanical evolution of damaged zones around a microtunnel in a claystone formation of the Swiss Jura Mountains. – In: American Rock Mechanics Association, San Francisco Symposium 2008, ARMA08-193.

- Mayor J.-C., García-Siñeriz J.-L., Alonso E., Alheid H.-J. & Blümling P. (2005): Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. *Publicación técnica 02/2005*. Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), Madrid, Spain. Auch in: *Reports of the Swiss Geological Survey 1*, 115-179.
- Mayor J.C., García-Siñeriz J.-L., Velasco M., Gómez-Hernández J., Lloret A., Matray J.-M., Coste F., Giraud A., Rothfuchs T., Marschall P., Roesli U. & Mayer G. (2007): Ventilation Experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. – In: Bossart P. & Nussbaum C., eds.: *Mont Terri Project – Heater experiment, Engineered Barrier Emplacement and Ventilation Experiment*. *Reports of the Swiss Geological Survey 1*, 181-240.
- 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.
- Mazurek M., Alt-Epping P., Gimmi T., Waber H.N., Bath A., Buschaert S. & Gautschi A. (2007a): Tracer profiles across argillaceous formations: A tool to constrain transport processes. – In: Bullen, T.D. & Wang, Y., eds.: *Proceedings of the 12th international symposium on water-rock interaction, WRI-12, Kunming, China, 31 July – 5 August 2007*, Taylor & Francis, 767-771.
- Mazurek M., Alt-Epping P., Bath A., Buschaert S., Gautschi A., Gimmi T. & Waber H.N. (2007b): CLAYTRAC project: Evaluation of tracer profiles across argillaceous formations. – In: *Clays in natural and engineered barriers for radioactive waste confinement: Abstracts. 3rd international meeting, Lille, September 17–20, 2007*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Chatenay-Malabry, France, 9-10.
- Mazurek M., Alt-Epping P., Bath A., Gimmi T. & Waber H.N. (2008): CLAYTRAC Project: Natural tracer profiles across argillaceous formations: Review and Synthesis. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.
- Nagra (2002a): Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Nagra (2002b): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-03. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Nagra (2002c): Project Opalinus Clay: Safety Report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-05. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2004): Effects of post-disposal gas generation for spent fuel, high level waste and long-lived Intermediate level waste sited in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 04-06. Nagra, Wettingen, Switzerland.

- Nagra (2008a): Entsorgungsprogramm 2008 der Entsorgungspflichtigen. Nagra Technischer Bericht NTB 08-01. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Nagra (2008b): Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland. Nagra Technical Report NTB 08-07. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Nagra (2008c): STMAN: User Guide and Theoretical Background for Version 5.7. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-46. Nagra, Wettingen, Switzerland. In prep.
- NEA (2002): The handling of timescales in assessing post-closure safety of deep geological repositories: Workshop proceedings Paris, 16–18 April 2002. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2004a): Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz: Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, Frankreich.
- NEA (2004b): The handling of timescales in assessing post-closure safety: Lessons learnt from the April 2002 workshop in Paris, France. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2005): Chemical Thermodynamics Series Volumes 1 – 10 (1992 – 2007). Elsevier, The Netherlands.
- NEA (2006): The NEA FEP database: Version 2.1, Copy No. 3. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2008): Safety cases for deep geological disposal of radioactive waste: Where do we stand? Symposium proceedings Paris, France, 23–25 January 2007. OECD Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, France.
- ONDRAF (2001): SAFIR 2: Safety assessment and feasibility interim report 2. NIROND-TR 2001-06. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF), Brussels, Belgium.
- ONDRAF (2007): The ONDRAF/NIRAS long-term safety strategy for the disposal of high level waste. NIROND-TR 2006-04. SFC 1 level 4 REPORT: First full draft. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF), Brussels, Belgium.
- Plötze M. & Weber H.P. (2007): ESDRED: Emplacement tests with granular bentonite MX-80: Laboratory results from ETH Zürich. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-24. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Rabung T., Pierret M.C., Bauer A., Geckeis H., Bradbury M.H., Baeyens B. (2005): Sorption of Eu(III)/Cm(III) on Ca-montmorillonite and Na-illite – Part 1: Batch sorption and Time Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69:23, 5393-5402.

- Rahn M.K. & Selbekk R. (2007): Absolute dating of the youngest sediments of the Swiss Molasse basin by apatite fission track analysis. *Swiss Journal of Geoscience* 100:3, 371-382.
- Schlatter A. (2007): Neotektonische Untersuchungen in der Nordschweiz und Süddeutschland. Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien CH / D. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-13. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Schweizerischer Bundesrat (2006): Verfügung zum Gesuch der Nagra vom 19. Dezember 2002 betreffend den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Schweizerischer Bundesrat, Bern, Schweiz.
- SED Jahresberichte: Schweizerischer Erdbebendienst: Jahresberichte. Erhältlich unter: <http://histserver.ethz.ch/seisnotectonics/reports.php>.
- Senger R. (2006): Thermo-hydrologic evolution of SF/HLW repository: Scoping calculations in support of general THM process and system understanding. Nagra Arbeitsbericht NAB 06-13. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Senger R. & Ewing J. (2008): Evolution of temperature and water content in the bentonite buffer: Detailed modelling of two-phase flow processes associated with the early closure period. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-32. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Senger R. & Marschall P. (2008): Task Force on EBS / Gas Transport in Buffer Material. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-24. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Senger R., Marschall P.M. & Finsterle S. (in prep.): Investigation of two-phase flow phenomena associated with corrosion in an SF/HLW Repository in Opalinus Clay, Switzerland. *Physics and Chemistry of the Earth*. In press.
- SKB (2006): Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation. Main Report of the SR-Can project. SKB Technical Report TR 06-09. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- SKB (2008): RD&D 2007 Programme for research, development and demonstration. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Stockholm, Sweden.
- Smith P., Neall F., Snellman M., Pastina B., Nordman H., Johnson L. & Hjerpe T. (2007): Safety assessment for a KBS-3H spent nuclear fuel repository at Olkiluoto: Summary report. Posiva Report 2007-06. Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- TeKamp L. (2008): Comparative rock-mechanical modeling of ILW caverns in different host rocks. Nagra Arbeitsbericht NAB 08-45. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Tits J., Stumpf T., Rabung T., Wieland E. & Fanghänel T. (2003): Uptake of Cm(III) and Eu(III) by calcium silicate hydrates: A solution chemistry and time-resolved laser fluorescence spectroscopy study. *Environmental Science & Technology* 37, 3568-3573.
- Tits J., Wieland E., Müller C.J., Landesman C. & Bradbury M.H. (2006a): Strontium binding by calcium silicate hydrates. *Journal of Colloid and Interface Science* 300, 78-87.

- Tits J., Iijima K., Wieland E. & Kamei G. (2006b): The uptake of radium by calcium silicate hydrates and hardened cement paste. *Radiochimica Acta* 94, 637-643.
- Van Iseghem P., Lemmens K., Aertsens M., Gin S., Ribet I., Grambow B., Crovisier J.L., Del Nero M., Curti E., Schwyn B. & Luckscheiter B. (2006): Chemical durability of high-level waste glass in repository environment: main conclusions and remaining uncertainties from the GLASTAB and GLAMOR projects. – In: *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXIX*, Gent, Belgium, 12–16 September 2005, MRS Symposium Proceedings vol. 932. Materials Research Society (MRS), Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 293-304.
- Van Loon L.R. & Glaus M.A. (2008): Mechanical compaction of smectite clays increases ion exchange selectivity for cesium. *Environmental Science and Technology* 42, 1600-1604.
- Van Loon L.R., Soler J.M. & Bradbury M.H. (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., Soler J.M., Müller W. & Bradbury M.H. (2004): Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: A case study with Opalinus Clay. *Environmental Science and Technology* 38, 5721-5728.
- Van Loon L.R., Müller W. & Iijima K. (2005a): Activation energies of the self-diffusion of HTO, $^{22}\text{Na}^+$ and $^{36}\text{Cl}^-$ in a highly compacted argillaceous rock (Opalinus Clay). *Applied Geochemistry* 20, 961-972.
- Van Loon L.R., Baeyens B. & Bradbury M.H. (2005b): Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus Clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations. *Applied Geochemistry* 20, 2351-2363.
- Van Loon L.R., Glaus M.A. & Müller W. (2007): Anion exclusion effects in compacted bentonites: Towards a better understanding of anion diffusion. *Applied Geochemistry* 22, 2536-2552.
- Vespa, M., Dähn R., Grolimund D., Wieland E. & Scheidegger A.M. (2006a): Spectroscopic investigation of Ni speciation in hardened cement paste. *Environmental Science & Technology* 40, 2275-2282.
- Vespa M., Dähn R., Gallucci E., Grolimund D., Wieland E. & Scheidegger A.M. (2006b): Micro-scale investigations of Ni uptake by cement using a combination of scanning electron microscopy and synchrotron-based techniques. *Environmental Science & Technology* 40, 7702-7709.
- Vinsot A., Appelo C.A.J., Cailteau C., Wechner S., Pironon J., De Donato P., De Cannière P., Mettler S., Wersin P. & Gäbler H.E. (2008a): CO₂ data on gas and pore water sampled in situ in the Opalinus Clay at the Mont Terri rock laboratory. Submitted to *Physics and Chemistry of the Earth*.
- Vinsot A., Mettler S. & Wechner S. (2008b): In-situ characterization of the Callovo-Oxfordian pore water composition. Submitted to *Physics and Chemistry of the Earth*.

- Wersin P., Van Loon L., Soler J.M., Yllera A., Eikenberg J., Gimmi T., Hernan P. & Boisson J.Y. (2004): Long-term Diffusion Experiment at Mont Terri: First results from field and laboratory data. *Applied Clay Science* 26, 123-135.
- 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⁺, ⁸⁵Sr²⁺ and ⁶⁰Co²⁺ in a clay formation: Results and modelling from an in situ experiment in Opalinus Clay. *Applied Geochemistry* 23, 678-691.
- Wieland E. & Van Loon L.R. (2002): Cementitious near-field sorption data base for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay. Nagra Technical Report NTB 02-20. Nagra, Wettingen, Switzerland.
- Wieland E., Tits J., Ulrich A. & Bradbury M.H. (2006): Experimental evidence for solubility limitation of the aqueous Ni(II) concentration and isotopic exchange of ⁶³Ni in cementitious systems. *Radiochimica Acta* 94, 29-36.
- Wieland E., Tits J., Kunz D. & Dähn R. (2008): Strontium uptake by cementitious materials. *Environmental Science & Technology* 42, 403-409.
- Wiget A., Schlatter A., Brockmann E., Ineichen D, Marti U. & Egli R. (2007): GPS-Netz-Neotektonik Nord-Schweiz 2004: Messkampagne im Auftrag der Nagra und Deformationsanalyse 1988-1995-2004. Nagra Arbeitsbericht NAB 06-04. Revision August 2007. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Wollenberg R. & Schröder H.-W. (2006): Herstellung und Charakterisierung von Bentonit-systemen für den Einsatz als Versiegelungsmaterial. Nagra Arbeitsbericht NAB 06-20. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Zippelt K. & Dierks O. (2007): Auswertung von wiederholten Präzisionsnivellements im südlichen Schwarzwald, Bodenseeraum sowie in angrenzenden schweizerischen Landes-teilen. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-27. Nagra, Wettingen, Schweiz.

8 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen (inkl. Erläuterungen)

ABM	Alternative Buffer Material
ANDRA	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Frankreich
AREVA	Französischer Nuklearkonzern. Entstand 2001 aus dem Zusammenschluss mehrerer Unternehmen, u.a. COGEMA und Framatome ANP
BE	Abgebrannte Brennelemente
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland
BGS	British Geological Survey, Grossbritannien
BIOPROTA	Internationales Forum zur Biosphärenmodellierung
CCDF	Complementary Cumulative Density Function (komplementäre Verteilungsfunktion)
CD	Cyclic Deformation (Versuch im Felslabor Mont Terri)
CI	Cement Clay Interaction (Versuch im Felslabor Mont Terri)
CLAYTRAC	OECD / NEA Clay Club Projekt, vgl. Mazurek et al. 2008
CRS	Common Reflection Surface
DI, DI-A, DI-A2	Long-term Diffusion (Versuche im Felslabor Mont Terri)
DI-B	Hydrogeochemistry and transport mechanisms (Versuch im Felslabor Mont Terri)
DR	Radionuclide Diffusion and Retention (Versuch im Felslabor Mont Terri)
DR-A	Disturbances, Diffusion and Retention (Versuch im Felslabor Mont Terri)
DS	Determination of Stress (Versuch im Felslabor Mont Terri)
EB	Engineered Barriers (EU-Projekt des 5. Rahmenprogramms, Versuch im Felslabor Mont Terri)
EBS Task Force	Internationale Arbeitsgruppe zur Modellierung von gekoppelten THM-Prozessen in technischen Barrieren, Äspö, Schweden unter der Federführung der SKB)
EMPA	Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research, Dübendorf
EMRAS	Environmental Modelling for Radiation Safety (IAEA-Programm)
EN	Entsorgungsnachweis
ENSI	vgl. HSK
ENRESA	Empresa Nacional de Residuos Radiactivos S.A., Spanien
ESDRED	Engineering Studies and Demonstration of Repository Designs (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms): Planung und Test von Endlagerkomponenten bzw. Gerätschaften zur Einlagerung von HAA/BE (Demonstrationsprojekte)
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EU-FP5, FP6, FP7	5., 6. bzw. 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Union
EZ-A	EDZ cut-off (Versuch im Felslabor Mont Terri)
EZ-B	Fracture generation in the EDZ (Versuch im Felslabor Mont Terri)

F+E	Forschung und Entwicklung
FEBEX-e	Full-scale High Level Waste Engineered Barriers Experiment - Extension (Versuch im Felslabor Grimsel): Demonstrationsversuch des Einlagerungskonzepts für hoch-radioaktive Abfälle.
FEP	Features, Events and Processes (Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse)
FEP-CAT	OECD / NEA Clay Club Projekt; Erarbeitung eines FEP-Katalogs zur Steuerung von Sicherheitsanalysen
FM-C	Flow Mechanisms (Tracers) (Versuch im Felslabor Mont Terri)
FORGE	Fate of Repository Gases (EU-Projektvorschlag, 7. Rahmenprogramm)
FUNMIG	Fundamental processes in radionuclide migration (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms): Untersuchung der Radionuklidmigration in verschiedenen Wirtgesteinen
Gas-MOD	Development of geoscientific modelling capabilities related to combined water/gas transport processes (F+E Projekt der Nagra)
GD	Analysis of Geochemical Data (Versuch im Felslabor Mont Terri)
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbh
HA	Hydrogeological analyses (Versuch im Felslabor Mont Terri)
HAA	Hochaktive Abfälle
HE	Heater Experiment: Rock and bentonite thermo-hydro-mechanical (THM) processes in the near-field of a thermal source for development of deep underground high-level radioactive waste repositories (EU-Projekt des 5. Rahmenprogramms, Versuch im Felslabor Mont Terri)
HE-D	Heater Experiment: Study of the thermo-hydro-mechanical behaviour of the host rock (Versuch im Felslabor Mont Terri)
HG-A	Gas paths through host rocks and along seals (Versuch im Felslabor Mont Terri)
HG-C	Long-term gas migration in undisturbed argillaceous formations (Versuch im Felslabor Mont Terri)
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, ab 1. Januar 2009 Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)
HT	Hydrogen Transfer (Versuch im Felslabor Mont Terri)
IAEA	International Atomic Energy Agency (Internationale Atomenergie Organisation, IAEO)
iCONNECT	Integrated CONTinuum and NETwork approach to groundwater flow and Contaminant Transport
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, Frankreich
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
KNE	Kommission Nukleare Entsorgung
KSA	Eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Kernanlagen, seit dem 1. Januar 2008 'Kommission für nukleare Sicherheit' (KNS)
LES / PSI	Laboratory for Waste Management, Paul Scherrer Institut
LMA	Langlebige mittelaktive Abfälle

LOT	Long Term Test of Buffer Material
MB	Mine-by Test (Versuch im Felslabor Mont Terri): Untersuchung der Deformation beim Tunnelbau
MICADO	Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent fuel in a nuclear waste repository (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms): Untersuchung verschiedener Modellierungsansätze zur adäquaten Beschreibung des Lösungsprozesses von Brennelementen
MoDeRn	Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure (EU-Projektvorschlag, 7. Rahmenprogramm)
NEA	Nuclear Energy Agency der OECD
NEA-IRT	Internationale Expertengruppe ("International Review Team") der NEA, welche auf Ersuchen des Bundesamts für Energie die Langzeitsicherheitsanalyse der Nagra (Nagra 2002c) geprüft hat
NF-PRO	Understanding and physical and numerical modelling of the key processes in the near-field and their coupling for different host rocks and repository strategies (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms): Untersuchung von Nahfeldprozessen
NWMO	Nuclear Waste Management Organisation, Kanada
ONDRAF / NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles, Belgien
OSM	Obere Süßwassermolasse
PAMINA	Performance Assessment Methodologies to Guide the Development of the Safety Case (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms): Weiterentwicklung der in der Sicherheitsanalyse verwendeten Methoden und Werkzeuge für die verschiedenen Entsorgungskonzepte für abgebrannte Brennelemente und langlebigen radioaktiven Abfall in verschiedenen Wirtgesteinen
PC	Porewater Chemistry (Versuch im Felslabor Mont Terri)
PC-C	Gas Porewater Equilibrium (Versuch im Felslabor Mont Terri)
PEBS	Long-term performance of Engineered Barrier Systems (EU-Projektvorschlag, 7. Rahmenprogramm)
PRACLAY	Preliminary demonstration test for clay disposal of highly radioactive waste (Versuch im Felslabor HADES, Mol, Belgien)
PSI	Paul Scherrer Institut
RBG	Rahmenbewilligungsgesuch
ReCosy	Investigations of Redox Controlling systems (EU-Projekt des 7. Rahmenprogramms)
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland
SB	Self-sealing barriers of clay-sand mixtures (Versuch im Felslabor Mont Terri im Rahmen des EU-Projekts ESDRED)
SCK-CEN	Studiecentrum voor Kernenergie, Belgien
SELFRACT	Fractures and self-healing within the excavation disturbed zone in clays (EU-Projekt des 5. Rahmenprogramms, Versuch im Felslabor Mont Terri)
Sellafield Ltd	Ehem. Tochtergesellschaft der Firma BNFL (British Nuclear Fuels plc), heute unter der Verantwortung der NDA (Nuclear Decommissioning Authority), für die Standorte Sellafield, Calder Hall, Capenhurst und Windscale zuständig
SGT	Konzept Sachplan geologische Tiefenlager

SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB, Schweden
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SR	Low pH Shotcrete for Rock Support (Versuch im Felslabor Mont Terri)
TDB	Thermochemical Database Project der OECD / NEA
TEM	Test and Evaluation of Monitoring Techniques (Versuch im Felslabor Grimsel)
THM	Thermo-hydro-mechanisch gekoppelte Prozesse
THM-Bent	Characterisation and constitutive modelling of the behaviour of granular bentonite during Thermo-Hydro-Mechanical Processes (F+E Projekt der Nagra)
THMC-Prozesse	Thermo-hydro-mechanisch und chemisch gekoppelte Prozesse
THM-LabPerm	Laboratory programme on the investigation of gas transport and pathway dilation process in Opalinus Clay and in buffer materials (F+E Projekt der Nagra)
THM-TaskForces	Weiterentwicklung von THM-Modellwerkzeugen in internationalen Modelliergruppen: iCONNECT Club und SKB Task Force on Engineered Barriers
TIMODAZ	Thermal impact on the damaged zone around a radioactive waste disposal in clay host rocks (EU-Projekt des 6. Rahmenprogramms, Versuch im Felslabor Mont Terri): Verbesserung des Verständnisses gekoppelter Prozesse im Nahfeld eines HAA/BE-Lagers
UPC	Universitat Politècnica de Catalunya, Spanien
UZ	Ungesättigte Zone (Versuch im Felslabor Mont Terri)
VE	Ventilation Test (EU-Projekt des 5. Rahmenprogramms, Versuch im Felslabor Mont Terri)
VTT	Technical Research Centre, Finnland

Anhang 1 – Stellungnahmen der Nagra zu den offenen Fragen, Hinweisen und Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis

Nachfolgend sind die offenen Fragen, Hinweise und Empfehlungen (kurz: "Empfehlungen") in den Gutachten und Stellungnahmen der HSK, KNE, KSA und NEA-IRT zum Entsorgungsnachweis für BE / HAA / LMA aufgeführt sowie die dazu gehörende Stellungnahme der Nagra. Die Empfehlungen sind nach Themenbereichen gemäss den Vorgaben in Tab. 3-1 geordnet. Teilweise werden gleiche bzw. sehr ähnliche Empfehlungen zusammen behandelt. Innerhalb eines Themenbereichs werden die Empfehlungen so weit möglich weitergehend thematisch gegliedert. Im Text wird

- zuerst die Empfehlung aufgeführt (in der Regel exaktes Zitat (inkl. Angabe der Seite, wo das Zitat gefunden werden kann⁴²), in Ausnahmefällen ergänzt mit einem Hinweis, wo die Empfehlung vertieft diskutiert wird),
- anschliessend die Stellungnahme der Nagra, wie sie mit der Empfehlung umgeht (durchgeführtes bzw. in Bearbeitung befindliches Projekt, geplantes Projekt).

Da verschiedene Empfehlungen sehr ähnlich sind, führt dies gezwungenermassen zu Wiederholungen. Diese werden akzeptiert und innerhalb eines Themenbereichs wird nur in Ausnahmefällen auf andere Empfehlungen bzw. Stellungnahmen der Nagra verwiesen (diese sind in jedem Fall sinngemäss auch gültig); auf relevante Empfehlungen bzw. Stellungnahmen der Nagra in anderen Themenbereichen wird jedoch verwiesen.

⁴² Für das Zitieren der Empfehlungen der HSK (Umfang des Zitats, Seitenzahl) war die Zusammenstellung der HSK (HSK 2006) massgebend.

1 Geologische Untersuchungen

1.1 Standortuntersuchungen

1.1.1 Standortuntersuchungen von der Oberfläche

Empfehlung Nr. 1.1.1-01

HSK, Seite 27:

Die Charakterisierung der Schichten wurde von der Nagra sorgfältig vorgenommen. In der Sicherheitsanalyse zum Entsorgungsnachweis (NTB 02-05) hat sie die Rückhaltung von Radionukliden in den Rahmengesteinen konservativerweise nicht berücksichtigt. Das Rückhaltepotenzial der Rahmengesteine wurde jedoch für einige Szenarien abgeschätzt; es zeigte sich dabei, dass sie ein gutes Barrierenpotenzial haben. Die Schutzziele werden ohne diese Barriere eingehalten. Da die Rahmengesteine in der Sicherheitsanalyse nicht berücksichtigt wurden, wurde die Charakterisierung dieser Gesteine nicht mit dem gleichen Aufwand ausgeführt wie für das Wirtgestein. Im Falle der Fortführung des Projektes sollen diese gering durchlässigen Gesteinsabfolgen eingehender untersucht und beschrieben werden, um ihre Barrierenwirkung besser zu quantifizieren.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, wird im Rahmen der standortspezifischen Untersuchungen im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration der Charakterisierung der geringdurchlässigen Rahmengesteine besondere Beachtung geschenkt: Kernbohrstrecken, bohrlochgeophysikalische und felsmechanische Untersuchungen, hydraulische Tests, Laboruntersuchungen an Bohrkernen. Das Vorhandensein möglicher lateraler Heterogenitäten in den Rahmengesteinen wird auch mittels der existierenden 2D-/3D-Seismik überprüft. Hierzu sind weiterführende seismische Datenbearbeitungen mit neu entwickelten Methoden (CRS Processing) geplant.

Empfehlung Nr. 1.1.1-02

HSK, Seite 56:

Zusammenfassend kann aus Sicht der HSK festgehalten werden, dass der vorgelegte Datensatz ein solides und nachvollziehbares Bild der hydrogeologischen Verhältnisse im Untergrund des Zürcher Weinlands ergeben hat. Obwohl nicht alle Gesteinsformationen im gleichen Umfang und in gleicher Breite hydrogeologisch untersucht wurden, sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar und plausibel und erlauben, die grundsätzliche Eignung des Opalinustons als Wirtgestein aus hydrogeologischer Sicht positiv zu beurteilen. Eine Erweiterung und Bestätigung des Datensatzes wird bei einer allfälligen Weiterführung des Projektes im Rahmen der nächsten Bewilligungsschritte erfolgen müssen. Insbesondere wird die Rolle der Rahmengesteine des Opalinustons noch vertiefter zu klären und in die Sicherheitsbetrachtung mit einzubeziehen sein.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, sind im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration zusätzliche standortbezogene Untersuchungen in Wirt- und Rahmengesteinen mit vertikalen und/oder geneigten Bohrungen geplant. Dies beinhaltet auch Packertests zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit und des Formationsdrucks sowie Permeametertests an Kernproben zur hydromechanischen Charakterisierung (Porosität, Permeabilität, Speicherkoeffizient).

Empfehlung Nr. 1.1.1-03

HSK, Seite 209 und KSA, Empfehlung 3-1, Seiten 29, 38 und 95:

HSK: Mit den oberen und unteren tonig-mergeligen Rahmengesteinen verfügt das Lagersystem über potenzielle weitere Barriereelemente, die nach Ansicht der HSK bei einer Weiterführung des Projektes und bei einer Verbesserung der Datengrundlagen in den Referenzfall der Sicherheitsanalyse einbezogen werden sollten.

KSA: Nach erfolgter Standortwahl soll die Barrierenwirkung der Rahmengesteine genauer abgeklärt und in der Sicherheitsanalyse auch im Referenzfall berücksichtigt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, wird die Barrierenwirkung der Rahmengesteine im Rahmen zukünftiger Sondier- und Synthesarbeiten im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch detailliert untersucht. In den zusätzlichen Sondierbohrungen (vertikal/schräg) werden die Untersuchungen durchgeführt, welche zur Charakterisierung der Transporteigenschaften der Rahmengesteine notwendig sind, damit diese auch im Referenzfall der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden können (Identifikation von potenziellen Transportpfaden, mineralogische, hydraulische und geochemische Untersuchungen der Transportpfade und der Gesteinsmatrix, Diffusionsparameter etc.). Zudem werden skalenübergreifende Systemmodelle (Lagermodell, Standortmodell, ggf. Regionalmodell) zur quantitativen Überprüfung der Barrierenwirkung von Wirt- und Rahmengesteinen sowie zu Konsistenzprüfungen (z.B. hydraulische Modelle vs. Diffusionsmodelle) erstellt.

Empfehlung Nr. 1.1.1-04

NEA-IRT, Seiten 15 – 16:

Die Nagra hat die Barrieren gegen den Radionuklidtransport, die durch die Rahmengesteine über und unter dem Opalinuston gebildet werden, nicht in ihren Referenzfall einbezogen. Sie hat jedoch die potenziellen Vorteile der Berücksichtigung des Transports durch diese Barrieren aufgezeigt. Das IRT betrachtet dies als potenziell nützlichen Reserve-FEP und ermutigt die Nagra zu weiteren Studien zur Charakterisierung dieser Schichten, falls der Entscheid gefällt würde, das schweizerische Programm auf den Opalinuston des Zürcher Weinlands auszurichten.

Weitere Untersuchungen der Eigenschaften der Rahmengesteine würden mehrere Zwecke erfüllen. Als erstes könnte damit das Verständnis der Transportpfade in die Biosphäre verbessert werden, insbesondere der horizontale Transport durch die höherdurchlässigen Schichten. Als zweites würde dies der Nagra erlauben, die Barrierenfunktion der Rahmengesteine in die Referenzkonzeptualisierung mit einzubeziehen. Drittens müssen die Rahmengesteine für die Auslegung und die technischen Arbeiten in ausreichendem Masse charakterisiert werden, um zu gewährleisten, dass der Lagerbau gefahrlos durch diese Schichten vorangetrieben werden kann.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, wird im Rahmen der standort-spezifischen Untersuchungen im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration der Charakterisierung der geringdurchlässigen Rahmengesteine für zukünftige Sicherheitsanalysen besondere Beachtung geschenkt, so dass ihre Barrierenwirkung im Rahmen zukünftiger Sicherheitsanalysen quantifiziert werden kann. Zusätzlich sind für die bautechnische Realisierung von Schacht und Zugangstunnel (Rampe) bei den geplanten Felduntersuchungen detaillierte felsmechanische und hydraulische Untersuchungen (in-situ und an Bohrkernen) vorgesehen. Dies betrifft sowohl die geringdurchlässigen Rahmen- als auch die höher durchlässigen Nebengesteine, die mit dem Tunnel und dem Schacht durchfahren werden.

Empfehlung Nr. 1.1.1-05*HSK, Seiten 40 – 41:*

Die Nagra [...] ordnet dem Sandsteinkeuper eine mittlere Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-9}$ m/s zu. Der Einfluss höherer Durchlässigkeiten wurde im Rahmen hydrodynamischer Modellierungen untersucht. Die HSK beurteilt dieses Vorgehen als vertretbar und den begrenzten Datengrundlagen angemessen, aus Konservativitätsgründen empfiehlt sie aber, im Referenzfall vom höheren K-Wert, wie er in der Bohrung Benken gemessen wurde, auszugehen.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen der Geosynthese wurde der Sandsteinkeuper als lokaler Aquifer mit einer hydraulischen Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-9}$ m/s (Referenzfall) klassifiziert. Die Annahme einer höheren Durchlässigkeit hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasser-Zirkulationsverhältnisse in Wirt- und Rahmengesteinen. Ausnahme: Steilstehende Störung mit erhöhter Transmissivität (z.B. Neuhauser Störung, 10^{-8} m²/s).

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, sind im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration zusätzliche Bohrungen am Standort vorgesehen (Hydrotests, Permeametertests an Kernen, Langzeitbeobachtungen, Entnahme Wasserproben), die u.a. erlauben sollten, die hydrogeologische Bedeutung des Sandsteinkeupers besser festzulegen.

In den Analysen zum Rahmenbewilligungsgesuch werden die empfohlenen Rechnungen mit höheren K-Werten berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 1.1.1-06*HSK, Seiten 42 – 43:*

Die Fliessverhältnisse im Wedelsandstein sind nach Ansicht der HSK wegen der geringen Datenbasis noch ungeklärt. Bis heute fehlen klare Evidenzen, um die hydraulische Rolle des Wedelsandsteins und die Fliessverhältnisse im weiteren Untersuchungsgebiet belastbar aufzeigen zu können. Die Daten der Bohrung Benken weisen darauf hin, dass im Wedelsandstein stagnierende saline Wässer vorliegen, die sich in die Diffusionsprofile der natürlichen Tracer (Chlorid, stabile Wasserisotopen, Edelgase) einordnen lassen. Inwieweit diese Ergebnisse lokale Verhältnisse widerspiegeln, lässt sich heute nicht beurteilen. Es können somit noch keine abschliessenden Schlüsse über die regionalen Fliessverhältnisse im Wedelsandstein gezogen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, sind im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration zusätzliche Bohrungen am Standort vorgesehen (Hydrotests, Permeametertests an Kernen, Langzeitbeobachtungen, Entnahme von Wasserproben), die es u.a. erlauben sollten, die hydrogeologische Bedeutung des Wedelsandsteins besser zu erfassen.

Empfehlung Nr. 1.1.1-07

HSK, Seite 49 und KNE, Seite E 8:

HSK: Aus dem Übergangsbereich zwischen den oberen Rahmengesteinen und dem Malm-Aquifer (396 m bis 446 m) liegen keine Porenwasseruntersuchungen vor. Dadurch ist der Übergang zum Malm-Aquifer über eine Strecke von 50 m hin experimentell nicht belegt. Bei künftigen Bohrungen sollte dieser Gesteinsbereich in die Untersuchungen miteinbezogen werden.

KNE: Aus dem Übergangsbereich zwischen den oberen Rahmengesteinen und dem Malmaquifer liegen keine Porenwasseruntersuchungen vor. Dadurch ist der Übergang zum Malmaquifer hin experimentell kaum belegt. Der Gradient der isotopischen Zusammensetzung in Richtung Malm scheint klein zu sein, was zeigt, dass der vertikale Transport nach oben schwach ist. Dies erlaubt der Interpretation, die Datenlücke durch Variation der getroffenen isotopengeochemischen Annahmen (Aquifer als isotopengeochemischen Randbedingungen) zu überbrücken. Dies ist der einzige gangbare Weg zur Interpretation, kann jedoch nicht das Fehlen der Daten kompensieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Porenwasseruntersuchungen in der Bohrung Benken waren damals ein Pionierprojekt. Nachdem erste Proben aussagekräftige Ergebnisse geliefert hatten, wurde das Profil anhand von Rückstellproben soweit wie möglich verdichtet, wobei im obersten Bereich der Rahmengesteine keine adäquat konditionierten Proben mehr vorhanden waren. Der Übergangsbereich obere Rahmengesteine – Malm-Aquifer wird aber in künftigen Bohrungen detaillierter untersucht werden. Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch zusätzliche Bohrungen im Standortgebiet durchgeführt. Es werden neben Porenwasseruntersuchungen auch Hydrotests und Wasserprobenentnahmen durchgeführt (z.B. im Malm-Aquifer, und – falls in den Rahmengesteinen Bereiche mit erhöhter Durchlässigkeit erbohrt werden – auch in den Rahmengesteinen), um die hydrogeologische Bedeutung der Rahmengesteine besser erfassen zu können.

Empfehlung Nr. 1.1.1-08

NEA-IRT, Seite 34:

Das IRT stellt fest, dass die Nagra bisher nur eine einzige Sondierbohrung (Benken) in den Opalinuston des Zürcher Weinlands abgeteuft hat. Es wird erwartet, dass zusätzliche Abklärungen vorgenommen werden, bevor die Charakterisierung des Referenzstandortes mit Arbeiten unter Tag bestätigt und damit auch die notwendigen Informationen für eine detaillierte Planung der Anlage vorliegen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und die zukünftige untertägige Exploration zusätzliche Standortuntersuchungen mit vertikalen und/oder geneigten Bohrungen zur Charakterisierung von vertikalen/lateralen Heterogenitäten der Wirtgesteinseigenschaften und zur Abschätzung der Ungewissheiten in den Parameterwerten durchgeführt. Dazu gehört auch die Erfassung wichtiger Zustandsgrössen (Porenwasserdruck, Gebirgsspannung).

Empfehlung Nr. 1.1.1-09*KNE, Seite H 3:*

Wir erachten die Frage der Porenwasserspannungen bzw. der Süsswasserdruckhöhen im OPA und den Rahmengesteinen zum heutigen Zeitpunkt als weitgehend ungelöst. Angesichts der geringen Bedeutung des advektiven Flusses für die Langzeitsicherheit kann diese Unsicherheit zum heutigen Zeitpunkt toleriert werden. Im Hinblick auf das Systemverständnis besteht jedoch ein zukünftiger Bedarf nach weiteren Abklärungen durch in situ Beobachtungen.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, sind im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch bzw. die untertägige Exploration zusätzliche standortbezogene Untersuchungen in Wirt- und Rahmengesteinen mit vertikalen und/oder geneigten Bohrungen vorgesehen. Diese umfassen u.a. Packertests zur Ermittlung der hydraulischen Durchlässigkeit und des Formationsdrucks, Permeametertests an Kernproben zur hydromechanischen Charakterisierung (Porosität, Permeabilität, Speicherkoeffizient) sowie Langzeitbeobachtungen der Druckhöhen zur Konsistenzprüfung. Zurzeit sind Arbeiten im Gange, das Langzeitbeobachtungssystem der Bohrung Benken zu verbessern.

Empfehlung Nr. 1.1.1-10*KNE, Seite D 6:*

Wir teilen die im Bericht vertretene Meinung, dass weitergehende Abklärungen mit punktuellen Bohrungen die Datenbasis nur unwesentlich verbessern würden und dass in einer nächsten Projektphase vor allem mit grossräumigen untertägigen Erkundungen (Stollen, Felslabor) in Verbindung mit Bohrungen die für die Charakterisierung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine notwendigen Datengrundlagen erhoben werden sollen. Das untertägige Erkundungsprogramm sollte dabei in einer Vorbereitungsphase ein vorgängiges Bohrprogramm vorsehen, mit welchem dann die hydraulischen Auswirkungen des Felslaborbaus verfolgt und aufgezeigt werden (Monitoringprogramm). [...]

Eine Erweiterung und Vervollständigung des Datensatzes wird in der nächsten Projektphase (weitere Bohrungen, untertägiges Erkundungsprogramm mit Felslabor am ausgewählten Standort, Monitoringbohrungen) erfolgen müssen, um die erforderlichen Beurteilungsgrundlagen zu den noch offenen Fragen zu liefern. Insbesondere wird die Rolle der Rahmengesteine des Opalinustons noch vertiefter zu klären sein.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, sind stufengerecht zusätzliche standortbezogene Untersuchungen in Wirt- und Rahmengesteinen geplant sowohl mit Bohrungen als auch mit Untersuchungen Untertag. Die Resultate dieser Untersuchung dienen dazu, den existierenden Datensatz zu ergänzen. Die Untersuchungen mit Bohrungen von der Oberfläche schliessen auch Untersuchungen der Rahmengesteine ein.

Weiter wird für das Rahmenbewilligungsgesuch ein Monitoringkonzept ausgearbeitet, dessen Umsetzung die hydraulischen Auswirkungen des Baus des Zugangs zum untertägigen Lagerbereich, des Baus des Felslabors und des späteren Lagerbaus zu beobachten erlaubt; das Monitoringkonzept wird anschliessend stufengerecht verfeinert. Vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.3.1-08.

Empfehlung Nr. 1.1.1-11*HSK, Seite 86:*

Nach Ansicht der HSK erfolgte die Bestimmung der Spannungsverhältnisse entsprechend dem Stand der Technik. Das vom Spannungszustand gewonnene Bild steht im Einklang mit den bisherigen Datensätzen der Nordschweiz. Die Anordnung der Lagerstollen ist aus heutiger Sicht zweckmässig und für den Machbarkeitsnachweis genügend. Sollte das Tiefenlager im Zürcher Weinland realisiert werden, müsste der ermittelte in-situ-Spannungszustand vor Baubeginn validiert werden.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt wird, werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch bzw. die untertägige Exploration zusätzliche standortbezogene Untersuchungen im Wirtgestein mit vertikalen und/oder geneigten Bohrungen durchgeführt. Diese umfassen auch weitere In-situ-Spannungsmessungen (Frac-Tests, Erfassung der Bohrlochrandausbrüche). Zusätzlich wird im Rahmen eines Versuchs im Felslabor Mont Terri (DS-Versuch) zurzeit ein neues konzeptuelles Programm zur Ermittlung des Spannungsfelds getestet (Kombination aus regionaler Modellierung und punktuellen Messungen), das im Erfolgsfall auf das Standortgebiet übertragen wird.

Empfehlung Nr. 1.1.1-12*KNE, Seite C 3:*

Im Standort-Nachweis sind bestimmte genetische Aspekte und Korrelationen zwischen geotechnischen Eigenschaften und Lithologie nicht umfassend erörtert, das stellt die Eignung des Gesteins nicht in Frage, aber eine Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte könnte nützlich sein. [...]

Empfehlungen:

- [...] Eine genetische, prozessorientierte Interpretation sollte feinskalige, also einzelne Sandlagen und auch gross-skalige, also in Abfolgen gruppierte lithologische Variationen (etwa 2-8 m mächtige "Dachbank"-Zyklen, wie sie aus anderen Bohrungen und aus dem Hangenden bekannt sind) umfassen und deren geometrische und räumliche Aspekte berücksichtigen. Derartige zusätzliche Untersuchungen würden bei eventuellen Baumassnahmen eine Optimierung ermöglichen.

- Analyse der Sedimentverteilung unter Berücksichtigung der während der Ablagerung des Opalinuston aktiven tektonischen Trennflächen.
- Die Zuordnung von wichtigen geotechnischen Eigenschaften zur Lithologie sollte noch stärker herausgearbeitet werden, um die Prognostizierbarkeit innerhalb des Opalinustons zu verbessern. Eine Korrelation lithologischer, geotechnischer und bohrlochgeophysikalischer Daten (Messungen derselben Proben mit bekanntem Bezug zur Umgebung) würde auch eine Übertragbarkeit von Daten aus dem Felslabor Mont Terri verbessern.

Stellungnahme der Nagra:

Die Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeiten vom Wassergehalt (im gesättigten Zustand auch von der Porosität) und von der Mineralogie (v.a. Tongehalt) wurde bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises aufgezeigt (vgl. Nagra 2002b, Kap. 5.7). Im Zuge der weiteren Standortuntersuchungen wird der felsmechanische Datensatz stufengerecht erweitert, und u.a. wird die Abhängigkeit der felsmechanischen Eigenschaften von der lithologischen Beschaffenheit, resp. von der stratigrafischen Zuordnung weiter abgeklärt.

Obwohl einer Optimierung von Baumassnahmen im Opalinuston sehr enge Grenzen gesetzt sind (die Lagerstollen sollen zur optimalen Nutzung der Barriere etwa in der Mitte des Opalinustons platziert werden), wurden bzw. werden die genannten Aspekte in Studien im Felslabor Mont Terri (z.B. Klinkenberg et al. 2007, Klinkenberg 2008) sowie an geophysikalischen Bohrlochmessungen und an Kernen neuer Bohrungen untersucht, um das Prozessverständnis auf den Gebieten Felsmechanik, Strukturgeologie, Lithologie, Mikrostruktur und Hydrogeologie zu verbessern (vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.2.2-01). Die neuen Erkenntnisse werden in die Berichterstattung zu einem allfälligen Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

Empfehlung Nr. 1.1.1-13

HSK, Seite 68:

Die glaziale Tiefenerosion im Gebiet des Zürcher Weinlands ist für die Ausarbeitung der Langzeitszenarien wichtig. Die Erforschung der glazialen Tiefenerosion (Quartärgeologie) entwickelt sich zurzeit rasant und wird neue Erkenntnisse bringen; es ist darum sinnvoll, die Fortschritte zu verfolgen. Im Falle der Weiterführung des Projekts eines Tiefenlagers im Zürcher Weinland sollte die Nagra im Gebiet der grossen glazialen Übertiefung des unteren Thurtales eine speziell auf die Problematik der dortigen Talgeschichte angesetzte Bohrung abteufen, um weitere Informationen über den Mechanismus der Tiefenerosion zu gewinnen.

Stellungnahme der Nagra:

Im Falle einer Weiterführung des Projekts im Zürcher Weinland ist in späteren Phasen (entweder im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch oder später) eine Bohrung im Gebiet der glazialen Übertiefung des unteren Thurtales geplant. Zuvor findet eine Evaluation der neuesten Datierungsmethoden im Rahmen der Forschungsbohrung Wehntal statt (vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.2.1-12).

1.2 Regionale geologische Untersuchungen

1.2.1 Langzeitentwicklung und Langzeitstabilität

Empfehlung Nr. 1.2.1-01

HSK, Seite 20:

Einige Aspekte der regionalen geologischen Entwicklung [sind] weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Es dürfte somit in Zukunft mit neuen Interpretationen zu rechnen sein.

Stellungnahme der Nagra:

Durch enge Kontakte mit der Fachwelt (Universitäten, Forschungsinstitute) wird gewährleistet, dass in den zukünftigen Projektberichten jeweils der neueste Stand der Kenntnisse dokumentiert ist. Zudem beteiligt sich die Nagra an laufenden Messprogrammen zur geodynamischen Entwicklung der Schweiz und angrenzender Gebiete (Präzisionsnivellement, GPS, Seismizität). Die neuen Daten werden periodisch analysiert und interpretiert.

Empfehlung Nr. 1.2.1-02

HSK, Seite 60:

Die HSK regt für die zukünftigen Arbeiten an, dass mit weiteren Untersuchungen (Paläomagnetik, Datierung mit Kleinsäugerresten) die Abläufe der Sedimentation und Erosion zeitlich feiner erfasst werden, damit die wichtigen Daten zur Hebung des Gebietes noch besser abgestützt werden können.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen des Projekts Bohrung Wehntal werden neben gängigen Datierungsverfahren (Palynologie, Invertebratenreste, Paläomagnetik) neueste Datierungsmethoden der Quartärgeologie (optisch stimulierte Lumineszenz, kosmogene Nuklide) angewendet. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen werden für die im Rahmen des Sachplanverfahrens festgelegten Standorte in Zusammenarbeit mit Spezialisten von Schweizer Hochschulen spezifische regionale Untersuchungsprogramme ausgearbeitet und anschliessend umgesetzt (teilweise für Rahmenbewilligungsgesuch, teilweise in späteren Phasen).

Empfehlung Nr. 1.2.1-03

HSK, Seite 62:

Für die HSK ist die Annahme einer andauernden Hebung des Zürcher Weinlandes um 0.1 mm/a für den Entsorgungsnachweis vernünftig. In der Stellungnahme der KNE wird der Wert als konservativ bezeichnet (KNE 2005). Wie erwähnt, sind einige Aspekte zurzeit noch Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Es ist deshalb angebracht, dass der Fortschritt [im Hinblick auf Hebungen und Hebungsraten] beobachtet und neue Entwicklungen in die Langzeitanalysen eingearbeitet werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Ergebnisse der ersten Präzisionsnivellement-Messkampagne nach dem Entsorgungsnachweis sind in einem Bericht dokumentiert (Schlatter 2007), ebenso die Auswertung der Messkampagnen im süddeutschen Raum (Zippelt & Dierks 2007). Eine integrale Gesamtmodellierung der beiden Datensätze findet in naher Zukunft statt.

Empfehlung Nr. 1.2.1-04

KNE, Seiten A 10 und B 4:

Seite A 10: Für eine stichhaltige Beckenmodellierung und genauere Herleitung der Hebungs- und Erosionsraten müssen in künftig abzuteufenden Tiefbohrungen noch weitere systematische Maturitäts-, Diagenese- und Apatitspaltspuranalysen durchgeführt werden.

Seite B 4: Eine gewisse Unsicherheit besteht in der Festlegung des Wendepunktes zwischen Absenkung und Hebung vor rund 10 Millionen Jahren. Die Einengung erfolgte einerseits durch die bekannten Alter der jüngsten Ablagerungen der Oberen Süsswassermolasse (ca. 12 Millionen Jahre, Bolliger 1998). Sichere Altersangaben (z.B. Datierung mit Kleinsäugern) für noch jüngere Ablagerungen der Oberen Süsswassermolasse fehlen.

Stellungnahme der Nagra:

Eine weiterführende Beckenmodellierung mit grösserer Datenbasis wurde bereits durchgeführt (Mazurek et al. 2006; vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.2.2-03). Es ist vorgesehen, in zukünftigen Bohrungen weitere Daten betreffend Maturität des organischen Materials zu erheben sowie Diagenesestudien (inkl. Fluideinschlüsse) und Apatitspaltspuranalysen durchzuführen.

Eine Datierung der jüngsten Ablagerungen der OSM ist durch Rahn & Selbekk (2007) aufgrund von Altersbestimmungen an Hegau-Tuffiten und einer vergleichenden Analyse der neuesten Literatur erfolgt. Es wird nicht erwartet, dass weitere Arbeiten auf diesem Gebiet wesentliche neuere Erkenntnisse bringen, d.h. die Nagra hat keine weiteren Arbeiten zur Datierung der jüngsten OSM-Sedimente vorgesehen.

Empfehlung Nr. 1.2.1-05

KNE, Seite B 3:

Die geodätischen Messungen erfassen nur einen sehr kurzen Zeitabschnitt des heutigen geologischen Geschehens. Allerdings gibt es in gewissen Schlaufen des untersuchten Gebietes bereits mehrere Wiederholungsmessungen, so dass Resultate über einen längeren Zeitabschnitt vorliegen. [...] Um die Qualität dieser Werte weiter zu verbessern und die Zuverlässigkeit der Aussagen zu festigen, wird empfohlen, die Messung der Schlaufen der Nordostschweiz etwa in den Jahren 2008-2010 erneut zu wiederholen.

Stellungnahme der Nagra:

Zusätzlich zu einer Wiederholungskampagne (Zeitpunkt wird in Absprache mit Swisstopo festgelegt) ist vorgesehen, die Daten der GPS-Permanentstationen auszuwerten und allenfalls neue Permanentstationen zu errichten.

Empfehlung Nr. 1.2.1-06

KNE, Seite A 10:

[Bei dem von der Nagra abgeleiteten geodynamischen Modell] handelt es sich jedoch um ein empirisches Modell, das aufgrund zusätzlicher geologischer Erkenntnisse in Zukunft weiter entwickelt werden muss.

Das Langzeitszenarium der Nagra basiert auf der Annahme eines „anhaltenden alpinen Fernschubes“. Verschiedene, einfühend diskutierte Beobachtungen und Daten sprechen eher für ein Ausklingen der alpinen NNW-SSE-Kompression und eine anhaltende WSW-ENE gerichtete Extension des alpinen Vorlands, tangential zum Alpenbogen. Der Referenzfall der Sicherheitsanalyse sollte eigentlich von diesem realistischen Szenarium ausgehen und erst in einem zweiten Schritt mögliche Konsequenzen von extremen Szenarien wie z.B. des „anhaltenden alpinen Fernschubes“ betrachten.

Stellungnahme der Nagra:

Der Wissensstand betreffend geodynamisches Modell wird durch folgende Massnahmen auf dem aktuellen Stand gehalten:

- Enge Kontakte mit der wissenschaftlichen Fachwelt (Hochschulen, Grossprojekte)
- Beteiligung an GPS-Messungen (Förderung von Permanentstationen) und Datenauswertung (Wiget et al. 2007)
- Beteiligung an Präzisionsnivellements und Datenauswertung (Schlatter 2007, Zippelt & Dierks 2007)
- Beteiligung an Überwachung der Seismizität und Datenauswertung (SED Jahresberichte)
- Beteiligung an der Entwicklung neuer numerischer Gebirgsbildungsmodelle im Hinblick auf eine verbesserte Prognose der geologischen Langzeitentwicklung

Empfehlung Nr. 1.2.1-07

KNE, Seite A 10:

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen [...] ist es sinnvoll, ergänzende Untersuchungen auch in der nördlich angrenzenden Region durchzuführen. Die Beobachtungen zur aktiven Tektonik im Gebiet des Hegau-Bodensee-Grabens sind teilweise noch lückenhaft. Für das Verständnis der regionalen Tektonik sollte dieses Gebiet ebenfalls in die Untersuchung miteinbezogen werden: Abklärung der Entwicklungsgeschichte der Grabenzone, zusätzliche Nivellementmessungen, ergänzende Untersuchungen zur Quartärgeschichte, Analyse der Herdflächenmechanismen rezenter Erdbeben.

Stellungnahme der Nagra:

Die geologische Entwicklung des Hegau-Bodensee-Grabens wird aufgrund einer Literaturstudie dokumentiert. Der Datensatz des Präzisionsnivellements wurde durch eine Zusammenarbeit mit deutschen Fachkollegen im Bereich des Hegau-Bodensee-Grabens erweitert (Details vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.2.1-03). Im Rahmen des laufenden Gemeinschaftsprojekts mit dem Schweizerischen Erdbebendienst werden auch Erdbeben-Herdmechanismen aus sog. Herdflächenlösungen bestimmt.

Empfehlung Nr. 1.2.1-08

HSK, Seite 29:

Die KNE regt an (KNE 2005), dass im Rahmen zukünftiger Arbeiten nach Möglichkeit Untersuchungen in den nördlich angrenzenden Gebieten durchgeführt werden. Insbesondere sind Studien zur Entwicklungsgeschichte des heute noch tektonisch aktiven Hegau-Bodensee-Grabens zum besseren Verständnis dieses Gebiets angesprochen. Die HSK schliesst sich dieser Anregung an.

Stellungnahme der Nagra:

Der Kenntnisstand der geologischen Entwicklung des Hegau-Bodensee-Grabens wird aufgrund einer umfassenden Literaturstudie in einem Bericht dokumentiert. Die Arbeiten sind im Gang, vgl. auch andere Stellungnahmen in diesem Themenbereich.

Empfehlung Nr. 1.2.1-09

HSK, Seite 74:

Die Nagra hat in den Sicherheitsanalysen die radiologischen Auswirkungen beim völligen Versagen der Behälter berechnet („what if case“). Sie hat dabei aufgezeigt, dass auch in diesem Fall das Dosisziel eingehalten wird. Dennoch wäre es aus Sicht der HSK sinnvoll, den Vorgang der erdbebeninduzierten Bruchbildung durch einen Lagerstollen genauer zu untersuchen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass bei erkannten Störungszonen im Bereich der Lagerstollen keine Behälter eingelagert werden.

Stellungnahme der Nagra:

Bruchbildungen, welche durch Erdbeben induziert (getriggert) werden, erfolgen in erster Linie im Nahbereich der aktiven Störung, welche den Erdbebenherd darstellt. Aus diesem Grund wird bei einem Lager ein angemessener Sicherheitsabstand (*respect distance*) zu potenziell aktiven Störungen eingehalten, damit dieser Fall mit grösster Wahrscheinlichkeit nicht eintritt. Der Fragenkreis der Möglichkeit und Auswirkung von erdbebeninduzierter Bruchbildung durch die Lagerstollen wird für das Rahmenbewilligungsgesuch evaluiert.

Die Auswirkungen von Erdbeben auf die Bruchbildung in direkter Nähe von aktiven Störungen lassen sich am Besten in seismisch aktiven Gebieten studieren. Die Nagra hat vorgesehen, die einschlägige Literatur periodisch zu analysieren und die Konsequenzen im Hinblick auf die spezifischen Verhältnisse an einem potenziellen Standort zur gegebenen Zeit abzuschätzen.

Empfehlung Nr. 1.2.1-10

KNE, Seite B 3:

Die geomorphologische Studie beruht auf einer minutiösen Analyse der Quartären Abfolgen in der Nordschweiz (Graf 1993) [...]. Leider steht im Untersuchungsgebiet nur eine einzige zuverlässige Datierung für die Zeit zwischen 1 und 2.6 Millionen Jahren zur Verfügung (Bolliger et al. 1996). Somit sind viele Annahmen über die Dauer von Kalt- und Warmzeiten offen. Die relativen Abfolgen sind gut dokumentiert. Es wäre wünschenswert, die Abfolge durch weitere Datierungen zu bestätigen. Dies bedingt wohl ein umfangreiches Projekt (Magnetik, evt. Kleinsäuger), es ergäbe sich dann die Möglichkeit, die Wechsel der Glazial- und Interglazialzeiten feiner zu erfassen und damit die Aussagen über vertikale Bewegungsraten zu festigen.

Stellungnahme der Nagra:

Diese Aspekte werden im Rahmen verschiedener, an anderer Stelle detailliert erläuterter Forschungsarbeiten abgeklärt (vgl. Stellungnahmen zu den Empfehlungen Nr. 1.1.1-13, 1.2.1-02 und 1.2.1-12).

Empfehlung Nr. 1.2.1-11

KNE, Seiten B 5, B 6 und B 8:

Seite B5: Wegen der mangelnden Kenntnis der exakten zeitlichen Abläufe der Klimaentwicklung in den letzten 2 Millionen Jahren gibt es Unsicherheiten in den zeitlichen Prognosen. [...]

Zur Präzisierung der Altersbeziehungen sollte also versucht werden, weitere gute Datierungen der verschiedenen Phasen zu erhalten. Dies ist besonders wichtig, um die Geschichte der übertieften Täler besser zu verstehen. Haben auch die jüngsten Vorstöße bis auf den Fels erodiert oder erfolgte die stärkste Tiefenerosion in einer der früheren Eiszeiten und wenn ja in welcher? Auf dieses Ziel ist die künftige Forschung auszurichten (Magnetik, Säuger, Isotopen).

Seite B6: Es wird nicht klar ausgeführt, warum nicht auch eine Eiszeit mit grösserer Ausbreitung und Eismächtigkeit der Gletscher im Vorland möglich sein soll als die bisher maximale vor mind. 300'000 Jahren. Die Wahrscheinlichkeit und die möglichen Auswirkungen eines solchen Falles sollten diskutiert werden. [...]

Aus den oben erwähnten Punkten geht hervor, dass der zeitliche Ablauf der Glazialgeschichte, seine Zyklizität sowie die Sedimentations- und Erosionsabläufe noch besser verstanden werden sollten. Insbesondere ist es wichtig zu wissen, ob Gletscher bei jeder Eiszeit den Untergrund bis auf den Fels erodiert haben, oder ob die grossen Übertiefungen auf einmalige Situationen zurückzuführen sind. Diese Fragen müssen im Rahmen künftiger Forschungsprogramme geklärt werden (Bohrungen im Thurtal und vergleichbaren übertieften Tälern, Datierung und Charakterisierung der glazialen und interglazialen Sedimente sowie Rekonstruktion der Erosions- und Ablagerungsgeschichte).

Seite B 8: Wie schon oben erwähnt, ist für die Absicherung der in den Szenarien gemachten Aussagen eine bessere Kenntnis der Entstehungsgeschichte und Füllung der übertieften Täler im Alpen-Vorland notwendig. [...] Der Frage der Erosions- und Sedimentationsgeschichte in den einzelnen übertieften Tälern muss in den nächsten Jahren noch vertieft und standortbezogen nachgegangen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Diese Aspekte werden im Rahmen der vielfältigen Forschungsarbeiten zur glazialen Tiefenerosion abgeklärt. Vgl. weitere Stellungnahmen zu diesem Themenbereich.

Empfehlung Nr. 1.2.1-12

KSA, Seite 56:

Die KSA weist deshalb darauf hin, dass bei der Weiterführung des Programms der Frage der Glazialerosion einerseits durch entsprechende Forschung Rechnung getragen werden soll. Dabei handelt es sich im weiteren regionalen Rahmen um eine generische, nicht aufs Thurtal beschränkte Frage.

Stellungnahme der Nagra:

Es wurde ein digitales Höhenmodell der Felsoberfläche des zentralen und östlichen Mittellands und des Hochrheingebiets erstellt, um ein regionales Bild der glazial gebildeten, z.T. übertieften Felsrinnen zu erhalten (vgl. Jordan 2007).

Ab 2008 finanziert die Nagra ein Post-Doc-Projekt, in welchem das Prozessverständnis der glazialen Tiefenerosion vertieft werden soll. In einem ersten Schritt werden die weltweit durchgeführten Forschungsarbeiten (inkl. Modellierungsarbeiten) zusammengestellt und analysiert (State-of-the-Art Bericht). Anschliessend werden Vorschläge für Projekte ausgearbeitet, welche zu einer weiteren Vertiefung des Prozessverständnisses führen. Betreuer: Prof. W. Haerberli (Universität Zürich) und Prof. F. Schlunegger (Universität Bern).

Zudem beteiligt sich die Nagra an einer Forschungsbohrung (wichtigste beteiligte Institutionen und Büros: Universität und ETH Zürich, Universität Bern, EAWAG, Büro Matousek, Baumann & Niggli AG) im Wehntal, in welcher die prä-Würm Klima- und Vereisungsgeschichte der Nordschweiz weiter abgeklärt wird. Eine Beteiligung an weiteren Forschungsbohrungen in die Quartärfüllung von glazial übertieften Tälern sowie Forschungsarbeiten im Hinblick auf die Datierung von Schotterterrassen sollen ebenfalls aktiv weiterverfolgt und unterstützt werden.

Nach der Festlegung der Standorte im Rahmen des Sachplanverfahrens sind auch Bohrungen in allenfalls vorhandenen übertieften Tälern im Umfeld der Standorte vorgesehen.

Empfehlung Nr. 1.2.1-13

HSK, Seiten 68 und 81:

Seite 68: In seinen Schlussfolgerungen äussert sich Haerberli (2004) auch zur Frage der Bildung neuer Erosionstäler. Er kommt zur Einschätzung, dass unter den zuvor geschilderten Bedingungen die zu erwartende selektiv-lineare Erosion im polythermalen Eisrandbereich die Entstehung völlig neuer Wege der Tiefenerosion im Zürcher Weinland wenig wahrscheinlich macht. Die grössten Unsicherheiten bestehen bei der Tiefenwirkung der subglazialen Grundwasserzirkulation im Randbereich des polythermalen Gletschers und bei der linear konzentrierten subglazialen Schmelzwassererosion (klammartige Rinnen). Diese Phänomene sollten bei den weiteren Untersuchungen vertieft abgeklärt werden.

Seite 81: Die Vorgänge der glazialen Tiefenerosion sollen eingehender abgeklärt werden, damit die Möglichkeiten der zukünftigen Auswirkungen durch Modellierungen besser eingegrenzt werden können.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen eines Post-Doc-Projekts werden entsprechende Projektvorschläge zur Vertiefung des Prozessverständnisses der glazialen Tiefenerosion ausgearbeitet. Anschliessend werden diese Vorschläge evaluiert und (teilweise) durchgeführt, z.B. Aufbau von Erosionsmodellen und deren Anwendung auf das Alpenvorland, Beschaffung weiterer Daten aus Quartärfüllungen von übertieften Felsrinnen.

Empfehlung Nr. 1.2.1-14

KSA, Seite 56:

Andererseits soll bei der Standortwahl die Möglichkeit des Ausweichens in Gebiete mit geringer Talbildung geprüft werden.

Stellungnahme der Nagra:

Dieser Aspekt wird im Rahmen der Etappe 1 des Sachplans Geologische Tiefenlager bei der Einengung und Bewertung möglicher Gebiete auf Basis der neuen Felsisohypsenkarte (vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.2.1-12) berücksichtigt (vgl. Grundlagen in Jordan 2007).

1.2.2 Allgemeine Geologie**Empfehlung Nr. 1.2.2-01**

HSK, Seite 23:

Im Opalinuston treten lithologische Variationen auf, die ihre Ursache in sedimentären und diagenetischen Vorgängen haben. Eine genetische Interpretation dieser Variationen fehlt im Entsorgungsnachweis weitgehend. Sie könnte die Prognosen hinsichtlich der Geometrie und Verbreitung dieser Lagen verbessern und die stratigraphische Korrelation zwischen Bohrungen und Stollen erleichtern.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra unterstützt eine Weiterführung der von Prof. A. Wetzel begonnenen sedimentologischen Korrelationen aufgrund von Gammalogs. Es sind sedimentologisch ausgerichtete Interpretationen von verschiedenen bohrlochgeophysikalischen Logs im Bereich von Kernstrecken im Opalinuston sowie Untersuchungen an Aufschlüssen vorgesehen (v.a. Nagra-Tiefbohrungen Benken, Weiach, Riniken, Schafisheim), die in die Berichterstattung zu einem allfälligen Rahmenbewilligungsgesuch einfließen werden.

Empfehlung Nr. 1.2.2-02

KSA, Seite 53:

[...] bei der Weiterführung des Programms [sollen] die lateralen Veränderungen der lithologischen Eigenschaften des Wirtgesteins und der Rahmengesteine über das Zürcher Weinland hinaus, namentlich im nördlichen Mittelland und im Tafeljura, präzisiert werden.

Stellungnahme der Nagra:

Falls der Opalinuston weiter verfolgt wird, werden die Daten aus Untersuchungen Dritter aus der Region (z.B. Oberflächenaufschlüsse, Geothermieprojekte, Tunnelbauprojekte) systematisch gesammelt und evaluiert.

Empfehlung Nr. 1.2.2-03

HSK, Seite 24-25:

Die maximale Paläotemperatur ist eine wichtige Grösse bei der Beurteilung der Barriereigenschaften des Wirtgesteins. Deshalb hat die HSK die Untersuchungen zur Versenkungsgeschichte durch die KNE begutachten lassen. Die KNE stellt fest, dass die Untersuchungen umfassend und aufwendig durchgeführt worden sind. Die verschiedenen Methoden liefern aufgrund der unterschiedlichen experimentellen Auslegung keine identischen Ergebnisse, deshalb sind auch die Aussagen der Nagra nicht ganz widerspruchsfrei. Die Spaltspurenanalyse einer Kristallin-Probe aus der Bohrung Benken ergab eine ähnliche Paläotemperatur wie Proben aus

vergleichbarer Tiefenlage an den Flanken des südlichen Rheintalgrabens. Der Probe aus Benken kann deshalb eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden. Die Temperatur von 95° - 105°C für die 400 m tiefer als der Opalinuston entnommene Probe entspricht einer Temperatur von 75° - 85°C für den Opalinuston. Mit der heutigen Datenlage kann diesem Wert der maximalen Temperatur des Opalinustons eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Zur Abschätzung der maximalen Paläotemperatur im Opalinuston wurden methodische Weiterentwicklungen auf einen bedeutend grösseren Datensatz als im Entsorgungsnachweis angewendet. Der postulierte Bereich von 80 – 90°C wird dadurch erhärtet. Einzelne Interpretationsansätze führen auch zu leicht höheren Temperaturen, was günstig bewertet wird (vgl. dazu Mazurek et al. 2006).

Die Arbeiten werden fortgesetzt, sobald sich neue Gelegenheiten zur Erweiterung der Datenbasis ergeben.

Empfehlung Nr. 1.2.2-04

KNE, Seite C 4:

Die Darstellung der Paläotemperatur-Geschichte im Standort-Nachweis gibt die angewandte methodische Vielfalt wider; die Aussagen sind aus oben genannten Gründen nicht ganz ohne Widerspruch. Nachfragen ergaben mehr Klarheit und die Nagra bestätigte, dass weitere Untersuchungen zu diesem essentiellen Parameter [der Abschätzung der maximalen Paläotemperatur] durchgeführt werden. [...]

Empfehlungen:

- Abgleich der verschiedenen Datensätze zur Paläo-Temperaturgeschichte und [ein] Versuch der Erklärung/Modellierung der Abweichungen voneinander, um einen verlässlichen Maximalwert für den Opalinuston zu erhalten. Eine breitere Variation der Prämissen hinsichtlich der geologischen Geschichte sollte bei weiteren Modellierungen in Betracht gezogen werden.
- Alternativ wäre an eine Gebinde-Auslegung zu denken, bei der die maximale Paläo-Temperatur nicht überschritten wird.

Stellungnahme der Nagra:

Die Behälterbeladung (bzw. die maximal zulässige Wärmeleistung) hängt in erster Linie von der Wärmeleitfähigkeit des Bentonits und erst dann von derjenigen des Opalinustons und der angrenzenden Schichten sowie vor allem von der In-situ-Temperatur ab. Falls die maximale Paläotemperatur des Opalinustons signifikant niedriger wäre als die erwartete maximale Temperatur in einem Tiefenlager am Kontakt Bentonit – Opalinuston, müssten die erwarteten Effekte im Detail abgeklärt und die Behälterbeladung allenfalls überprüft werden. Aufgrund der Erfahrungen mit anderen Tongesteinen mit niedrigeren maximalen Paläotemperaturen ist es wenig wahrscheinlich, dass die Temperatureffekte auf das Wirtgestein so gravierend sind, dass sie eine Auswirkung auf die Behälterbeladung haben werden. Die relativ hohe maximale Paläotemperatur des Opalinustons im Zürcher Weinland ist durch die neuen Untersuchungen (vgl. dazu Mazurek et al. 2006) so weit abgesichert, dass durch den Wärmeeintrag durch die Behälter keine signifikant höhere Temperatur im Opalinuston erreicht wird und somit keine nachteilige Veränderung der Gesteinsmineralogie erwartet wird.

1.3 Vertiefung Prozessverständnis Wirtgestein

1.3.1 Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Transportmechanismen

Empfehlung Nr. 1.3.1-01

HSK, Seite 49:

Im Bereich des Opalinustons (573 m bis 647 m) liegen aus experimentell-technischen Gründen nur korrigierte $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Isotopenmessungen der VD-Methode vor (VD_K in Fig. 2.4-2). Daten mit der zuverlässigeren DA-Methode fehlen hier. Nach Ansicht der HSK stellt dieser Mangel aber die Interpretation nicht in Frage.

Stellungnahme der Nagra:

Die Interpretation der Autoren des Berichts (Gimmi & Waber 2004), resp. der Publikation (Gimmi et al. 2007) mit den korrigierten VD-Werten wurde von den verschiedenen Reviewern ebenfalls nicht in Frage gestellt, das Korrekturverfahren wurde als korrekt und belastbar betrachtet.

Empfehlung Nr. 1.3.1-02

HSK, Seite 50 und KNE, Seiten E 10 – E 11:

HSK: Die Nagra hat wegen der inhärenten Unkenntnis der isotopengeochemischen Anfangs- und Randbedingungen darauf verzichtet, eine vertiefte Sensitivitätsanalyse der gefundenen Resultate vorzunehmen. Die HSK empfiehlt, eine solche Analyse durchzuführen, falls der Datensatz erneut untersucht wird.

KNE: Die Geosynthese und der NIB 02-04 haben wegen der inhärenten Unkenntnis der isotopengeochemischen Anfangs- und Randbedingungen darauf verzichtet, eine vertiefte Sensitivitätsanalyse der gefundenen Resultate durchzuführen. Dies obwohl die freien Parameter der Lösungen durch χ^2 -Anpassung bestimmt wurden. Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse - sollte sie denn möglich sein - würde es erlauben, die gezogenen Schlüsse 'objektiv' zu validieren. Es ist zu empfehlen, sollte der Datensatz erneut und unabhängig modellmässig analysiert werden, eine vertiefte und dem Problem angepasste Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Sensitivitätsanalyse hinsichtlich unterschiedlicher Randbedingungen wurde für die Sauerstoff- und Wasserstoffisotope vertieft (umfassendster Datensatz). Die Ergebnisse wurden in einer renommierten Fachzeitschrift publiziert (Gimmi et al. 2007). Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass Diffusion der massgebliche Transportprozess ist, und dass mit den einfachsten Annahmen betreffend Anfangs- und Randbedingungen das gemessene Profil am Besten nachmodelliert werden kann.

Empfehlung Nr. 1.3.1-03

KNE, Seite E 7:

Die geäusserten Einwände zum ^3He sind nicht notwendigerweise 'sicherheitsrelevant'. Jedoch ist zu wünschen, diese Punkte zu klären. [...]

- ^3He scheint sowohl in den Porenwässern, der Gesteinsmatrix und den Aquiferen angereichert ('mehr ^3He als durch in-situ Produktion erklärbar'). Die von der Geosynthese vorgebrachte Erklärung ist vage und bedarf weiterer Diskussion. Lässt sich das Tiefenprofil nicht durch 'diffusive Invasion' aus den Aquiferen erklären?
- Die gefundenen Edelgasprofile (^3He , ^4He , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) in den Porenwässern sind stoffspezifisch und liefern wiederum Hinweise, dass 'diffusive Prozesse' den Stofftransport in (!) und aus mWG bestimmen. Die Geosynthese geht darauf nicht detailliert ein. [...]
- Die Information, welche in den Edelgasen steckt, wurde nicht voll ausgeschöpft. Eine gekoppelte Analyse der Edelgase zusammen mit den Isotopenuntersuchungen des Wassers & Chlors ist anzudenken.

Stellungnahme der Nagra:

Eine besser abgesicherte Interpretation der hohen ^3He -Gehalte wird erst möglich sein, wenn ein regionaler Datensatz vorhanden ist; dazu werden die Felduntersuchungen für die Rahmenbewilligungsgesuche einen wichtigen Beitrag liefern. Da im Buntsandstein-Grundwasser ein geringer ^3He -Gehalt gemessen wurde, kann ein aktueller ^3He -Zufluss aus dem Grundgebirge ausgeschlossen werden. Die Interpretation der hohen ^3He -Gehalte deutet auf ein sehr dichtes Gestein hin, auch wenn zurzeit nicht alle Details quantitativ erklärt werden können.

Empfehlung Nr. 1.3.1-04

KNE, Seite E 14:

Die Geosynthese konzentriert sich - richtigerweise - bei ihrer Analyse der isotopengeochemischen Daten und des diffusiven Transportes auf die vertikale Richtung. Prinzipiell ist jedoch jede Richtung - auch die horizontale - für den Transport relevant. Selbstredend lässt sich aus einer Bohrung (und der auf den relevanten Längen vermuteten fehlenden horizontalen Konzentrationsgradienten) keine Aussage über die grossräumigen horizontalen Transporteigenschaften des mWGs in der Region Benken gewinnen (für den Mont Terri liegen hingegen solche Daten vor). Es ist zu empfehlen, dass neue Nachfolgeuntersuchungen und –projekte sich dem horizontalen Transport verstärkt widmen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Anisotropie des Opalinustons hinsichtlich Diffusionseigenschaften ist breit abgestützt (Mont Terri und Benken, s. Geosynthese zum Entsorgungsnachweis, Nagra 2002b, Kap. 5.10 sowie neuere Publikationen des PSI (z.B. Van Loon et al. 2004)). Die Diffusionskonstanten für horizontalen Transport sind rund 5 (4 – 6) mal grösser als für vertikalen Transport. Im Rahmen der Diffusionsexperimente im Felslabor Mont Terri wurden die Diffusionsmodelle weiterentwickelt (2- und 3-dimensionale Modelle, gleichzeitiger Transport von neutralen, anionischen und kationischen Tracern, vgl. Wersin et al. 2004, Wersin et al. 2008). Diese Modelle können später auch auf ein zukünftiges Standortgebiet angewendet werden.

Empfehlung Nr. 1.3.1-05

NEA-IRT, Seite 51:

Das IRT stellt fest, dass die Nagra an internationalen Programmen beteiligt ist, um weiterhin natürliche Tracer zu erforschen. [...] Das IRT ermuntert die Nagra zur Fortsetzung dieser Programme.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra ist am Projekt CLAYTRAC beteiligt, welches von der Universität Bern (Federführung und Berichterstattung) im Auftrag und in Zusammenarbeit mit dem OECD/NEA-Clay-Club durchgeführt wurde. Das Projekt zeigt anhand zahlreicher Fallstudien in verschiedenen Tongesteinsformationen, wie verschiedene natürliche Tracer zur Verbesserung des Verständnisses des Transports gelöster Stoffe verwendet werden. Die Ergebnisse des CLAYTRAC-Projekts werden Ende 2008 in einem umfassenden Bericht publiziert (Mazurek et al. 2008). Erste Ergebnisse wurden bereits am 12. Water Rock Interaction Symposium (Mazurek et al. 2007a) und an der Clay Conference in Lille (Mazurek et al. 2007b) als Abstract veröffentlicht.

Empfehlung Nr. 1.3.1-06

HSK, Seite 196:

Der von der Nagra hergeleitete pH-Bereich von 6.8 bis 8.2 für das Opalinuston-Grundwasser ist kompatibel mit dem pH-Wert von 7.7 einer Wasserprobe aus der Bohrung BWS A1 im Felslabor Mont Terri, sowie mit dem pH-Wert von 7.5 aus einem Auspressversuch mit Opalinuston vom Mont Terri. Auslaugversuche über 7 und 28 Tage bei verschiedenen fest/flüssig-Verhältnissen mit Opalinuston vom Mont Terri ergaben jedoch pH-Werte zwischen 8.3 und 9.1 (NTB 97-07). Eine Erklärung für diese Diskrepanz steht noch aus; die Nagra wies einzig auf die relativ grosse Unsicherheit im pH-Wert des Grundwassers hin. Im Falle einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK daher, den pH-Wert des Opalinuston-Grundwassers neu zu überprüfen.

Stellungnahme der Nagra:

Seit dem Entsorgungsnachweis sind im Felslabor Mont Terri weitere Versuche mit verbesserten Untersuchungsmethoden (z.B. Bohren mit Stickstoff zur Vermeidung von Oxidationseffekten, Sterilisation von Bohrwerkzeugen und Testapparaturen zur Vermeidung von mikrobiologischen Störeffekten, Untersuchungen an Porenwässern von Bohrkernen) durchgeführt worden. Dadurch konnten die Ungewissheiten betreffend Redox-Potenzial (Eh) und pH-Wert (resp. pCO₂) signifikant reduziert werden. Zudem wurde die Methodik der geochemischen Modellierung verbessert. Viele der aus parallelen Untersuchungen in den Tonsteinen des Callovo-Oxfordiens im Felslabor Bure gewonnenen Beiträge zum Prozessverständnis können auch auf den Opalinuston übertragen werden. Die neuesten Ergebnisse wurden am Clay Symposium in Lille (ANDRA 2007) präsentiert. Entsprechende Publikationen sind in Vorbereitung (Vinsot et al. 2008a und b, Gaucher et al. in prep.). Weitere Publikationen über die Experimente zur Porenwassercharakterisierung im Felslabor Mont Terri sind in Planung.

Empfehlung Nr. 1.3.1-07

HSK, Seite 196:

Aufgrund der langen Verweildauer des Porenwassers erachtete die Nagra die Annahme eines Gleichgewichts zwischen Pyrit und Sulfat als vernünftig. Die HSK stellt diese Annahme in Frage. Ob solche Reaktionen in der Natur über sehr lange Zeiträume die Redoxeigenschaften eines Gesteins bestimmen können, scheint der HSK zum heutigen Zeitpunkt zu wenig gesichert. Das für den Referenzfall verwendete Redoxpotential von -167 mV für den Opalinuston kann daher nicht als gesichert angesehen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Es wurden Massnahmen zur verbesserten Messung des Redox-Potenzials in Bohrungen vorgenommen (Bohren mit Stickstoff statt Luft). Das Redox-Potenzial wird bei allen neuen Modellierungsarbeiten mitberücksichtigt unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse. Vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.3.1-06 und die dort aufgeführten Referenzen.

1.3.2 Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Gastransport / Gasfreisetzung**Empfehlung Nr. 1.3.2-01**

HSK, Seite 246:

Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager, hauptsächlich aber zur Abfuhr des entstehenden Gases durch die Bentonit- bzw. Zementverfüllung und durch den Opalinuston führen, sind eingehender zu untersuchen.

Stellungnahme der Nagra:

Das aktuelle Prozess- und Systemverständnis zur Gasbildung wurde für ein BE / HAA-Lager in Nagra (2004) und für ein SMA-Lager in Nagra (2008b) dargestellt. Im Rahmen des EU-FP7-Projekts FORGE widmet sich ein ganzes Arbeitspaket (WP2) dem Thema "gas production". Weiter werden die verschiedenen Projekte zur Gasbildung (Degradation organischer Materialien in Zementumgebung, Metallkorrosion unter neutralen bzw. alkalischen Bedingungen) aktiv verfolgt. Die neuen Erkenntnisse werden in die Rahmenbewilligungsgesuche einfließen. Vgl. auch Stellungnahmen zu den Empfehlungen zu diesem Themenbereich und zu 4.1.3-04 und 4.1.3-05.

Umfangreiche Arbeiten beschäftigen sich mit dem Prozess- und Systemverständnis zur Gasfreisetzung (Marschall et al. 2005, Croisé et al. 2006, Aranyossy et al. 2008, Senger & Marschall 2008, Senger et al. in prep., Nagra 2008b). Hierzu zählen verschiedene EU-Projekte (EU-FP6: NF-PRO; EU-FP7: FORGE), Partnerprojekte (Mont Terri: HG-A, HG-C, SB), F+E-Projekte der Nagra (THM-LabPerm, Gas-MOD) und Kooperationen mit anderen Organisationen (ANDRA, ONDRAF/NIRAS, EBS Task Force).

Empfehlung Nr. 1.3.2-02

HSK, Seite 206:

Im Falle einer Fortführung des Projektes sollte die Nagra die zurzeit noch etwas geringe und zum Teil widersprüchliche Datenbasis zu den Gasdurchlässigkeiten und Gaseintrittsdrücken des

Opalinustons verbessern. Das bezieht sich auch auf die von der Nagra nicht weiter begründete Annahme, dass die Gastransportkapazität infolge des Auftretens von Dilatanz beim Druckanstieg von 13 bis 15 MPa um einen Faktor 10 linear zunimmt (NTB 02-03, S. 354). Wichtig ist zu zeigen, dass eine irreversible Makrorissbildung ausgeschlossen werden kann.

Stellungnahme der Nagra:

Der Kenntnisstand zum Gastransport im Opalinuston wurde gegenüber 2002 signifikant erweitert (Marschall et al. 2005, Croisé et al. 2006, Aranyosy et al. 2008, Senger & Marschall 2008, Senger et al. in prep., Nagra 2008b). Neben den eigenen Datenquellen konnte auch auf Daten aus anderen Disziplinen (CO₂-Sequestrierung, Gasspeicherung, Reservoir Engineering) zurückgegriffen werden.

Zur Gasfreisetzung läuft eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen (F+E-Projekt der Nagra: THM-LabPerm, EU-FP7: FORGE). Im Rahmen des Mont Terri-Versuchs HG-C werden zurzeit In-situ-Tests zum Gastransport in Mikro- / Makrorissen durchgeführt. Die Resultate der Untersuchungen über Gaseffekte auf die Eigenschaften des Opalinustons werden für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch zusammengefasst.

Standortspezifische Datensätze werden im Rahmen zukünftiger Standortuntersuchungen (Gas Threshold Pressure Tests, Labortests an Kernmaterial) erarbeitet.

Empfehlung Nr. 1.3.2-03

KSA, Seite 53:

[...] bei der Weiterführung des Programms [sollen] weitere Abklärungen zur Vertiefung der Kenntnisse zur Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Störungszonen im Wirtgestein (Brüchen und Rissen) vorgenommen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Das Prozessverständnis zur Wasser- und Gasdurchlässigkeit von Störungszonen im Wirtgestein wird im Rahmen von verschiedenen Projekten vertieft (Mont Terri: HG-A, HG-C, HA; EU-FP6: NF-PRO, SELFRAC; EU-FP7: FORGE; F+E Projekt der Nagra: THM-LabPerm). Die Arbeiten umfassen Laborexperimente, In-situ-Versuche sowie die Entwicklung von numerischen Prozessmodellen (spannungsabhängige Permeabilität). Zukünftige standortbezogene Charakterisierungsarbeiten (z.B. Packertests in Sondierbohrungen, Untersuchungen Untertag) werden zur Kalibrierung der Prozessmodelle dienen.

Empfehlung Nr. 1.3.2-04

NEA-IRT, Seite 84:

Das IRT empfiehlt, dass die experimentellen Untersuchungen der Gastransportprozesse fortgeführt werden sollen. Die zukünftigen Arbeiten sollten mehr experimentelle Unterstützung für die angenommenen Kapillardrücke und relativen Permeabilitäten schaffen, insbesondere für Wassersättigungen im Bereich von 90% bis 100%. Sie sollten ebenfalls zusätzliche experimentelle Hinweise auf die Erzeugung von Mikrokissen und die damit allenfalls verbundene Erhöhung der intrinsischen Permeabilität liefern.

Das IRT empfiehlt auch, dass die Modellierung der Gastransportprozesse in Hinsicht auf eine erhöhte Durchlässigkeit infolge Mikroriss-Erzeugung verbessert werden sollte. Ferner sind

weitere Anstrengungen notwendig, um die grundlegenden Ansätze zum Zweiphasenfluss und die entsprechenden Rechencodes zu validieren.

Stellungnahme der Nagra:

Zur Gasfreisetzung läuft eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen. Die Resultate der Untersuchungen über Gaseffekte auf die Eigenschaften des Wirtgesteins werden für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch zusammengefasst.

Die wichtigsten Experimente und Modellierungsarbeiten sind: F+E-Projekte der Nagra: THM-LabPerm, Gas-MOD-II, THM-TaskForces: EU-FP7: FORGE.

Vgl. weitere Stellungnahmen zu diesem Themenbereich und zu den Empfehlungen Nr. 4.1.3-03 und 4.1.3-04.

Empfehlung Nr. 1.3.2-05

HSK, Seite 206:

Bezüglich des LMA-Lagers ist die Frage zu klären, inwiefern das aus den Lagertunneln verdrängte alkalische Wasser im umliegenden Wirtgestein die Gastransporteigenschaften verändert. Für diverse ermittelte gasrelevante Parameter soll bei einer allfälligen Fortsetzung des Projektes eine umfassendere und konsistentere Datenbasis geschaffen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Interaktionen des Zementporenwassers mit den Verfüll- und Versiegelungsmaterialien sowie mit dem Opalinuston werden zurzeit eingehend evaluiert. Der aktuelle Kenntnisstand ist in Nagra (2008b) dokumentiert und bewertet.

Zusätzliche experimentelle Arbeiten zur Zementwasser-Interaktion werden im Rahmen verschiedener Projekte durchgeführt. Erwähnenswert ist hierbei ein umfassendes Laborprogramm mit Säulenversuchen und Mock-Up-Versuchen im Rahmen des EU-FP7-Projekts FORGE. Im Rahmen des CI-Versuchs im Felslabor Mont Terri werden hydrochemische Langzeitprozesse an den Kontaktzonen Zement – Opalinuston und Zement – Sand/Bentonit untersucht. Als Teil der geowissenschaftlichen Modellentwicklung wurden Pilotstudien in Auftrag gegeben, um Zementwasser-Interaktionen mit numerischen Zweiphasenfluss-Modellen zu simulieren.

Empfehlung Nr. 1.3.2-06

HSK, Seite 206:

Im Falle einer Weiterführung des Projekts sollte die Nagra die Entwicklung der Porosität und der Durchlässigkeit des Wirtgesteins innerhalb der pH-Fahne eingehend untersuchen und dabei die Konsequenzen für den Gastransport durch den tunnelnahen Opalinuston evaluieren.

Stellungnahme der Nagra:

Zur Gasfreisetzung sowie zur möglichen Änderung der Materialeigenschaften als Folge der pH-Fahne laufen verschiedene Studien und Untersuchungen. Der aktuelle Kenntnisstand ist in Nagra (2008b) dokumentiert.

Zusätzliche experimentelle Arbeiten zur Erweiterung der gasbezogenen Datenbasis (inkl. Zementwasser-Interaktion) werden im Rahmen verschiedener F+E-Projekte durchgeführt (THM-LabPerm, THM-TaskForces, EU-FP7: FORGE, Mont Terri: CI).

Empfehlung Nr. 1.3.2-07

HSK, Seite 214:

Hingegen ist zu untersuchen, ob die mineralogischen Veränderungen zu einer Abnahme der Porosität des Wirtgesteins im Bereich der Lagertunnel führt, die bedeutsam wäre für den im Lager erreichten Gasdruck und die Art der Gasableitung durch den Opalinuston.

Stellungnahme der Nagra:

In Nagra (2008b) werden für ein SMA-Tiefenlager im Opalinuston die wichtigsten hydro-chemischen Interaktionen diskutiert, die zu einer Porositätsabnahme ("Skinbildung") im Kontaktbereich Wirtgestein – Kavernenverfüllung führen können.

Experimentelle Arbeiten zur Verringerung der Gaspermeabilität des Wirtgesteins durch hydro-chemische Selbstabdichtungseffekte (Porositätsabnahme im Kontaktbereich Wirtgestein – Zementverfüllung) werden im Rahmen verschiedener F+E-Projekte durchgeführt (EU-FP7: FORGE; Mont Terri: CI, SB).

Im Rahmen des EU-FP6-Projekts NF-PRO (WP4.3) wurden im Felslabor Mont Terri umfassende Untersuchungen durchgeführt, um Veränderungen in Mineralogie und Porosität des Stollennahfelds aufgrund der Tunnelventilation zu überprüfen. Es wurden nur geringfügige Porositätsänderungen festgestellt; für die Gasdruckentwicklung nach Lagerverschluss sind diese Phänomene nicht von Bedeutung (Aranyossy et al. 2008).

Im Rahmen der geowissenschaftlichen Modellentwicklung wurde LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratories) mit verschiedenen Entwicklungsarbeiten zur Simulation hydro-chemischer Prozesse beauftragt (z.B. Zementwasser – Ton-Interaktionen).

Empfehlung Nr. 1.3.2-08

HSK, Seite 216:

Die Abschätzungen der Nagra zur maximalen Eindringtiefe der pH-Fahne in den Opalinuston zeigen, dass der von Phasenumwandlungen betroffene Bereich limitiert ist. Die von der pH-Fahne hervorgerufenen Reaktionen haben eine pH-Senkung zur Folge, wodurch sich die Wirkung der pH-Fahne vermindert. Auch wenn sich die Sorptionseigenschaften der Umwandlungsprodukte als schlechter erweisen würden als von der Nagra angenommen, wird der Einfluss der pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinustons von untergeordneter Bedeutung für die Sicherheit des Tiefenlagers sein, womit die Einschätzungen der Nagra von der HSK geteilt werden. Auf die weiter zu untersuchende Bedeutung der Abnahme der Porosität für die Entwicklung des Gasdrucks in den Lagertunneln wurde bereits hingewiesen (Abschnitte 4.7.5 und 4.8.3).

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra misst der Interaktion des Zementwassers mit dem Opalinuston (bzw. mit Bentonit) in Bezug auf die Gasfreisetzung eine grosse Bedeutung zu (Nagra 2008b). An den Grenzflächen zwischen Lagerkaverne und Wirtgestein bzw. zwischen Lagerkaverne und Kavernenverschluss

könnten sich dünne, gasdichte Zonen ("Skins") bilden, die die Freisetzung der Korrosions- und Degradationsgase unterbinden. Umfangreiche experimentelle Arbeiten zur Zementwasser-Interaktion werden im Rahmen verschiedener F+E-Projekte durchgeführt (THM-LabPerm, THM-TaskForces, EU-FP7: FORGE, Mont Terri: CI-Versuch). Der Einfluss der pH-Fahne auf die Rückhaltefähigkeit des Opalinuston wird für das Rahmenbewilligungsgesuch neu beurteilt werden.

1.3.3 Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Selbstabdichtung

Empfehlung Nr. 1.3.3-01

KNE, Seite C 5:

Zudem fällt die Phase der Füllung der Klüfte in den anderen Bohrungen in Zeiten verstärkter tektonischer und hydrothormaler Aktivität. Daher lassen sich Tektonik und Temperatur als Ursache für Klüftbildung und -füllung nicht scharf voneinander abgrenzen. Die Nagra ist sich der Problematik der Bildung von Klüften bewusst und hat entsprechende umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Trotzdem möchte ich weitere Untersuchungen empfehlen, da Bau-massnahmen im Opalinuston einerseits und das Aufbringen einer zusätzlichen thermischen Last andererseits zu Spannungen im Gestein führen können.

Stellungnahme der Nagra:

Sollte der Opalinuston im Zürcher Weinland weiter verfolgt werden, so werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch weitere Bohrungen durchgeführt. Falls dort Klüfte (ggf. mit Klüftfüllungen) angetroffen werden, so werden diese detailliert untersucht werden.

Soweit möglich werden Labor- und In-situ-Untersuchungen zur Entstehung von induzierten Klüften (z.B. thermisch induzierte Klüfte bzw. bautechnisch bedingte Klüfte) im Felslabor Mont Terri durchgeführt (z.B. EU-FP6: TIMODAZ, MB-Versuch). Ein detailliertes Prozessverständnis der Beobachtungen im Felslabor Mont Terri sollte erlauben, die Beobachtungen an potenziellen Standorten besser zu verstehen.

Bei der Untersuchung von Selbstabdichtungsprozessen wird auch der Einfluss von Klüftfüllungen auf diesen Prozess untersucht werden.

Empfehlung Nr. 1.3.3-02

KNE, Seite F3 bzw. Seite 6:

Die heute vorliegende Datenbasis über Transmissivitäten von tektonischen Trennflächen im Opalinuston ist gering. Aufgrund aller heute vorliegenden Kenntnisse (insbesondere auch der Testdaten von Riniken und Schafisheim) kann davon ausgegangen werden, dass heute in einer Endlagerteufe von 600-800 m keine oder nur geringe Erhöhungen der Durchlässigkeiten von tektonischen Trennflächen gegenüber dem intakten Nebengestein zu erwarten sind (wenige Grössenordnungen). Diese Annahme muss aber durch weitere Messungen und prozessorientierte Studien belegt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Eine weitere Bestätigung, dass tektonische Trennflächen bei genügender Überlagerung keine signifikant erhöhte Durchlässigkeit zeigen, ergibt sich aus den Untersuchungen im Tunnel Mont Russelin, wo trotz intensiver Zerschering des Wirtgesteins Diffusion als bestimmender Transportprozess identifiziert wurde (Mazurek et al. 2008).

Untersuchungen von spannungsabhängigen Transmissivitäten von induzierten Störungen werden im Rahmen der In-situ-Untersuchung im Mont Terri (HG-A, HG-C) und im Labor (THM-LabPerm) durchgeführt. Die Rückschlüsse aus diesen Untersuchungen (Selbstabdichtung) lassen sich auch auf natürliche Störungen übertragen.

Weitere Hinweise für die Richtigkeit dieser Hypothese lassen sich auch aus Untersuchungen der Erdöl- / Erdgas-Industrie ableiten (z.B. Jolley et al. 2007, Manzocchi et al. 1999).

Falls der Wahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein zugestimmt wird, werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch in den gewählten Standortgebieten zusätzliche Bohrungen abgeteuft. Werden in diesen Bohrungen Störungen im Wirtgestein angetroffen, so werden diese prinzipiell getestet.

Empfehlung Nr. 1.3.3-03

KNE, Seiten F 9 – 10:

In diesem Bericht nicht untersucht und bewertet wurde zudem eine allfällige kurzfristige Erhöhung der Transmissivitäten von reaktivierten Störzonen im Fernfeld durch zukünftige geologische Prozesse (insb. Erdbeben). Zur Diskussion solcher Prozesse wären hydro-mechanisch gekoppelte Modellrechnungen (z.B. Fitzenz 2002), aber auch zusätzliche Labordaten über das Scherverhalten natürlicher Trennflächen notwendig.

Stellungnahme der Nagra:

Es sind Untersuchungen zur Änderung von Kluftöffnungsweiten und Transmissivität als Funktion von Normalspannung und Verschiebungsbetrag geplant. Die Bearbeitung dieser Fragestellung, die auch für die Ölindustrie von Bedeutung ist (Fallbeispiele von Ölfeldern und Wasserbohrung in seismisch aktiven Gebieten (z.B. Kalifornien)), erfolgt teilweise über eine Zusammenarbeit mit der Erdölindustrie. Neben experimentellen Arbeiten im Felslabor Mont Terri (In-situ-Versuche und -Experimente an Kernproben) sind Entwicklungen von Prozessmodellen zur spannungsabhängigen Permeabilität (iCONNECT; EU-FP6: TIMODAZ; F+E-Projekte der Nagra: THM-LabPerm, Gas-MOD-II) vorgesehen (Lanyon 2007). Die neuen Erkenntnisse werden in die Berichterstattung zu einem allfälligen Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

Empfehlung Nr. 1.3.3-04

KNE, Seite F 10:

Da die Selbstabdichtungsprozesse heute noch wenig verstanden sind, bedarf der von der Nagra als Basisfall angenommene Durchlässigkeits-Wert von $1E-12$ m/s weiterer Belege.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen der Geosynthese wurde für die BE- / HAA-Lagertunnel eine kreisförmige Auflockerungszone mit einer Mächtigkeit von 1 m und einer hydraulischen Durchlässigkeit von $1\text{E-}12\text{ m/s}$ angenommen. Es wurden Sensitivitätsrechnungen durchgeführt, bei denen die Durchlässigkeit stark erhöht wurde; es wurde auch dann noch eine genügende Sicherheit erreicht.

Im aktuellen Programm der Nagra beschäftigen sich mehrere Projekte mit der Selbstabdichtung der EDZ (EU-FP5: EB (Mayor et al. 2005), SELFRAC (Bernier et al. 2007); EU-FP6: NF-PRO, TIMODAZ; Mont Terri: HG-A). Einen Überblick über den Stand der Arbeiten gibt Blümling et al. (2007). Eine zusammenfassende Analyse der Selbstabdichtungsprozesse erfolgt zurzeit im Rahmen eines NEA-Projekts.

Empfehlung Nr. 1.3.3-05*KNE, Seite H 6:*

Allerdings ist anzumerken, dass das Selbstabdichtungsvermögen des Tonsteins nur dann angenommen werden kann, wenn die o.g. Randbedingungen gegeben sind. Inwieweit hierbei allerdings die Austrocknung des Tonsteins im Nahfeld der Lagerstollen infolge der Temperaturerhöhung das Selbstabdichtungsvermögen reduziert, ist durch entsprechende Untersuchungen noch genauer abzuklären.

Stellungnahme der Nagra:

Im aktuellen Programm der Nagra beschäftigen sich mehrere Projekte mit der Selbstabdichtung der Auflockerungszone (EU-FP5: EB, SELFRAC; EU-FP6: NF-PRO, TIMODAZ; Mont Terri: HG-A). Die Selbstabdichtung von Trocknungsrissen wird unter anderem im Mont Terri VE-Versuch untersucht (Mayor et al. 2007). Eine Fortführung des VE-Versuchs unter nicht-isothermen Bedingungen wird zurzeit mit den Projektpartnern diskutiert, und es wurde ein Projektvorschlag zuhanden der EU erarbeitet (EU-FP7: PEBS).

1.3.4 Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. gekoppelter Phänomene**Empfehlung Nr. 1.3.4-01***HSK, Seite 151:*

Um den Zeitrahmen der Aufsättigung und insbesondere die im Nahfeld entstehenden Temperaturen und Gasdrücke besser zu bestimmen, empfiehlt die HSK der Nagra, im Falle der Fortführung des Tiefenlagerprojektes der Kopplung der massgebenden Prozesse erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

Stellungnahme der Nagra:

Im aktuellen F+E-Programm der Nagra beschäftigen sich mehrere Projekte mit der Aufsättigung des Nahfelds, inkl. Auflockerungszone unter isothermen sowie nicht-isothermen Bedingungen (EU-FP6: NF-PRO, HE, HE-D, Teilnahme an der EBS Task Force). Eine Fortführung des VE-Versuchs unter nicht-isothermen Bedingungen wird zurzeit mit den Projektpartnern diskutiert (EU-FP7: PEBS), weitere Arbeiten sind im Rahmen eines 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs im Felslabor Mont Terri geplant.

Spezifische Systemmodellierungen der Aufsättigungsprozesse im Nahfeld eines BE- / HAA-Lagerstollens wurden im Rahmen des F+E-Programms (high-T Bentonite) begonnen (Senger 2006, Senger & Ewing 2008). Die ersten Ergebnisse der Modellierungen zeigen, dass unter Berücksichtigung des konvektiven Wärmetransports im Bentonitgranulat die maximalen Temperaturen im Bentonit deutlich geringer sind, als im Entsorgungsnachweis unter rein advektiven Bedingungen berechnet wurde.

Numerische Studien zeigen für ein BE / HAA-Tiefenlager eine signifikante Reduktion des Gasdruckaufbaus in den Lagerstollen, wenn in den Simulationen der Einfluss der korrosionsbedingten Wasserzehrung explizit berücksichtigt wird (Senger et al. in prep.).

Empfehlung Nr. 1.3.4-02

KNE, Seiten 7 und C 5:

Seite 7: Im Gegensatz zu den Eigenschaften des Opalinuston im Fernfeld wurden für das Nahfeld des Tiefenlagers eine Anzahl offener Fragen [...] bezüglich der Prozesse im Grenzbereich zum Gestein erkannt [...]. Diese Fragen müssen im Rahmen eines untertägigen Felslabors geklärt und die Datenbasis vervollständigt werden.

Seite C 5: In denselben Modellrechnungen, die in den bisherigen Untersuchungen keine gravierenden Effekte durch den Bau und den Wärmepuls eines Lagers für radioaktive Abfälle aufzeigen, sollten die Rahmenbedingungen entsprechend der möglichen Ausdehnung im und über den Lagerbereich und den daraus resultierenden Differentialspannungen schrittweise geändert werden, bis die Festigkeit des Gesteins überschritten wird, um die für die Riss- oder Kluftbildung kritischen Werte abschätzen zu können. Die Modelle sollten anhand von Heizexperimenten, wie sie im Opalinuston im Felslabor Mont Terri durchgeführt werden, validiert werden.

Stellungnahme der Nagra:

Neue Daten zur THM-Problematik werden vom geplanten EU-FP7-Projekt PEBS und vom vorgesehenen 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch im Felslabor Mont Terri erwartet. Zusätzlich wurde begonnen, die im Entsorgungsnachweis vorgestellten THM/TH-Modelle zu verfeinern und Parametervariationen durchzuführen (Senger 2006). Diese Modellrechnungen werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch weitergeführt.

Empfehlung Nr. 1.3.4-03

KNE, Seite F 10:

Im Gegensatz zu den Eigenschaften der natürlichen geologischen Barriere im Fernfeld sind für das Nahfeld eine grössere Anzahl offener Fragen zu formulieren. Diese offenen Fragen betreffen insbesondere hydro-mechanisch und hydro-thermo-mechanisch gekoppelte Prozesse und Parameter im Grenzbereich zwischen der geologischen Barriere und der Bentonit-Barriere. Die zum Teil irreversiblen und bruchhaften Verformungen des Opalinustons im Nahfeld sind – wie in den Nagra-Berichten im Detail ausgeführt – von der Temperatur- und Spannungs-Entwicklung, der Zeit, dem Sättigungsgrad und der Hydrochemie im Nahfeld abhängig und werden heute nur punktuell verstanden.

Stellungnahme der Nagra:

Untersuchungen zur Geometrie der Auflockerungszone im Opalinuston (z.B. Blümling et al. 2008) wurden in verschiedenen Versuchen im Felslabor Mont Terri (z.B. EZ-A-, EZ-B-Versuche) durchgeführt. Weitere Versuche zum Verständnis der zeitabhängigen Prozesse in der Auflockerungszone und im Nahfeld laufen zurzeit im Felslabor Mont Terri (HG-A, EU-FP6: TIMODAZ) bzw. wurden bereits abgeschlossen (EU-FP5: SELFRAC, EB; EU-FP6: NF-PRO; vgl. Bernier et al. 2007, Mayor et al. 2005, Aranyosy et al. 2008). Die Auswirkung der Selbstabdichtung der Auflockerungszone und ihre Bedeutung für die Sicherheitsanalyse wurden evaluiert (z.B. Blümling et al. 2007).

Modellentwicklungen zu diesem Thema werden im Rahmen des Projekts iCONNECT durchgeführt (Lanyon 2007, Aranyosy et al. 2008).

Weitere Erkenntnisse werden von der Exkavation des EU-FP5 EB-Versuchs im Felslabor Mont Terri (Teil von EU-FP7: PEBS) und den im Felslabor Mont Terri geplanten 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch erwartet.

Empfehlung Nr. 1.3.4-04

KSA, Empfehlung 3-3, Seiten 37, 38 und 95:

Zudem sollten die Auswirkungen der über längere Zeit erhöhten Gasdrücke und Temperaturen auf die Transporteigenschaften von Opalinuston und Bentonit untersucht werden. Anschliessend soll eine integrale Beurteilung der Gasfrage erfolgen.

Stellungnahme der Nagra:

Zur Gasfreisetzung und zu thermisch induzierten Prozessen laufen zurzeit mehrere Studien und Untersuchungen. Die Resultate der Untersuchungen über Auswirkungen verschiedener Prozesse auf die Eigenschaften des Opalinustons und des Bentonits werden für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch zusammengefasst.

Zusätzliche Informationen zum Langzeitverhalten von Opalinuston und Bentonit bei erhöhten Gasdrücken und erhöhten Temperaturen werden im Rahmen mehrerer F+E-Projekte erwartet (THM-Bent, High-T Bentonite, THM-LabPerm). Die Ergebnisse der Laborexperimente werden im Rahmen von In-situ-Versuchen im Felslabor Mont Terri verifiziert werden (HG-A, EU-FP7: PEBS und 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch).

Empfehlung Nr. 1.3.4-05

NEA-IRT, Seite 90:

Das IRT regt auch an, weitere Untersuchungen der durch Feuchtigkeitstransfer im offenen Lager hervorgerufenen Langzeitwirkungen durchzuführen.

Stellungnahme der Nagra:

Im aktuellen Programm der Nagra beschäftigen sich mehrere Projekte mit dem Einfluss der Tunnelventilation auf die Auflockerungszone (EU-FP6: NF-PRO-RTDC4; Mont Terri: UZ, VE (Mayor et al. 2007)). Vgl. auch andere Stellungnahmen in diesem Themenbereich.

Empfehlung Nr. 1.3.4-06

NEA-IRT, Seite 90:

Vor der endgültigen Auslegung der Untertagebauten sollte eine sorgfältigere Analyse der Wiederaufsättigungsphase nach dem Lagerverschluss durchgeführt werden. Dazu bedarf es unter Umständen gekoppelter THMC-Modellierungen und Grossversuche mit Mehrkomponentensystemen.

Stellungnahme der Nagra:

Im aktuellen Programm der Nagra beschäftigen sich mehrere Projekte mit dem Einfluss der Wiederaufsättigung nach Lagerverschluss (EU-FP6: NF-PRO-RTDC3 und 4, TIMODAZ; Mont Terri: EB, HG-A). Darüber hinaus werden Prozess- und Systemmodelle zur Wiederaufsättigung entwickelt (Senger 2006, Senger & Ewing 2008, Nagra 2008b). Neue Grossversuche zur Wiederaufsättigung unter nicht-isothermen Bedingungen sind im Felslabor Mont Terri geplant (EU-FP7: PEBS und 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch).

Empfehlung Nr. 1.3.4-07

KNE, Seite F 4:

Die Geometrie der Trennflächensysteme in der Auflockerungszone wurde im Felslabor Mont Terri in 2-dimensionalen Anschnitten und mit (1-dimensionalen) Bohrungen untersucht. Die heute vorliegenden Kenntnisse lassen keine belastbaren Aussagen zur Grösse, zur 3-dimensionalen Geometrie und hydraulischen Vernetzung dieser Trennflächen parallel zu den Endlagerbauwerken und über relevante Distanzen zu. [...]

Die Stollen-parallelen effektiven Durchlässigkeiten sind heute nicht bekannt aber vermutlich geringer als diese lokalen Werte.

Stellungnahme der Nagra:

Erste Untersuchungen der 3-dimensionalen Rissgeometrie in der Auflockerungszone wurden im Auftrag der HSK durch die ETH-Zürich im Felslabor Mont Terri durchgeführt (EZ-B-Versuch) und stehen damit auch der Nagra für weiterführende Arbeiten zur Verfügung. Weitere Versuche zur Bestimmung der effektiven Stollen-parallelen Durchlässigkeiten werden zurzeit im Felslabor Mont Terri durchgeführt (HG-A) bzw. wurden bereits abgeschlossen (EU-FP5: SELFRAC, EB; EU-FP6: NF-PRO; vgl. Bernier et al. 2007, Mayor et al. 2005, Aranyossy et al. 2008). Die Auswirkung der Selbstabdichtung der Auflockerungszone und ihre Bedeutung für die Sicherheitsanalyse wurden evaluiert (z.B. Blümling et al. 2007).

Modellentwicklungen zu diesem Thema werden im Rahmen des Projekts iCONNECT durchgeführt (Lanyon 2007, Aranyossy et al. 2008).

Weitere Erkenntnisse werden von der Exkavation des EU-FP5 EB-Versuchs im Felslabor Mont Terri (Teil von EU-FP7: PEBS) und dem im Felslabor Mont Terri geplanten Versiegelungsversuch und dem 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch erwartet.

1.3.5 Vertiefung des Prozessverständnisses bzgl. Felsmechanik

Empfehlung Nr. 1.3.5-01

HSK, Seite 87:

Aus Sicht der HSK können die felsmechanischen Eigenschaften und Kennwerte des Opalinuston für die Belange des Machbarkeitsnachweises als vernünftig abgesichert betrachtet werden. Sie sind durch zahlreiche Labormessungen an Gesteinsproben der Bohrung Benken sowie durch Versuche und Rückrechnungen im Felslabor Mont Terri belegt und bilden eine verlässliche erste Grundlage für die Modellierung des felsmechanischen Verhaltens beim Bau des geologischen Tiefenlagers. Eine genauere Eingrenzung der felsmechanischen Parameter und somit Verringerung der Streubreiten für den Opalinuston wie auch für die darüber liegenden Schichten wird im Zuge der nachfolgenden Projektphasen erfolgen können.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen der Arbeiten im Felslabor Mont Terri werden in unterschiedlichen Versuchen (z.B. MB-Versuch) Labor- und In-situ-Tests zur Bestimmung felsmechanischer Parameter und ihrer Skalenabhängigkeit durchgeführt. Das Vorgehen bei den Laboruntersuchungen wird dabei immer weiter verbessert und den Anforderungen an die komplexen gekoppelten Prozesse im Opalinuston angepasst.

Die Arbeiten werden begleitet von umfangreichen Modellierungsarbeiten, die erlauben, das Prozessverständnis zu verbessern und die relevanten Materialgesetze weiter zu entwickeln.

Die im Felslabor Mont Terri gewonnenen Informationen und die Entwicklung der Test- und Modellierungsverfahren können dann bei direkten Standortuntersuchungen eingesetzt werden. Es ist vorgesehen, dass bei künftigen Standortuntersuchungen im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch und den Tunnel- und Schachtbau Bohrkerne für felsmechanische Untersuchungen der Wirt-, Rahmen- und Nebengesteine zur Verfügung stehen, die im Labor nach den im Mont Terri entwickelten Testprotokollen getestet werden können.

Zusätzlich werden die für felsmechanische Untersuchungen und Modellierungen benötigten Zustandsparameter (Spannung und Porenwasserdruck) in den verfügbaren Bohrungen mit konventionellen und ggf. auch neuen Methoden untersucht werden (z.B. Kombination aus Modellierung und Spannungsmessungen in kompetenten Formationen oder Berechnung der Spannungen aus Logging-Daten; vgl. auch Stellungnahmen zu Themenbereich 1.1.1).

2 Beurteilung der Sicherheit

2.1 Methodik der Sicherheitsanalyse

2.1.1 Methodik

Empfehlung Nr. 2.1.1-01

HSK, Seite 111:

Die Nagra definiert vier Gruppen: Führungsgruppe, Wissenschafts- und Technologiegruppe, Sicherheitsanalysegruppe und Auditgruppe. Die konzeptuelle Trennung ist aber, gemäss Angaben der Nagra, nicht vollständig als personelle Trennung gestaltet. Nach Ansicht der HSK ist die fehlende personelle Trennung eine gewisse Gefahr für das Funktionieren der beabsichtigten ideellen Trennung der Gruppen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Funktionen und Verantwortlichkeiten der vier Gruppen wurden definiert, um den Beteiligten die verschiedenen Aufgaben/Verantwortungen aufzuzeigen, die bei der Entwicklung des Sicherheitsnachweises berücksichtigt werden müssen. Ein bestimmtes Mass an Überlappung zwischen den Gruppen ist dabei durchaus wünschenswert, um einen korrekten Informationsfluss zwischen den Gruppen sicherzustellen. Für die Sicherheitsanalyse für das Rahmenbewilligungsgesuch wird die im Entsorgungsnachweis verwendete Methodik kritisch überprüft und wo nötig angepasst.

Empfehlung Nr. 2.1.1-02

HSK, Seiten 223 – 224 und 230:

Seite 223 – 224: Die Frage der angemessenen Berücksichtigung der FEPs bei der Szenarientwicklung wird durch die oben erwähnten Prüfschritte soweit beantwortet, als gezeigt wird, dass die FEPs bei der Szenarienbildung berücksichtigt werden. Ob ihre Wirkungsweise (das heisst: die damit verbundenen Prozesse) richtig gesehen wird, kann daraus nicht ersehen werden, da die Charakterisierung der FEPs in der FEP-Datensammlung im grob Konzeptuellen bleibt. Näheres zu der angenommenen Wirkungsweise kann erst anhand der allgemeinen Systembeschreibung (NTB 02-05) und den konkreten Annahmen für die Rechenfälle (NTB 02-05 und NTB 02-06) erfahren werden. Diese Feststellung möchte die HSK nicht als Kritik verstanden wissen, sondern als Hinweis darauf, dass sie dem korrekten Systemverständnis im Sinne der Naturwissenschaften ein grosses Gewicht beim Sicherheitsnachweis beimisst. Die FEPCAT Datensammlung (59 FEPs für Tongesteine) kommt dieser Gewichtung einen Schritt entgegen, indem sie zu jedem FEP auch eine kurze Übersicht über den Stand der Kenntnisse darüber und über die experimentellen Grundlagen dieser Kenntnisse enthält. Der Nachteil, der bei einer solchen Datensammlung in Kauf genommen wird, ist, dass ihr naturwissenschaftlicher Inhalt weniger lange dem aktuellen Stand entspricht, als beispielsweise der Inhalt der im allgemein Begrifflichen verbleibenden internationalen FEP-Datensammlung.

Seite 230: Die kurze Beschreibung der FEPs in der FEP-Datensammlung (NTB 02-23) lässt in einigen Fällen auf solche Abhängigkeiten schliessen (z.B. beim FEP 4.04 „Chemischer Einflussbereich vom LMA-Lager“, wo auf den Zusammenhang mit Bakterien hingewiesen wird (FEP 2.05)). Die wechselseitige Beeinflussung wird aber nur auf der Ebene der Super-FEPs

angesprochen. In einer Tabelle im NTB 02-23 wird festgehalten, in welchen Rechenfällen die wechselseitige Beeinflussung der Super-FEPs berücksichtigt wird. Nach Ansicht der HSK ist dieses Vorgehen im Rahmen des Projekts akzeptabel, obschon eine möglichst umfassende Beschreibung der wichtigsten wechselseitigen Abhängigkeiten im Rahmen der FEP-Datensammlung selber zu begrüssen wäre, um die im Abschnitt 4.10.1 erwähnten Nachteile des „top-down“-Verfahrens zu entschärfen. [...]

Gewisse FEPs werden als „nicht von Bedeutung für die Langzeitsicherheit“ nicht in einem Super-FEP eingeschlossen und nicht in den Rechenfällen berücksichtigt. Die Begründungen werden im NTB 02-05 (Kap. 4 und 5) gegeben. Darunter befinden sich auch solche FEPs, die durchaus vorhanden und wirksam sind und nach Ansicht der HSK weiter zu beachten wären. Ein besonderes Beispiel sind die FEPs 6.1/2.08 und 6.1/3.09, die den Transport von Fluiden bzw. Radionukliden im Übergangsbereich vom Bentonit zum Wirtgestein infolge gekoppelter Gradienten (Onsager-Relationen) beschreiben.

Stellungnahme der Nagra:

Das Vorgehen bzgl. FEP-Management wird im Rahmen der Vorbereitung der Sicherheitsanalyse zum Rahmenbewilligungsgesuch festgelegt und die gewählte Methodik wird in den Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch dokumentiert.

Empfehlung Nr. 2.1.1-03

NEA-IRT, Seite 47:

Die Nagra anerkennt, dass die Auswahl der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle subjektiv und demnach etwas zufällig ist. So hat die Nagra festgestellt, dass „Was wäre wenn?“-Rechenfälle die Auswirkung von Störungen auf Schlüsseigenschaften der „Pfeiler der Sicherheit“ untersuchen, dass zwischen den „Was wäre wenn?“-Rechenfällen und den „Pfeilern der Sicherheit“ jedoch keine eindeutige Zuordnung besteht. Das IRT empfiehlt deshalb der Nagra für die Zukunft die Aufstellung von klareren Kriterien für die Auswahl der „Was wäre wenn?“-Rechenfälle.

Stellungnahme der Nagra:

"What-if?"-Rechenfälle, welche gemäss Definition (vgl. Nagra 2002c, Anhang E) mit Modellen und/oder Daten ausgewertet wurden, die ausserhalb des durch Beobachtungen abgestützten Bereichs liegen, wurden im Sicherheitsbericht zum Entsorgungsnachweis verwendet, um die Robustheit des geologischen Tiefenlagers zu illustrieren. Die spezifischen Kriterien zur Auswahl solcher Rechenfälle werden in den Sicherheitsberichten für das Rahmenbewilligungsgesuch klarer aufgezeigt werden.

Empfehlung Nr. 2.1.1-04

HSK, Seiten 112 und 244 – 245:

Seite 112: Die Nagra zeigt die Ergebnisse der probabilistischen Berechnungen teilweise durch die Angabe der daraus resultierenden komplementären Verteilungsfunktion (CCDF) der Dosiswerte. Die Interpretation der Schutzziele der Richtlinie HSK-R-21 als eine Grenzkurve in diesen Darstellungen ist nach Ansicht der HSK nicht korrekt (siehe Abschnitt 4.11.5). Dieser Punkt ist im Zusammenhang mit dem hier beurteilten Entsorgungsnachweis nicht von Bedeutung, muss aber im Hinblick auf zukünftige Sicherheitsnachweise bereinigt werden.

Seite 244 – 245: Die Ergebnisse der ergänzenden probabilistischen Berechnungen der Nagra zeigen, dass solche Betrachtungen wertvoll sind, wenn viele unabhängige Ungewissheiten der Parameterwerte gleichzeitig zu berücksichtigen sind. Die Stichprobengrösse (Anzahl Parametersätze) ist hier allerdings zu klein, um damit bei der betrachteten Anzahl Parameter den Einfluss auf die errechnete Dosis zuverlässig beurteilen zu können. Das Vorgehen zur Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf das Schutzziel 2 der Richtlinie HSK-R-21 (vgl. Abschnitt 4.1) anhand einer Darstellung der komplementären Verteilungsfunktion (CCDF) ist nicht korrekt. Für den Entsorgungsnachweis bleibt das ohne Folgen, da die Nagra alle ihre Dosisberechnungen der Prüfung anhand des Schutzziels 1 unterstellt hat.

Stellungnahme der Nagra:

Diese Empfehlung bezieht sich auf die Darstellung von Resultaten von probabilistischen Sicherheitsanalysen als Complementary Cumulative Density Function (CCDF). Bei einer allfälligen Verwendung von CCDFs in zukünftigen Sicherheitsanalysen wird dieser Punkt berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 2.1.1-05

KSA, Empfehlung 3-2, Seiten 31, 38 und 95:

Nach erfolgter Standortwahl soll die Robustheit des Tiefenlagersystems hinsichtlich Einhaltung des Schutzziels 1 der HSK-R-21 durch die Analyse weiterer Fälle systematisch und umfassender untersucht werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Methodik bzgl. Auswahl von Rechenfällen wird im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch überprüft und bei Bedarf angepasst, mit speziellem Augenmerk auf die Auswahl der "What-if?"-Rechenfälle.

Empfehlung Nr. 2.1.1-06

HSK, Seite 231:

Ein unbeabsichtigtes Anbohren des Tiefenlagers ist gemäss Nagra frühestens nach 500 Jahren anzunehmen. Diese Festlegung setzt voraus, dass die Kenntnis der Existenz des Lagers und seines Standorts während 500 Jahren erhalten und der technischen Fachwelt zugänglich bleibt. Im internationalen Vergleich ist die angenommene Zeitspanne als hoch anzusehen. Die entsprechenden Rechenfälle des Alternativen Szenariums 2 würden bei früherem Anbohren (z.B. nach 200 Jahren) zwar zu höheren Dosen, nicht aber zur Verletzung der Schutzziele führen. Allerdings kämen die Dosen bei der ungünstigen Parametervariation 3.1g in die Nähe des Schutzziels 1 der Richtlinie HSK-R-21.

Bei der Betrachtung des unbeabsichtigten Anbohrens des Tiefenlagers wurde nicht untersucht, inwiefern die radiologischen Auswirkungen davon beeinflusst werden, dass das Nahfeld des Tiefenlagers unter erhöhtem Gasdruck steht. Bei einer allfälligen Fortsetzung des Projekts sollte das Alternative Szenarium 2 in diesem und allgemeiner in denjenigen Aspekten ausgebaut werden, die nicht stark von der extremen Ungewissheit über die gesellschaftlichen Bedingungen betroffen sind.

Stellungnahme der Nagra:

Die Auswirkungen des Anbohrens der geologischen Tiefenlagers LMA, inkl. Berücksichtigung eines erhöhten Gasdrucks im Nahfeld, werden in den Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch analysiert.

Empfehlung Nr. 2.1.1-07*NEA-IRT, Seite 50:*

Während das Projekt von der konzeptuellen Phase zur detaillierten technischen Auslegung entwickelt wird, sollte mehr Gewicht auf die systematische Analyse denkbarer Szenarien gelegt werden, die zu früheren Zeiten (erste 10'000 Jahre) signifikante Dosen ergeben könnten. Ein Beispiel sind mögliche Auswirkungen von Betriebsunfällen und -problemen auf die Nachverschlussphase.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch wird die Methodik zur Entwicklung und Analyse von Szenarien überprüft und bei Bedarf angepasst. Dabei wird auch eine allfällige Beeinflussung der Langzeitsicherheit durch Ereignisse in der Betriebsphase berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 2.1.1-08*KNE, Seite F 10:*

Ebenso ist heute die Ausbildung der Transportwege im Nahfeld (porös, geklüftet) zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung nur mit Plausibilitätsbetrachtungen beschreibbar. Es ist darum sinnvoll, neue „What-if“-Rechenfälle für diskrete nicht-poröse Wasserfliesswege im Nahfeld durchzuführen.

Stellungnahme der Nagra:

Weitere Untersuchungen zu den Selbstabdichtungsprozessen in der Auflockerungszone im Opalinuston sind zurzeit im Gang bzw. geplant (vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 1.3.3-04). Die Resultate werden in die Sicherheitsanalyse zum Rahmenbewilligungsgesuch einfließen. Zusätzliche "What-if"-Rechenfälle für diskrete nicht-poröse Wasserfliesswege im Nahfeld sind für die Sicherheitsanalyse zum Rahmenbewilligungsgesuch vorgesehen.

Empfehlung Nr. 2.1.1-09*HSK, Seite 70:*

[Nach der Wahl eines Standorts] wäre es angebracht, die Erosionsszenarien an diesem Standort auch auf grössere Zeiträume [> 1 Million Jahre] auszudehnen. Bei andauernder Hebung und damit verbundener Erosion könnte nach sehr langer Zeit das Tiefenlager allmählich in die Nähe der Erdoberfläche kommen. Das Nahfeld des Tiefenlagers würde dabei in den Bereich der sauerstoffreichen Grundwässer gelangen. Die im Nahfeld noch vorhandenen sehr langlebigen Radionuklide würden nicht mehr so zurückgehalten bleiben, wie sie es unter den reduzierenden Bedingungen waren, und könnten schneller in die Biosphäre freigesetzt werden. In noch fernerer Zukunft könnte es zu einer Freilegung und Erosion des ehemaligen Lagerbereichs kommen. Es ist in einem weiteren Stadium der Arbeiten angezeigt, solche Szenarien durchzurechnen.

Stellungnahme der Nagra:

Das Vorgehen der Sicherheitsanalyse bzgl. Zeiträumen von mehr als einer Million Jahre nach Verschluss des geologischen Tiefenlagers ist im Entwurf der HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008) spezifiziert und wird in den Sicherheitsberichten zum Rahmenbewilligungsgesuch entsprechend umgesetzt. Dazu gehört die Analyse der potenziellen Auswirkungen der Erosion (erhöhte Durchlässigkeit) und Freilegung des Lagers.

Empfehlung Nr. 2.1.1-10

KNE, Seite F 10:

Die Durchflüsse entlang der Endlagerbauwerke (Endlagerstollen, Rampe, Schacht) sind im Basisfall deutlich kleiner als die vertikale Gesamtdurchströmung des Endlagers. Die dabei errechneten Peclet-Zahlen bestätigen die Dominanz des diffusiven Stofftransportes. Bei einer massiven Erhöhung der Durchlässigkeit der EDZ (etwa ab $1\text{E-}8$ m/s) konvergieren die Flüsse entlang der Endlagerbauwerke zu ähnlichen Werten wie die vertikale Durchströmung. Die Auswirkungen dieser neuen Befunde auf den Radionuklidtransport werden in einem separaten Bericht der Nagra erläutert werden. In diesem Zusammenhang wäre es auch sinnvoll, weitere Sensitivitätsstudien zum Radionuklidtransport bei Variationen der Durchlässigkeiten der Bentonitbarriere und der Absperrbauwerke auszuführen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Auswirkungen einer Variation der hydraulischen Durchlässigkeit der Bentonitverfüllung sowie der Versiegelungsstrecken generell auf den Radionuklid-Transport werden in der Sicherheitsanalyse zum Rahmenbewilligungsgesuch untersucht. Dazu werden auch Sensitivitätsstudien durchgeführt.

2.1.2 Ableitung von Mindestanforderungen für ausgewählte Elemente des Barrierensystems**Empfehlung Nr. 2.1.2-01**

KSA, Empfehlung 5-2, Seiten 45, 49 und 96:

Seite 45: Für die einzelnen Barrieren sollen Mindestanforderungen bzw. Auslegungskriterien festgelegt werden.

Seite 49 und 96: Es sollen Auslegungskriterien für die einzelnen Barrieren des Lagersystems festgelegt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen des Requirements Managements werden für jede Barriere die zu erfüllenden Anforderungen (bei Bedarf quantitative Mindestanforderungen bzw. qualitative Auslegungsgrundsätze) festgelegt. Dabei wird auch dokumentiert, für welche Konzepte diese Anforderungen gelten und unter welchen Bedingungen (z.B. alternative Auslegung) diese Anforderungen modifiziert werden können.

2.1.3 Biosphärenmodellierung

Empfehlung Nr. 2.1.3-01

HSK, Seite 221:

Die HSK ist mit der Auslotung der geomorphologischen und klimatischen Einflüsse auf den Nuklidtransfer in der Biosphäre einverstanden. Die Variation einzelner Parameter ist jedoch aus Sicht der HSK nicht immer nachvollziehbar. Es wird beispielsweise festgestellt, dass in einem Klima mit doppelter oder halbiertes Niederschlagsmenge keine Auswirkung auf die Erosion angenommen wurde, oder dass die erhöhte Porosität im Oberboden des Sumpflandes nicht mit einer reduzierten Verwundenheit (Tortuosität) der Fliesswege in dieser Schicht verbunden wurde. Für solche Szenarien bliebe abzuklären, ob die Nichtberücksichtigung dieser Nebenerscheinungen tatsächlich eine konservative Annahme darstellt.

Als einen der wichtigsten Parameter in der Biosphärenmodellierung sieht die HSK die Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen und lokalen Oberflächengewässern an. Bei einer Weiterführung des Projektes sollte der Bestimmung dieses Parameters mehr Gewicht gegeben werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Korrelation zwischen geomorphologischen und klimatischen Einflüssen sowie mit anderen Eigenschaften wird in den Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch vertieft berücksichtigt. Sensitivitätsanalysen werden aufzeigen, wie wichtig die einzelnen Phänomene bei der Berechnung der Dosis sind.

Empfehlung Nr. 2.1.3-02

HSK, Seite 237:

Die HSK bewertet die von der Nagra verwendeten Angaben zur Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen als vernünftig. Die HSK empfiehlt, dass die Nagra bei einer allfälligen Fortführung des Projekts die Zweckmässigkeit und Belastbarkeit der Modellierung mit weiteren experimentellen Daten belegt.

Stellungnahme der Nagra:

Die Verdünnung der Radionuklide in den Aquiferen und in lokalen Oberflächengewässern ist eine wichtige Einflussgrösse für die (berechneten) Individualdosen. Sie wird bestimmt durch die Eigenschaften der Aquifere und der Exfiltrationsgebiete in potenziellen Standortregionen und durch zukünftige Entwicklungen (Klima, Geomorphologie). Die heutigen Randbedingungen werden vor allem aus geologischen und hydrologischen Karten abgeleitet. Es ist fraglich, ob weitere experimentelle Daten eine bessere Belastbarkeit bringen können, da der grösste Teil der Ungewissheiten die zukünftige Entwicklung betrifft (p.m.: Das Maximum der berechneten Dosis im Referenzfall liegt bei knapp 1 Million Jahren).

Empfehlung Nr. 2.1.3-03

KSA, Seite 56:

Die KSA erachtet es [...] als richtig, wenn für die Prognosen für die Langzeitentwicklung generell von konservativen Werten ausgegangen wird. Sie empfiehlt auch, im weiteren Verlauf des Verfahrens zur geologischen Tiefenlagerung neuen Erkenntnissen Rechnung zu tragen und den Szenarienentwicklungen in diesem Bereich besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Stellungnahme der Nagra:

Der Einfluss von menschlichen Aktivitäten auf die Langzeitentwicklung wird in den Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt werden. Das Spektrum der betrachteten Rechenfälle wird dabei so breit ausgelegt, dass damit vernünftigerweise zu erwartende Entwicklungen abgedeckt sind.

Empfehlung Nr. 2.1.3-04

NEA-IRT, Seite 90:

In zukünftigen Berichten, speziell in solchen für die breite Öffentlichkeit, sollten die Folgen der globalen Erwärmung vertieft diskutiert werden.

Stellungnahme der Nagra:

In den Sicherheitsberichten zum Rahmenbewilligungsgesuch wird das Thema "globale Erwärmung" vertieft diskutiert werden, und es wird dort aufgezeigt, durch welche der betrachteten Biosphären-Szenarien das Szenarium "globale Erwärmung" abgedeckt ist.

Empfehlung Nr. 2.1.3-05

NEA-IRT, Seiten 90 und 92:

Seite 90: In zukünftigen Sicherheitsanalysen sollte bei der Präsentation der Resultate betont werden, dass Biosphärenmodelle den Charakter von Indikatoren zur Bewertung der Langzeitsicherheit haben, aber nicht versuchen, die Dosen in ferner Zukunft vorauszusagen.

Seite 92: Im Lichte der obigen Diskussion empfiehlt das IRT der Nagra:

- das Expertenwissen über die Biosphärenmodellierung zu erhalten;
- den Fortschritt in der ökologischen Risikoanalyse zu verfolgen (einschliesslich der Arbeiten des ICRP in diesem Bereich);
- in zukünftige Sicherheitsanalysen eine formale Behandlung des Gaspfads vorzusehen.

Stellungnahme der Nagra:

Schon heute nehmen Vertreter der Nagra regelmässig an internationalen Biosphären-Meetings teil (z.B. IAEA/EMRAS, BIOPROTA). Zusätzlich werden in bilateralen Kontakten Diskussionen zum Thema Biosphärenmodellierung geführt. Der Fortschritt in der ökologischen Risikoanalyse wird verfolgt. Der Einfluss einer möglichen Freisetzung von volatilen Radionukliden über den Gaspfad wird in den Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch vertieft behandelt werden.

Empfehlung Nr. 2.1.3-06

KSA, Seite 69:

Die KSA hat bereits darauf hingewiesen, dass u. a. [im Bereich der Biosphärenmodellierung] wohl die grössten Unsicherheiten liegen. Diese lassen sich zum Teil aus grundsätzlichen Gründen nur schwer eingrenzen und kaum reduzieren. Zusätzliche Informationen kann die Verwendung eines erweiterten Spektrums von Sicherheitsindikatoren [IAEA / ICRP] liefern.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf eine mögliche Verwendung in den Sicherheitsanalysen zum Rahmenbewilligungsgesuch wird das Spektrum der Sicherheitsindikatoren nochmals evaluiert. Dazu werden auch die Erkenntnisse von internationalen Arbeitsgruppen (NEA, IAEA) berücksichtigt.

2.2 Modelle und Daten für die Analyse der Langzeitsicherheit**Empfehlung Nr. 2.2-01**

HSK, Seite 234 und NEA-IRT, Seite 77:

HSK: Der Ansatz einer „effektiven Flussrate“ am Übergang zwischen den technischen Barrieren und dem Wirtsgestein stellt nach Ansicht der HSK eine starke Vereinfachung des Nuklidtransportmechanismus dar. Dieser Ansatz ist physikalisch nicht korrekt und etwas willkürlich. Auch die Expertengruppe der NEA weist darauf hin, dass die Schnittstelle zwischen den Radionuklidtransportmodellen für das Nahfeld und die Geosphäre auf vereinfachten Ansätzen basiert. Obschon die Experten diesen Ansatz als brauchbar akzeptieren, halten sie fest, dass die Konservativität des Ansatzes nicht offensichtlich ist. Sie empfehlen, in zukünftigen Anwendungen vermehrt voll gekoppelte Modelle zu verwenden, um die Nachvollziehbarkeit und Genauigkeit der Analyse zu verbessern (NEA 2004b, S. 77). Die HSK schliesst sich dieser Empfehlung an.

Im Falle einer Fortführung des Projekts erwartet die HSK, dass die Nagra den zukünftigen Berechnungen der Freisetzungsraten eine Modellierung der Schnittstelle zwischen Nah- und Fernfeld zu Grunde legt, die die physikalischen Prozesse besser abbildet.

NEA-IRT: Das IRT stellt fest, dass die Schnittstelle zwischen den Radionuklidtransportmodellen für das Nahfeld und die Geosphäre auf vereinfachten Ansätzen basiert. Die äussere Randbedingung für das Bentonit-Transportmodell beruht auf einem Ansatz der „effektiven advektiven Flussrate“, der physikalisch inkorrekt und etwas willkürlich ist. Obschon das IRT aufgrund der von der Nagra dem IRT präsentierten Informationen akzeptiert, dass dieser Ansatz seinen Zweck erfüllt, hält das IRT fest, dass die Konservativität des Ansatzes nicht offensichtlich ist. In zukünftigen Anwendungen sollten vermehrt voll gekoppelte Modelle zum Einsatz gelangen, um die Nachvollziehbarkeit und Genauigkeit der Analyse zu verbessern.

Stellungnahme der Nagra:

Für LMA wurde in der Zwischenzeit ein neuer Code entwickelt, der diese Empfehlung explizit berücksichtigt (Holocher et al. 2008). Für BE, HAA und LMA wurden in der Zwischenzeit entsprechende Anpassungen in den bestehenden Codes implementiert (Nagra 2008c). Die Entwicklung bzw. der Einsatz von noch weitergehend gekoppelten Modellen ist zurzeit in Arbeit; diese sollen nach Möglichkeit teilweise auch bei den probabilistischen Analysen zur Anwendung kommen.

Empfehlung Nr. 2.2-02

NEA-IRT, Seite 45:

Es wurde noch nicht nachgewiesen, dass die Verwendung von totalen Korrelationen an Stelle von statistischen Korrelationen zwischen Eingabeparametern konservativ ist. Überdies wurde für die Sensitivitätsanalysen nur eine Art von Korrelationskoeffizienten benutzt; Rang-Korrelationskoeffizienten wurden nicht verwendet. Das IRT empfiehlt den Einsatz von hochentwickelten Werkzeugen für die Analyse der Ungewissheiten und Sensitivitäten in zukünftigen Sicherheitsanalysen.

Stellungnahme der Nagra:

Sowohl die Methodik der probabilistischen Sicherheitsanalyse als auch die entsprechenden Werkzeuge (inkl. Rechencodes) werden zurzeit weiterentwickelt. Es ist geplant, diese Werkzeuge spätestens für das Rahmenbewilligungsgesuch einzusetzen.

3 Aktualisierung der Informationen zu den radioaktiven Abfällen

3.1 Abfallinventar und Abfalllogistik

Empfehlung Nr. 3.1-01

NEA-IRT, Seite 65:

Das IRT empfiehlt jedoch, dass die Nagra in zukünftigen Sicherheitsanalysen darauf hinwirken soll, bessere Abschätzungen der Aktivitäten von Radionukliden für HAA und LMA zu erarbeiten (sei es durch Diskussionen mit den Wiederaufarbeitungsfirmen oder anderswie), vor allem der Aktivitäten für diejenigen Radionuklide, die am meisten zur Dosis beitragen. Wenn möglich ist eine Übereinstimmung mit anderen Ländern anzustreben, die über ähnliche Abfallströme verfügen (z.B. Frankreich, Japan, Belgien), so dass ein gegenseitig abgestimmter Datensatz entsteht.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra arbeitet mit den Abfallproduzenten und ausländischen Organisationen auf allen Gebieten der Abfallinventarisierung zusammen. Zudem bestehen wegen der z.T. bereits erfolgten (HAA-) bzw. in den nächsten Jahren anstehenden (LMA-) Rückführung von Abfällen aus dem Ausland intensive Kontakte mit den Wiederaufarbeitern. Diese liefer(te)n neue Abfallspezifikationen und sonstige Dokumente mit Inventaren wichtiger Nuklide, die auf Messungen oder den Materialflüssen in den Wiederaufarbeitungsanlagen beruhen. Bei der Nagra werden die entsprechenden Werkzeuge (Aktivierungs- und Abbrandprogramme) zur Berechnung von dosisrelevanten Nukliden permanent weiterentwickelt und dem Stand der Technik angepasst. Die mit diesen Massnahmen ständig verbesserte Datenbasis wird in künftigen Sicherheitsanalysen verwendet.

Empfehlung Nr. 3.1-02

KSA, Seite 64:

Hinsichtlich der Auswirkungen von Hochabbrand und der Verwendung von MOX-Brennstoff weist die KSA auf folgenden Punkt hin. Die stärkere und weniger rasch abklingende Wärmeleistung von hoch abgebrannten UO_2 -BE und von MOX-BE stellt zwar den Entsorgungsnachweis nicht grundsätzlich in Frage. Falls nur ganz gefüllte Lagerbehälter eingelagert werden sollen, erfordert sie aber eine länger dauernde Abklinglagerung der BE. Die Nagra geht davon aus, dass UO_2 -BE mit einem Abbrand von $48 \text{ GWd/t}_{\text{SM}}$ 40 Jahre und MOX-BE 55 Jahre zwischengelagert werden. Ausserdem wird die Flexibilität des Einlagerungsbetriebs eingeschränkt, da bei den BE aus Druckwasserreaktoranlagen davon ausgegangen wird, dass pro Lagerbehälter drei UO_2 -BE und ein MOX-BE eingelagert werden. Damit verzögert sich die geologische Tiefenlagerung der BE, was aus Sicht der Entsorgung sicherheitstechnisch von Bedeutung ist.

Stellungnahme der Nagra:

In Zusammenarbeit mit den KKW-Betreibern werden die Einsatz- und Abbranddaten aller angefallenen BE (UO_2 und MOX) dokumentiert bzw. für die bis zum Ende der Betriebszeit zu erwartenden BE geschätzt. Damit werden die Beladungen der BE-Behälter hinsichtlich einer

ausgewogenen Wärmeleistung optimiert, wobei den unterschiedlichen Inventaren (und damit Wärmeleistungen) von UO₂- und MOX-BE Rechnung getragen wird. Die Resultate werden auch in das Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

3.2 Glaskorrosion

Empfehlung Nr. 3.2-01

HSK, Seite 128:

Im Tiefenlager kann, sobald das Wasser Zutritt zum Glas hat, SiO₂ aus dem Glas durch den Endlagerbehälter in die Bentonitverfüllung diffundieren. Der Einfluss dieses Transportes auf die Korrosionsrate der Glasmatrix muss nach Ansicht der HSK noch weiter geklärt werden. Wie sich die unter den Bedingungen im Tiefenlager einstellende SiO₂-Löslichkeitslimite und Glasauflösungsrate mit Werten aus Laborexperimenten vergleicht, ist nicht einfach abzuschätzen.

Stellungnahme der Nagra:

Neben der Weiterführung der Glaskorrosionsexperimente am PSI wird der Einfluss der SiO₂-Senke im Rahmen der internationalen Zusammenarbeit weiter betrachtet.

Empfehlung Nr. 3.2-02

NEA-IRT, Seite 74:

Das IRT empfiehlt, dass die Nagra internationale Forschungsprogramme verfolgt, die auf die Entwicklung eines verbesserten Prozessverständnisses und von mathematischen Modellen für die Langzeitauflösung von verglasten HAA unter Lagerbedingungen abzielen, und dass sie in diesem Gebiet ihr Fachwissen aufrechterhält.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra führt die Untersuchungen zur Glasauflösung (Laborversuche, Modellierung) am PSI fort (Curti 2003, Curti et al. 2006). Auch die aktuellsten Resultate bezüglich Glas-Auflösungsmodellen, welche beispielweise innerhalb des EU-FP6-Projekts NF-PRO erarbeitet wurden (Grambow et al. 2008), werden für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt. In Zusammenarbeit mit internationalen Experten (vor allem in Frankreich), werden dabei voraussichtlich insbesondere Kenntnisse über den Einfluss von Eisenkorrosionsprodukten, Tonmineralen und der Temperatur auf die Glasauflösung verbessert (Van Iseghem et al. 2006).

3.3 Verhalten der abgebrannten Brennelemente

Empfehlung Nr. 3.3-01

HSK, Seite 117:

Für allfällige weitere Projektschritte empfiehlt die HSK, die Abhängigkeit der Kritikalität vom Abbrand der eingelagerten Brennelemente, sowie von allfälligen Änderungen durch die Korrosion der Lagerbehälter und der eingelagerten Brennelemente detaillierter zu untersuchen. Der Einbezug des Brennelementabbrandes in den Sicherheitsbetrachtungen zur Kritikalität in Lagerbehältern hat zur Folge, dass bei einer späteren Realisierung eines Tiefenlagers der Abbrand der einzulagernden Brennelemente vor der Beladung der Lagerbehälter durch Kontrollmessungen verifiziert werden muss.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden weitere Kritikalitätsberechnungen durchgeführt, welche die verschiedenen möglichen Konfigurationen prüfen.

Empfehlung Nr. 3.3-02

HSK, Seite 124:

Die IRF-Werte beziehen sich durchwegs auf den Brennstoff verhältnismässig kurze Zeit (Jahre bis Jahrzehnte) nach der Entnahme aus dem Reaktor. Die Freisetzung im Tiefenlager findet aber im Referenzfall der Nagra erst nach dem Versagen der Endlagerbehälter nach 10'000 Jahren statt. Es ist zu erwarten, dass die IRF der langlebigen Spaltprodukte während dieser Zeit durch die weitere Diffusion der Radionuklide zu den Korngrenzen zunehmen wird. Grobe Abschätzungen in Ferry et al. (2003) deuten auf eine Erhöhung der IRF-Werte um 4-5 % (je nach Abbrand) in 10'000 Jahren hin. Bestätigt sich diese Abschätzung, könnte die IRF auch deutlich höher sein als die Nagra im Referenzfall der Sicherheitsanalyse angenommen hat (bis zu einem Faktor 2 für ^{135}Cs beim Abbrand von 48 GWd/t_{SM}). Da die maximale Dosis in der Biosphäre auf die Freisetzung der IRF zurückzuführen ist, sollte die Nagra diese Untersuchungen im Falle einer Fortführung des Projekts verfolgen.

Stellungnahme der Nagra:

Die im Rahmen des EU-Projekts NF-PRO durchgeführten Untersuchungen haben bestätigt, dass die von Ferry et al. (2003) verwendeten Diffusionskoeffizienten um mehrere Grössenordnungen zu gross sind. Die neuen Werte zeigen, dass die Diffusion auch für lange Zeiten nicht zu einer signifikanten Erhöhung des IRF-Werts führen wird (vgl. Grambow et al. 2008).

Empfehlung Nr. 3.3-03

HSK, Seite 126:

Die Nagra zitiert experimentelle Beobachtungen zur Unterstützung ihrer Annahme, dass die Oxidschicht der Hüllrohre ca. 20 % des ^{14}C der Hüllrohre enthält (NTB 02-07). Dieser Anteil wird im Tiefenlager nach Wasserzutritt zu den Brennelementen rasch freigesetzt. Die HSK akzeptiert diese Annahme, weist aber darauf hin, dass die Datengrundlagen heute noch eher schmal sind.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra verfolgt die laufenden Studien zur Charakterisierung der BE (inkl. Oxidschicht auf den Hüllrohren). Weiter arbeitet die Nagra mit japanischen Organisationen zusammen, welche weitere Messungen zur Freisetzung von ^{14}C aus Hüllrohren durchführen (vgl. die Diskussion des gegenwärtigen Stands in Johnson & Schwyn 2008). Die Resultate werden in die Sicherheitsanalyse für das Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

Empfehlung Nr. 3.3-04*HSK, Seite 145:*

Ein intaktes Hüllrohr bildet aber eine wertvolle zusätzliche Barriere. Die HSK erwartet deshalb bei einer allfälligen Weiterentwicklung des Projektes einen direkt nachvollziehbaren Nachweis für die Einhaltung der Grenztemperatur von 350°C am Brennelement.

Stellungnahme der Nagra:

Die weltweit laufenden Studien zum Einfluss erhöhter Temperaturen auf das Verhalten der Brennelement-Hüllrohre bei der Zwischenlagerung werden verfolgt. Die möglichen Versagensmechanismen für die Hüllrohre (v.a. 'creep rupture' und 'delayed hydride cracking') werden in Zusammenarbeit mit den Betreibern bearbeitet.

Die Integrität der Hüllrohre wird jedoch in der Analyse der Langzeitsicherheit nicht vorausgesetzt und wird für die Langzeitsicherheit auch nicht als zentral beurteilt. Dies ist in Übereinstimmung mit verschiedenen anderen Programmen (Finnland, Kanada, Schweden), welche die mögliche Barrierenwirkung der Hüllrohre auch nicht berücksichtigen.

Empfehlung Nr. 3.3-05*KNE, Seiten 7 und G 3:*

Seite 7: Bezüglich des durch Korrosion gebildeten Wasserstoffgases wird empfohlen, dessen Einfluss auf die chemischen Reaktionsvorgänge in die Betrachtungen miteinzubeziehen.

Seite G 3: The corrosion process should be re-evaluated and the role of H_2 gas should be assessed.

Stellungnahme der Nagra:

Die Bedeutung von Wasserstoffgas für die Brennstoffauflösung wird zurzeit im Rahmen des EU-FP7-Projekts MICADO neu beurteilt. Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird nochmals eine Neubeurteilung vorgenommen.

3.4 Abfallkonditionierung

Empfehlung Nr. 3.4-01

KSA, Seite 66:

Die KSA ist der Auffassung, dass die Bildung von Gasen in einem geologischen Tiefenlager gering gehalten werden sollte. Dies bedeutet u. a., dass möglichst keine organischen Materialien ins Lager eingebracht werden sollten. Nach Auffassung der KSA sollten die Abfallproduzenten dort, in diesem Sinne auf die Konditionierung der Abfälle Einfluss nehmen.

Stellungnahme der Nagra:

Der Organikagehalt der LMA wurde seit Einreichung des Entsorgungsnachweises reduziert und wird weiter abnehmen (Substitution von LMA von Sellafield Ltd durch wenige HAA, keine organischen Beimischungen in metallischen WA bzw. geplanter Ersatz der Bituminierung durch eine Methode ohne Organika bei AREVA). Weiter ist zu berücksichtigen, dass die Organika im Vergleich zu den Metallen nur zu einem kleinen Teil zur Gasbildung beitragen. Weiter wird das LMA-Lager so ausgelegt, dass die Gasbildung keine signifikanten sicherheitsrelevanten Konsequenzen hat.

Empfehlung Nr. 3.4-02

KSA, Empfehlung 5-3, Seiten 45, 50 und 96:

Beim Betrieb der Kernanlagen sowie der Behandlung und Konditionierung von Abfällen soll der Abstimmung mit den Erfordernissen der Entsorgung bis und mit geologischer Tiefenlagerung im Sinne einer Optimierung Rechnung getragen werden; hinsichtlich BE/HAA gilt dies speziell für die Kernausslegung und die Festlegung des maximalen Abbrands, hinsichtlich LMA für den Gehalt an organischen Stoffen.

Stellungnahme der Nagra:

Den KKW-Betreibern sind die Randbedingungen der geologischen Tiefenlagerung von BE / HAA, insbesondere die maximal zulässige Wärmeleistung der BE- / HAA-Endlagerbehälter, bekannt. Es wurden und werden diesbezüglich Studien durchgeführt, in denen der Einfluss des Abbrands der BE und des Letztkerns auf die Verpackung der BE für eine optimierte geologische Tiefenlagerung untersucht wurde/wird. Bei den gegenwärtig vorliegenden BE ist eine optimierte Verpackung der BE / HAA nicht in Frage gestellt, da genügend BE mit niedrigen Abbränden für die Beladung der Behälter vorliegen. Der hinsichtlich einer optimalen und auch wirtschaftlichen Entsorgung maximal zu wählende Abbrand ist Gegenstand der erwähnten Studien.

Bei den LMA sind die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von grosser Bedeutung. Dort wird durch die Substitution von LMA von Sellafield Ltd (früher BNGS / BNFL) durch wenige HAA-Kokillen die Menge an organischen Stoffen bereits drastisch reduziert. Des Weiteren wurde von der Nagra und den Betreibern bei AREVA (früher: Cogema) darauf hingewirkt, dass geplante organische Beimischungen in ansonsten metallischen Abfällen mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden und AREVA plant, die Konditionierung von Rohabfällen mit organischem Bindematerial (Bitumen) durch eine Methode ohne Organika zu ersetzen.

3.5 Abklärungen zur Gasbildung

Empfehlung Nr. 3.5-01

HSK, Seite 191:

Die Gasproduktion durch mikrobiologische Prozesse könnte beeinflusst werden, da die Temperatur für die Tätigkeit von Mikroorganismen einen wichtigen Faktor darstellt. Im Falle einer Weiterführung des Projekts sollte die Nagra den Temperatureinfluss auf die Gasproduktion durch Abbau der Organika berücksichtigen.

Stellungnahme der Nagra:

Da der Abbau von Organika als mikrobiologisch katalysiert angenommen wird, hängt er von der mikrobiellen Aktivität ab. Letztere hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Art der Mikroorganismen ab, über welche kaum Information vorhanden ist. Unterdessen wurden die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Abbauraten einer externen Review unterzogen. Demnach werden diese Raten im Vergleich zu neueren internationalen Untersuchungen um bis zu Grössenordnungen zu hoch eingeschätzt und müssen daher als eine obere Grenze betrachtet werden. Damit ist auch der schwer vorhersagbare Temperatureinfluss abgedeckt. Die Nagra verfolgt den Fortschritt auf diesem Gebiet und analysiert periodisch die Neuerkenntnisse; dies wird auch für das Rahmenbewilligungsgesuch der Fall sein.

4 Barrieren- und Lagerkonzepte

4.1 Konzepte für die technischen Barrieren

Empfehlung Nr. 4.1-01

NEA-IRT, Seite 47:

Zusammenfassend stellt das IRT fest, dass wegen der sehr günstigen Eigenschaften des Opalinuston eine grosse Bandbreite von Ungewissheiten im Verhalten der technischen Barrieren und der Abfallmatrix toleriert werden kann, ohne damit die Sicherheit eines Tiefenlagers im Opalinuston in Frage zu stellen. Gleichwohl empfiehlt das IRT der Nagra, an den wichtigsten Eigenschaften eines robusten Systems von technischen Barrieren, wie es gegenwärtig vorgeschlagen wird, festzuhalten und ihre Arbeiten zur Verringerung von Ungewissheiten fortzuführen.

Stellungnahme der Nagra:

Am Grundsatz der robusten technischen Barrieren wird festgehalten. Die Identifikation von kritischen Ungewissheiten erfolgt im Rahmen von Sensitivitätsstudien, die auch Hinweise auf die Ausrichtung des zukünftigen F+E-Programms geben.

4.1.1 Bentonithaltige Verfüllmaterialien

Empfehlung Nr. 4.1.1-01

HSK, Seiten 97 und 98:

Seite 97: Die Nagra sieht die Verwendung von Bentonitgranulat vor, das in seiner körnigen Form leichter eingebracht werden kann. Nach Ansicht der HSK besteht erst wenig Erfahrung mit diesem Material, insbesondere bezüglich Homogenität, Quell- und Langzeitverhalten. Zentral ist die Frage der technisch erreichbaren Dichte der Granulatfüllung, die massgebend die Eigenschaften der Bentonitbarriere beeinflusst. Experimente dazu sind zwar im Felslabor Mont Terri zurzeit im Gange, es liegen aber noch keine Abschlussergebnisse vor. Nach Ansicht der HSK sind die diesbezüglichen Forschungsarbeiten weiterzuführen und die Eigenschaften des Bentonitgranulates aufzuzeigen.

Seite 98: Die genauen Arbeitsabläufe des Betriebs, die detaillierte Umsetzung der Überwachungsmassnahmen sowie die Ausführung der Verfüllarbeiten und des endgültigen Verschlusses des Lagers sind im Falle der Realisierung des Projekts im Verlaufe der späteren Bewilligungsverfahren weiter zu konkretisieren. Dabei sind insbesondere die Eigenschaften des Bentonitgranulats durch weitere Untersuchungsergebnisse zu erhärten.

Stellungnahme der Nagra:

Sowohl Versuche im Felslabor als auch Laborstudien der Eigenschaften von Bentonitgranulat werden fortgeführt. Dies mit besonderem Augenmerk auf technische Ansprüche an die Einbringung, Quelleigenschaften, Homogenität, hydraulische Leitfähigkeit und den Einfluss von erhöhter Temperatur auf Quell- und hydraulische Eigenschaften (Karnland et al. 2007, Wollenberg & Schröder 2006). Wichtige Informationen werden von der Exkavation des EU-FP5 EB-Versuchs erwartet, die im Rahmen des EU-FP7 Projekts PEBS geplant ist (vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.1.1-05).

Empfehlung Nr. 4.1.1-02

HSK, Seite 140-141:

Ein geeignetes Vorgehen zum Erreichen gleich bleibender Eigenschaften des Bentonitgranulats (insbesondere Dichte, Wassergehalt und Korngrößenverteilung) bleibt aufzuzeigen. [...] Das hohlraumfreie Einbringen des Bentonitgranulats ist im Falle eines Beibehaltens des gewählten Konzepts bei der Fortsetzung des Projekts in weiteren Grossversuchen zu testen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Technologie zur Herstellung und zum Einbringen von Bentonitgranulat wird weiterentwickelt und erste Grossversuche wurden erfolgreich durchgeführt (Mayor et al. 2005, Plötze & Weber 2007). Weitere Entwicklungen sind insbesondere im geplanten 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch im Felslabor Mont Terri vorgesehen (vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.1.1-05).

Empfehlung Nr. 4.1.1-03

HSK, Seiten 141 – 142:

Bezüglich der Bentoniteigenschaften bleibt das Modell in mehreren Punkten unklar. Aus Sicht der HSK bleibt genauer abzuklären, inwiefern die um den Behälter über längere Zeiträume herrschenden Temperaturen tatsächlich zu bleibenden Veränderungen des Bentonits führen. [...]

Das im Fall einer Dehydrierung entstehende Material ist in seinen Eigenschaften nicht charakterisiert worden. Eine dehydrierte und damit volumenreduzierte Bentonitschicht würde jedoch möglicherweise dazu führen, dass die Abfallbehälter aus der Stollenmitte absacken. Hier spielt ausserdem das sich lokal um die Auflageträger und die Deckbleche entwickelnde Temperaturfeld eine Rolle. Aus Sicht der HSK sollte weiter abgeklärt werden, ob die Entwässerung des Bentonits reversibel ist und mit der Aufsättigung durch das eindringende Porenwasser des Wirtgesteins wieder rückgängig gemacht werden kann und welchen Einfluss die Ausfällung der Kieselsäure auf eine solche Re-Hydrierung hat.

Schlussendlich sollte aus Sicht der HSK abgeklärt werden, inwiefern mit der Wahl einer bestimmten Bentonit-Zusammensetzung die Dehydrierung vermindert werden kann. Untersuchungen an Bentoniten verschiedener Zusammensetzung zeigen, dass Ca-Bentonite erst bei höheren Temperaturen dehydrieren als Na-Bentonite. [...]

Aus Sicht der HSK sind die folgenden drei Punkte im Rahmen einer Fortführung des Projekts zu beachten:

- Die Nagra sollte die Herstellung und Handhabung der vorgeschlagenen Bentonitmaterialien in Grossversuchen weiter testen.
- Die Nagra sollte die Bentonit-Dehydrierung auf ihre Abhängigkeit von der maximal erreichten Temperatur und der Zeitdauer des thermischen Pulses untersuchen.
- Die Nagra sollte abklären, inwiefern die möglichen Prozesse bei der Dehydrierung reversibel sind und was die Wirkung der damit verbundenen Prozesse auf die Bentonitverfüllung als Sicherheitsbarriere sind.

Stellungnahme der Nagra:

Es wurden Grossversuche im Rahmen des EU-FP5-Projekts EB (Mayor et al. 2005) und des EU-FP6-Projekts ESDRED erfolgreich durchgeführt (Plötze & Weber 2007). Neben Laborexperimenten (z.B. Bentonituntersuchungen an der ETH) werden zurzeit In-situ-Versuche zu

dieser Fragestellung im Felslabor Mont Terri geplant (EU-FP7: PEBS, 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch). Diese Arbeiten werden durch weitere Laborexperimente und Modellierungen begleitet.

Im Rahmen der Untersuchungen im EU-FP6-Projekt NF-PRO (RTDC 3) wurde die Quellfähigkeit und hydraulische Durchlässigkeit für Bentonit bei erhöhter Temperatur bestimmt. Ähnliche Untersuchungen wurden am Bentonitgranulat (Karnland et al. 2007) ausgeführt, das vor der Kompaktion bei ca. 100°C dehydriert worden war. Diese Untersuchungen werden ergänzt durch die Arbeiten an den LOT- und ABM-Proben in Äspö, sowie durch Laborversuche im Rahmen der oben erwähnten Versuche im Felslabor Mont Terri.

Untersuchungen zur Kanisterabsenkung bei der Dehydrierung des Buffers wurden bisher noch nicht durchgeführt, werden aber im Rahmen des 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs zur Verfügung stehen.

Empfehlung Nr. 4.1.1-04

HSK, Seite 172 und KNE, Seite 7:

HSK: Aus dem bisher gesagten wird klar, dass quantitative Aussagen über die Eigenschaften und die Entwicklung des Bentonits eine umfassende Modellierung von gekoppelten Prozessen erfordern, bei der die zeitliche Entwicklung der thermischen, mechanischen, hydraulischen und chemischen Verhältnisse in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt wird. In einigen Aspekten besteht heute noch Bedarf für weitere Untersuchungen. So muss das Verhalten des Bentonits bei hohen Temperaturen und Temperaturgradienten weiter untersucht werden, um mögliche bleibende Beeinträchtigungen seiner guten Eigenschaften besser eingrenzen zu können. Ebenfalls müssen die beim Gasdurchbruch auftretenden Phänomene eingehender abgeklärt werden. Die Materialeigenschaften des Bentonitgranulats bedürfen einer breiteren experimentellen Abstützung.

KNE: [...] wurden für das Nahfeld des Tiefenlagers eine Anzahl offener Fragen bezüglich Eigenschaften und Verhalten der Bentonit-Barriere [...] erkannt (hydraulisch-mechanisch-thermisch gekoppelte Prozesse, Kompaktions- und Quellverhalten, Verformungsmoduli, Durchlässigkeitsverhältnisse). Diese Fragen müssen im Rahmen eines untertägigen Felslabors geklärt und die Datenbasis vervollständigt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Im aktuellen Programm der Nagra widmen sich verschiedene Projekte dem Verständnis von THMC-Prozessen in Bentonitgranulat (Ermittlung von Materialgesetzen für Bentonitgranulat für Temperaturen grösser 100°C; Teilnahme an der EBS Task Force in Äspö – Modellierung von Gastransport in kompaktiertem Bentonit; THM-LabPerm-Permeabilitätstests an Bentonitgranulat).

Für die Überprüfung des Verhaltens von Bentonit bei hohen Temperaturen sind neue Grossversuche zur Wiederaufsättigung eines BE / HAA-Lagersystems unter nicht-isothermen Bedingungen im Felslabor Mont Terri geplant (EU-FP7: PEBS und 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch).

Empfehlung Nr. 4.1.1-05

NEA-IRT, Seite 78:

[Das IRT empfiehlt, dass] Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sowie Grossversuche zur Verwendung von Bentonitgranulat als Verfüllmaterial mit dem Ziel fortzusetzen sind, diese Technik für die Anwendung in den Lagerstollen zu etablieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Technologie zur Herstellung und zum Einbringen von Bentonitgranulat wird mit Hilfe von Labor- und Felduntersuchungen weiterentwickelt. Dazu wurden schon Grossversuche im Rahmen des EU-FP5-Projekts EB (Mayor et al. 2005) und des EU-FP6 Projekts ESDRED erfolgreich durchgeführt (Plötze & Weber 2007). Weitere Erkenntnisse und Entwicklungen werden im Rahmen des geplanten EU-FP7-Projekts PEBS und des 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuchs im Felslabor Mont Terri erwartet.

Empfehlung Nr. 4.1.1-06

HSK, Seiten 147 – 148:

Die thermischen Eigenschaften werden unverändert auch für die jeweiligen unteren und oberen Rahmengesteine angenommen. Für die weiter aussen angrenzenden Gesteinsschichten werden [im] NTB 01-04 unter Berufung auf den Untersuchungsbericht zur Bohrung Benken (NTB 00-01) thermische Parameterwerte angegeben, die aber im zitierten Bericht nicht vorhanden sind. Auch wenn diese thermischen Parameter plausibel sind, sollten sie experimentell erhärtet sein, denn die Eigenschaften dieser weiteren angrenzenden Schichten beeinflussen die maximale Erwärmung des Opalinustons. Auch für den Opalinuston selber sowie für die Rahmengesteine sollte die Datenbasis erweitert werden, um die Annahmen besser zu stützen. Die experimentellen Daten können im Falle der Realisierung eines Tiefenlagerprojekts im Opalinuston im Rahmen weiterer Sondierungen erhoben werden. [...]

Nach Ansicht der HSK bestehen bezüglich der thermischen Eigenschaften der Bentonitverfüllung und der geologischen Gesteinsschichten noch Ungewissheiten, die verringert werden sollten. Auch sieht die HSK einen Bedarf für weitere Untersuchungen, um die langfristige Beständigkeit der Bentonitverfüllung im Tiefenlager auch bei Temperaturen deutlich über 100°C nachweisen zu können. [...]

Die HSK empfiehlt der Nagra hingegen, im Falle der Weiterführung des Tiefenlagerprojektes im Opalinuston die experimentellen Grundlagen für die thermischen Parameter zu erweitern und die thermische Modellierung zu verfeinern.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen der Sondierbohrung Benken wurden keine Messungen der thermischen Parameter (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) für die Rahmengesteine durchgeführt. Die Referenz im NTB 01-04 (Johnson et al. 2002) bezieht sich auf die in Benken gemessenen Temperaturprofile. Für die Wärmeleitfähigkeit wird ein Wert von $3.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ angenommen, der innerhalb der Bandbreite ähnlicher Gesteine liegt (missverständliche Formulierung in NTB 01-04).

Die Nagra ist sich der Bedeutung der thermischen Parameter von Wirt- und Rahmengesteinen bewusst und pflegt eine intensive Zusammenarbeit mit verschiedenen Organisationen im Rahmen der Schweizerischen Geothermie-Forschung. Hierdurch wird eine regelmässige Aufdatierung des Kenntnisstands gewährleistet (aktuelle Literatur, Zugang zu neuen Daten).

Bei zukünftigen Standortuntersuchungen werden für die Ermittlung der thermischen Leitfähigkeit spezifische Messprogramme vorgesehen.

Das verbesserte Verständnis der THM-Eigenschaften der Bentonitverfüllungen ist ein Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten der Nagra. Forschungsbedarf besteht insbesondere für das Verhalten des Bentonits bei Temperaturen, die deutlich über 100°C liegen. Zu diesem Zweck wurden langjährige Forschungsprojekte initiiert (Quellfähigkeit von Bentonitgranulat bei erhöhter Temperatur, Clay Technology; Teilnahme am LOT Experiment, SKB; Entwicklung eines THM-Materialgesetzes für granularen Bentonit, EPFL Lausanne). Durch die Teilnahme in verschiedenen internationalen Projekten (EU-FP6: NF-PRO; EBS Task Force in Äspö) wird der aktuelle Kenntnisstand zum THM-Forschungsschwerpunkt periodisch überprüft.

Empfehlung Nr. 4.1.1-07

NEA-IRT, Seite 78:

[Das IRT empfiehlt, dass] die Forschung zum Verhalten des Bentonits unter erhöhten Temperaturen fortzusetzen ist, zum Zwecke der Festlegung der maximalen Bentonit-Temperatur, die ohne Beeinträchtigung des Barriereverhaltens innerhalb des Mehrfachbarrierensystems toleriert werden kann.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchungen im Felslabor Mont Terri und auch in Laborstudien zu den Eigenschaften von Bentonitgranulat wurden bzw. werden fortgeführt. Dazu gehören auch Untersuchungen zum Einfluss von erhöhten Temperaturen auf die Quell- und hydraulischen Eigenschaften (vgl. Karnland et al. 2007). Vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.1.1-06.

Empfehlung Nr. 4.1.1-08

NEA-IRT, Seite 14:

Das IRT stellt fest, dass das von der Nagra vorgeschlagene Bentonitverfüllkonzept sich in zweierlei Hinsicht von den internationalen Verfahrensweisen unterscheidet: nämlich (i) durch die Verwendung von Bentonitgranulat, und (ii) in der Auslegung für maximale Temperaturen über 100°C in der inneren Hälfte der Bentonitverfüllung. Gemäss dem IRT ist das wissenschaftliche Verständnis der Quell- und Sorptionseigenschaften von Bentonit, der erhöhten Temperaturen ausgesetzt war, noch nicht vollständig. Das IRT stellt fest, dass die Nagra ihre Untersuchungen über das Verhalten der Bentonitgranulatverfüllung und die hohen Temperaturen weiterführt, besonders die Erforschung thermisch-hydraulisch-mechanischer (THM) Prozesse auf der Grössenskala eines Lagerstollens. Das IRT ermutigt die Nagra ausdrücklich, diese Untersuchungen fortzusetzen, da die Resultate solcher Studien auch für andere Entsorgungsprogramme von grossem Interesse sind. Das trifft vor allem auf die Auswirkung hoher Temperaturen zu. Das IRT ist überdies der Ansicht, dass die Ungewissheiten über die wärmebedingten Veränderungen der Bentonitverfüllung mit Rechenfällen in der Sicherheitsanalyse abgedeckt werden. Die Frage, für welche maximale Temperatur in der Verfüllung das Tiefenlager ausgelegt werden soll, muss nicht beantwortet werden, bevor die Standort-Charakterisierung unter Tag eingeleitet wird.

Stellungnahme der Nagra:

Vgl. Stellungnahmen zu den Empfehlungen Nr. 4.1.1-01, 4.1.1-05 und 4.1.1-06.

Empfehlung Nr. 4.1.1-09

HSK, Seiten 151 und 154:

Seite 151: Nach Einschätzung der HSK ist es noch unklar, wie die mögliche Zementierung das sich einstellende Gleichgewicht zwischen Quelldruck und Stollenkonvergenz beeinflussen wird. Die HSK empfiehlt der Nagra, im Falle der Weiterführung des Projektes diese offene Frage und die allfälligen Konsequenzen für den Zustand (z.B. Durchlässigkeit) des unmittelbar an den Stollen angrenzenden Wirtgesteinsbereiches zu klären. [...]

Seite 154: In NTB 02-05 (S. 269) wurde im Zusammenhang mit der Radionuklidmigration der konservative Fall besprochen, dass die Hälfte der Bentonithülle durch die hohen Temperaturen der BE-Behälter thermisch degradiert wird (Entwässerung der Smektitstruktur und Ausfällung von Mineralen). Die Konsequenzen dieses Falls für die Problematik des Gastransportes wurden hingegen von der Nagra nicht diskutiert. Möglich wäre, dass die bei erhöhten Temperaturen vorkommende Ausfällung von Kieselsäure (Pusch et al. 2002) zu lokalen Verkrustungen führt, die den Gastransport beeinflussen und zu einem spröden Verhalten vom Bentonit führen können. Bekannt ist (Couture 1985), dass der Kontakt mit Wasserdampf die Quellbarkeit des Bentonits reduzieren kann. Diese Effekte sind wegen der von der Nagra ermittelten hohen Temperaturen und Temperaturgradienten an der Behälter-Bentonit-Grenze sorgfältig zu prüfen.

Stellungnahme der Nagra:

Der Einfluss von erhöhten Temperaturen ($T > 100^{\circ}\text{C}$) und Temperaturgradienten inklusive des Einflusses von Wasserdampf (Couture-Effekt) in ungesättigtem Bentonit auf die Quelleigenschaften von Bentonit nach vollständiger Sättigung wird im Rahmen von Laboruntersuchungen (z.B. THM-Bent, Batchexperiment ETH und Clay Technology) und Versuchen in Felslabors (z.B. LOT in Äspö) eingehend untersucht. Die Resultate dieser Untersuchungen werden in den Sicherheitsbericht für das Rahmenbewilligungsgesuch integriert.

Empfehlung Nr. 4.1.1-10

HSK, Seite 154:

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Nagra wenig neue Erkenntnisse zur Gasmigration im Bentonit vorlegt. Für den Bentonit verbleiben die Untersuchungen teilweise auf einer phänomenologischen Stufe, so dass die den Gastransport im Bentonit beeinflussenden Faktoren nur schlecht abschätzbar sind. Die HSK erwartet, dass die Nagra im Falle einer Fortsetzung des Projektes weiterführende Experimente zum Gastransport im Bentonit durchführt und dabei auch die Bedeutung einer partiellen thermischen Degradation des Bentonits für den Gastransport untersucht.

Stellungnahme der Nagra:

Zur Gasfreisetzung läuft eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen. Die wichtigsten Experimente und Modellierungsarbeiten der Nagra sind THM-LabPerm, THM-Bent, EU-FP7: FORGE und PEBS (vgl. weitere Stellungnahme zu diesem Themenbereich). Weiter wird die partielle thermische Degradation zusammen mit der SKB (Schweden) im Labor der Clay Technology untersucht. Die Auswertung des In-situ-Experiments LOT, Äspö ergab erste Hinweise auf die Art und das Ausmass der thermischen Degradation.

Neue Grossversuche zur Wiederaufsättigung eines BE / HAA-Lagersystems unter nicht-isothermen Bedingungen sind im Felslabor Mont Terri geplant (EU-FP7: PEBS und 1:1 Einlagerungs-Demonstrationsversuch). Die Zweiphasenfluss-Eigenschaften des Bentonits werden für realistische Temperatur- und Sättigungspfade ermittelt werden.

Die Resultate der Untersuchungen über die thermische Degradation und über den Gastransport im Bentonit werden für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch zusammengefasst.

Empfehlung Nr. 4.1.1-11

NEA-IRT, Seite 78:

[Das IRT empfiehlt, dass] mögliche Wechselwirkungen zwischen der Bentonitbarriere und anderen Komponenten des Lagersystems, einschliesslich der Eisen/Bentonit-Wechselwirkung und Silikatzementation, weiter zu untersuchen sind.

Stellungnahme der Nagra:

Die Eisen/Bentonit-Wechselwirkung wird von der Nagra sowohl im Rahmen von internationalen Kooperationen (POSIVA, Finnland) als auch im Rahmen des nationalen Programms intensiv verfolgt (PSI, ETH).

Die Silikatzementation des Porenraums im Bentonit ist ein wichtiger Forschungsschwerpunkt, der von der Uni Bern in Zusammenarbeit mit Clay Technology an den LOT- und ABM-Proben untersucht wird. Die Zusammenarbeit erfolgt im Rahmen der EBS Task Force in Äspö.

Empfehlung Nr. 4.1.1-12

HSK, Seite 156:

Die HSK schliesst sich aber der Schlussfolgerung aus JNC (2000) an, mit der auf die Notwendigkeit hingewiesen wird, die heute vorhandenen Modelle zur Behälterabsenkung in Zukunft weiterzuentwickeln, um die tatsächlich ablaufenden Prozesse im Lagerstollen noch besser abzubilden. Dabei ist insbesondere auch der Einfluss der Temperatur zu berücksichtigen, die in den Kriechprozessen eine wichtige Rolle spielt.

Stellungnahme der Nagra:

Studien von SKB zu diesem Thema liegen inzwischen vor (Börgesson & Hernelind 2006). Diese Modellierungen von Clay Technology im Auftrag der SKB zeigen deutlich, dass für das KBS-3V-Konzept (Lagerung der Behälter in vertikalen Grossbohrungen) die Behälter selbst bei geringen Bentonitdichten nur wenige Millimeter bis Zentimeter absinken können. Diese Resultate werden von der Nagra überprüft und auf das Lagerkonzept der Nagra (horizontale Lagerung der Behälter) übertragen werden. Die Informationen werden für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch zusammengefasst.

4.1.2 Zementhaltige Verfüllmaterialien

Empfehlung Nr. 4.1.2-01

NEA-IRT, Seite 79:

Das IRT empfiehlt, die Entwicklung von alternativen Zementen zu verfolgen, die auf eine Verringerung der chemischen Wechselwirkungen zwischen Verfüllmaterialien und Geosphäre abzielen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra beteiligte sich innerhalb des EU-FP6-Projekts ESDRED an der Entwicklung von Portlandit-freiem Zement. Im Felslabor Mont Terri ist ein Versuch mit entsprechendem Spritzbeton geplant. Der im Jahre 2007 implementierte CI-Versuch (ebenfalls im Felslabor Mont Terri) dient der Untersuchung der Wechselwirkung von herkömmlichem und Portlandit-freiem Zement mit Opalinuston und Bentonit.

4.1.3 BE- / HAA-Endlagerbehälter

Empfehlung Nr. 4.1.3-01

HSK, Seite 138:

Sollte sich im Laufe der weiteren Abklärungen herausstellen, dass bei der Verwendung eines Stahlbehälters der bei der Korrosion entstehende Wasserstoff die Einschussfähigkeit der Nahfeldbarrieren gefährden könnte, besteht die Möglichkeit, statt dessen den als Alternative beschriebenen Kupferbehälter zu verwenden.

Stellungnahme der Nagra:

Der Fortschritt und die Erfahrungen mit Behältern für HAA bzw. BE in anderen Ländern wird aktiv verfolgt und deren Bedeutung periodisch beurteilt. Weiter werden zurzeit auch alternative Behältermaterialien evaluiert.

Empfehlung Nr. 4.1.3-02

KNE, Seiten 7 und G 3:

Seite 7: Bezüglich des durch Korrosion gebildeten Wasserstoffgases wird empfohlen, dessen Einfluss auf die chemischen Reaktionsvorgänge in die Betrachtungen miteinzubeziehen.

Seite G 3: The corrosion process should be re-evaluated and the role of H₂ gas should be assessed.

Stellungnahme der Nagra:

Der Einfluss des Wasserstoffgases auf die Korrosion von Stahl (BE- / HAA-Endlagerbehälter) wurde neu evaluiert (King 2008). Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird nochmals eine Neu- beurteilung vorgenommen.

Empfehlung Nr. 4.1.3-03

KSA, Seite 35:

Es bieten sich folgende Möglichkeiten an, die durch Behälterkorrosion bedingte Gasentwicklung zu reduzieren:

- alternative metallische Werkstoffe mit einem Korrosionsverhalten, das mit einer möglichst geringen Gasproduktionsrate verbunden ist.
- alternative nichtmetallische Werkstoffe, welche nicht durch elektrochemische Prozesse degradieren und daher keinen Wasserstoff produzieren. [...]

Der für die Endlagerbehälter vorgeschlagene Stahl ist bezüglich Gasproduktion verglichen mit vielen anderen metallischen Werkstoffen ein ungünstiges Material.

Stellungnahme der Nagra:

Eine Gruppe von unabhängigen Korrosionsspezialisten evaluiert zurzeit die verschiedenen metallischen Behältermaterialien und wird 2009 einen Bericht mit Empfehlungen verfassen. Parallel dazu werden auch die Entwicklungen auf dem Gebiet der keramischen Werkstoffe verfolgt. In die Gesamtbeurteilung zum weiteren Vorgehen bzgl. der Behältermaterialien wird auch die Frage der Gasfreisetzung durch den Bentonit und den Opalinuston einfließen. Die Resultate aus dieser Gesamtbeurteilung werden mitbestimmen, welche Behälteroptionen in das Rahmenbewilligungsgesuch aufgenommen werden sollen.

Empfehlung Nr. 4.1.3-04

KSA, Empfehlung 3-3, Seiten 37, 38 und 95:

Um eine Gefährdung der Barrierenwirkung des Opalinustons durch die Gasentwicklung infolge Korrosion der Stahlbehälter zu vermeiden, sollen alternative Behälterwerkstoffe und/oder Behälterkonzepte evaluiert werden. [...] Anschliessend soll eine integrale Beurteilung der Gasfrage erfolgen.

Stellungnahme der Nagra:

Neben der Evaluation der Behältermaterialien und der Behälterkonzepte wird auch die Frage der Gasfreisetzung durch den Bentonit und den Opalinuston in die Gesamtbeurteilung der Behältermaterialien einfließen. Deshalb wird auch das Thema der Gasfreisetzung durch den Opalinuston weiter untersucht (vgl. Stellungnahmen zu den Empfehlungen Nr. 1.3.2-01, 1.3.2-02 und 4.1.1-04). Die Resultate aus dieser Gesamtbeurteilung werden mitbestimmen, welche Behälteroptionen in das Rahmenbewilligungsgesuch aufgenommen werden sollen.

Empfehlung Nr. 4.1.3-05

KSA, Seite 35:

Das in Finnland und Schweden vorgesehene Behälterkonzept basierend auf Stahlbehältern mit einer äusseren Wand (Plattierung) aus Kupfer bietet den offensichtlichen Vorteil, dass beim edleren Material Kupfer die Wasserstoffproduktion thermodynamisch nicht möglich ist. Ausserdem korrodiert Kupfer nur in Gegenwart von elementarem Sauerstoff.

Die Gefährdung durch galvanische Effekte bei Defekten in der Kupferplattierung ist untersucht worden. Es konnte gezeigt werden, dass im simulierten Grundwasser unter anaeroben Bedingungen die Korrosionsrate von Gusseisen gekoppelt mit Kupfer praktisch identisch mit ungekoppeltem Gusseisen ist.

Auch die Konsequenzen von Schweissfehlern sind analysiert worden. Hierbei kamen die Autoren zum Schluss, dass Schweissfehler keinen negativen Einfluss auf die lokale Korrosion von Kupferbehältern haben können.

Stellungnahme der Nagra:

Eine Gruppe von unabhängigen Korrosionsspezialisten evaluiert zurzeit die verschiedenen metallischen Behältermaterialien und wird 2009 einen Bericht mit Empfehlungen verfassen. Dabei wird auch Kupfer in die Evaluation mit einbezogen. Die Resultate aus dem Review werden in das Rahmenbewilligungsgesuch einfließen. Parallel dazu werden auch die Entwicklungen auf dem Gebiet der keramischen Werkstoffe verfolgt.

Empfehlung Nr. 4.1.3-06

NEA-IRT, Seiten 68 – 69:

Zusammenfassend gelangt das IRT zur Schlussfolgerung, dass die Bewertung der BE- und HAA-Behälter, als Teil des Mehrfachbarrierensystems, angemessen und im allgemeinen konservativ ist. Obwohl das IRT die Wahl von Stahl als Behältermaterial als angemessen beurteilt, empfiehlt das IRT, dass Kupfer aufgrund seiner Vorteile, einschliesslich der längeren Lebensdauer und der geringeren Gaserzeugung, als Option beibehalten wird. Das IRT hält fest, dass die Fehlerrate bei der Herstellung von Kupferbehältern ungewiss ist, und pflichtet deshalb der Entscheidung der Nagra bei, die Fortschritte bei der Evaluierung von Kupfer in anderen Programmen zu verfolgen (z.B. Schweden und Finnland).

Stellungnahme der Nagra:

Neben der zurzeit laufenden Evaluation von Behältermaterialien werden auch in Zukunft die Fortschritte in anderen Programmen beobachtet. Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden voraussichtlich alternative Behälterkonzepte vorgeschlagen.

Empfehlung Nr. 4.1.3-07

HSK, Seiten 134 und 136:

Seite 134: Bei der detaillierten Analyse in NTB 02-11 stützt sich die Nagra auf diese Korrelation der Lochfrastiefen mit der allgemeinen Korrosion und schliesst auf eine maximale Korrosionstiefe von 1 cm. Diese Überlegung ist nachvollziehbar. Dennoch ist zu bedenken, dass die verwendete Korrelation aus Experimenten bei voll gesättigten Verhältnissen gewonnen wurde, und die Anwendung auf den Zustand im Nahfeld des Tiefenlagers im Opalinuston, wo die Korrosion voraussichtlich bei nur teilweise gesättigten Verhältnissen einsetzt, nicht zweifelsfrei nachgewiesen ist (JNC 2000).

Seite 136: Die HSK teilt in den meisten Fällen die Schlussfolgerungen der Nagra zu den zu erwartenden Korrosionsraten. Sie nimmt aber zur Sulfidkorrosion eine vorsichtiger Haltung ein. Konservativerweise könnte von einer Sulfidkorrosion etwa entsprechend den Abschätzungen im Projekt Kristallin-I (NTB 93–22) ausgegangen werden, d.h. 10 µm/a. Dann wäre die

Sulfidkorrosion der langfristig dominierende Korrosionsvorgang. Die Korrosionstiefe würde in 1000 Jahren etwa 2 cm erreichen, in 10'000 Jahren etwa 11 cm. Bei der Behälterwandstärke der BE-Behälter von 15 cm und bei Berücksichtigung der Druckbeanspruchung im Tiefenlager wäre die minimale Lebensdauer von 1000 Jahren zwar erreicht, die vermutete Lebensdauer von 10'000 Jahren oder mehr aber in Frage gestellt. Die Abschätzungen im Projekt Kristallin-I berücksichtigen die reduzierte Beweglichkeit negativ geladener Ionen im Bentonit (siehe Abschnitt 4.5.3.9) nicht. Die Korrosionsrate wird dadurch überschätzt. Die HSK erachtet es als wichtig, eine tiefere aber noch gesicherte obere Grenze zu bestimmen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Sulfidkorrosion, inkl. Lochfrass und deren maximaler Einfluss wird für das Rahmenbewilligungsgesuch nochmals evaluiert.

Empfehlung Nr. 4.1.3-08

HSK, Seite 136:

Die HSK empfiehlt dennoch, bei der allfälligen weiteren Projektentwicklung die Bedeutung der Schweissnähte für das langfristige Korrosionsverhalten zu untersuchen.

Die Schweissnaht, die den Deckel mit dem Behälterkörper verbindet, muss automatisch oder fernbedient angebracht werden, da das Strahlungsfeld der im Behälter enthaltenen Abfälle intensiv ist. Die Prüfung der Schweissnaht muss ebenfalls automatisch oder fernbedient stattfinden. Die HSK ist der Ansicht, dass diese Aufgaben mit den heutigen technischen Mitteln bewältigt werden können. Sie wird, im Falle der Fortführung des Projektes, im Rahmen der Bewilligungsverfahren die anzuwendenden Verfahren auf die Eignung prüfen.

Stellungnahme der Nagra:

Kritische Aspekte des Herstellungsprozesses (Schweissmethoden, Spannungsanalyse und Inspektion) werden als Teil der Überprüfung/Modifikation des Auslegungskonzepts des Stahlbehälters im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch evaluiert. Diese Aspekte werden für das schliesslich gewählte Behälterkonzept in den folgenden Schritten des Projekts (bis zum Nuklearen Baugesuch) und im Hinblick auf die Herstellung von Prototypen weiter entwickelt. Weiter wird auch das Korrosionsverhalten im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch neu evaluiert.

Empfehlung Nr. 4.1.3-09

HSK, Seite 138:

Um seine Funktionen zu erfüllen, muss der Behälter am Anfang dicht sein, und er muss unter den chemischen und physikalischen Bedingungen des Tiefenlagers die erforderliche Lebensdauer aufweisen. Gewisse Fragen sind dabei offen, die für den Fall einer Weiterführung des Projekts untersucht werden müssen. Diese Fragen betreffen:

- die Dichtheitskontrolle am beladenen Behälter,
- die mechanische Festigkeit der BE-Behälter insbesondere unter anisotroper Belastung,
- die Auswirkungen der Volumenzunahme bei der Korrosion,
- die Möglichkeit einer stärkeren Sulfidkorrosion.

Der als Alternative betrachtete Kupferbehälter mit Innenbehälter aus Eisen würde voraussichtlich während noch längerer Zeit (mehrere 100'000 Jahre) einen absoluten Einschluss gewährleisten. Dank der geringeren Korrosionsrate, die insbesondere von der Zufuhr von Sulfid abhängt, würde weniger Wasserstoffgas entstehen. Diese Behältervariante wirft hingegen andere Fragen auf, z.B. zur galvanischen Korrosion von Eisen und Kupfer, die es zu klären gäbe.

Stellungnahme der Nagra:

Kritische Aspekte des Herstellungsprozesses (Schweissmethoden, Spannungsanalyse und Inspektion) werden als Teil der Überprüfung/Modifikation des Auslegungskonzepts des Stahlbehälters im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch evaluiert. Auch das Korrosionsverhalten von Stahl wird im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch neu evaluiert. Weiter werden auch alternative Behälterkonzepte betrachtet, und es ist vorgesehen, im Rahmenbewilligungsgesuch verschiedene Behälterkonzepte als Möglichkeit einzubringen.

Empfehlung Nr. 4.1.3-10

HSK, Seite 131:

Es ist empfehlenswert, frühzeitig Prototypen [der Abfallbehälter] herstellen zu lassen, um rechtzeitig Erfahrungen mit den Prozessen der Herstellung und des Schweissens (auch des Deckels) zu sammeln.

Stellungnahme der Nagra:

Kritische Aspekte des Produktionsprozesses (Schweissen, Spannungsanalyse und Inspektion) werden als Teil der Behälterausslegung auf Stufe Konzept für das Rahmenbewilligungsgesuch evaluiert. Diese Aspekte werden in den folgenden Schritten des Projekts (Detailauslegung, Prototypenherstellung, etc.) stufenweise verfeinert. Dazu gehört in einer späteren Phase (nach der Rahmenbewilligung, aber vor dem nuklearen Baubewilligungsgesuch) die Herstellung von Prototypen.

4.1.5 Versiegelung und Verschluss

Empfehlung Nr. 4.1.5-01

HSK, Seite 97:

Bei einer Fortführung des Projekts ist eine Konkretisierung des Verfüll- und Versiegelungskonzeptes und eine Bestätigung der materialtechnischen Kennwerte im Rahmen der Bewilligungsschritte vorzulegen.

Stellungnahme der Nagra:

Konzepte zur Rückfüllung und Versiegelung des Lagers werden für das Rahmenbewilligungsgesuch weiter detailliert. In-situ-Versuche zur Präzisierung der Versiegelungskonzepte werden zurzeit am Mont Terri durchgeführt bzw. sind in Planung. Die detaillierte Auslegung erfolgt für das nukleare Baugesuch.

Empfehlung Nr. 4.1.5-02

KSA, Empfehlung 5-5, Seiten 49, 51 und 96:

Es sollen Anforderungen an Festigkeit und Durchlässigkeit der Verschlüsse quantifiziert und in Ausführungsspezifikationen umgesetzt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Anforderungen an Festigkeit und hydraulische Eigenschaften der Verschlüsse und Schlüsselzonen des Lagers werden im Rahmen des Requirements Management Prozesses entwickelt und in der Berichterstattung zum Rahmenbewilligungsgesuch aufgeführt. Zur Bestätigung der Annahmen und zum Nachweis der Machbarkeit wurden bereits kleinskalige Versuche im Mont Terri durchgeführt (EU-FP6: ESDRED – SB-Versuch). Weitere Versuche unter realistischen Randbedingungen sind geplant (Mont Terri Stollenversiegelungsversuch).

Empfehlung Nr. 4.1.5-03

HSK, Seite 97:

Zu einem Versiegelungskonzept gehört nach Ansicht der HSK auch eine Darlegung möglicher Unzulänglichkeiten und Störfälle beim Einbau der Siegelstrecken und deren Konsequenzen auf die Langzeitsicherheit.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden auf konzeptioneller Ebene die Anforderungen an die Versiegelung definiert und die grundsätzliche Machbarkeit der Versiegelungen unter Berücksichtigung dieser Anforderungen evaluiert. Dazu gehört auch eine Beurteilung möglicher Abweichungen bei der Erstellung. Die diesbezüglichen Überlegungen werden für die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht verfeinert. Zusätzlich werden Modellierungen durchgeführt, welche die Auswirkung eines Versagens der Versiegelung simulieren.

Empfehlung Nr. 4.1.5-04

KNE, Seiten H 17 – H 18:

Zu den Selbstverschlussbauwerken werden von der Nagra im Rahmen des Entsorgungs- und des Standortnachweises keine weiteren Detailangaben vorgelegt. Zu dieser Anforderung wird noch ein erheblicher Forschungsbedarf im Rahmen der weiteren Realisierungsschritte für ein geologisches Endlager gesehen.

Stellungnahme der Nagra:

Im Entwurf der neuen HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008) wird anstelle eines Selbstverschlussbauwerks ein schneller Verschluss verlangt. Ein diesbezügliches Konzept wird für das Rahmenbewilligungsgesuch ausgearbeitet, welches im Hinblick auf die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht vertieft wird.

Empfehlung Nr. 4.1.5-05

KSA, Empfehlung 5-1, Seiten 45, 50 und 96:

Die Machbarkeit eines Selbstverschlussbauwerks soll in einer Studie abgeklärt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.1.5-04.

4.2 Prozessverständnis im Nahfeld**4.2.1 Geochemische Immobilisierung und Retardierung****Empfehlung Nr. 4.2.1-01**

HSK, Seite 159:

Für die Berechnung der Zusammensetzung des Referenz-Bentonitwassers standen der Nagra Gleichgewichtsdaten aus der Literatur zur Verfügung, die für 25°C gelten. Die Wasserzusammensetzung in Tabelle 4.5-2 gilt daher ebenfalls für eine Temperatur von 25°C. Die Temperatur des Wirtgesteins liegt hingegen bei 38°C. Zur Zeit des Behälterversagens (10'000 Jahre nach Verschluss des Lagers) wird die Temperatur im Nahfeld, verursacht durch die Wärme-Produktion der Abfälle, noch bei etwa 50°C liegen. Diese Temperaturdifferenzen werden erfahrungsgemäss keinen entscheidenden Einfluss auf die Porenwasserchemie haben. Für den Fall eines frühen Behälterversagens bei Nahfeldtemperaturen bis zu 90°C (die minimale Auslegungs-Lebensdauer des Behälters beträgt 1'000 Jahre) ist jedoch ein signifikanter Temperatureffekt nicht auszuschliessen. Im Falle der Fortführung des Projekts wäre dieser Aspekt abzuklären.

Stellungnahme der Nagra:

Beim Aufdatieren der thermodynamischen Datenbank, welche für die Modellierung der Porenwasser-Zusammensetzung verwendet wird, wird der Temperaturabhängigkeit vermehrt Beachtung geschenkt werden. In Zusammenarbeit mit dem Technical Research Centre of Finland (VTT) wird die Zusammensetzung des Porenwassers in kompaktiertem Bentonit, insbesondere der pH-Wert, weiter untersucht. Die verbleibenden Ungewissheiten werden in die Sicherheitsanalyse für das Rahmenbewilligungsgesuch einfließen.

Empfehlung Nr. 4.2.1-02

NEA-IRT, Seiten 82 – 83:

Für zukünftige Projektphasen empfiehlt das IRT der Nagra jedoch:

- ihre Anstrengungen im Gebiet der geochemischen Rückhaltung fortzuführen;
- die Untersuchungen zu ihrem Ansatz, der auf der Verwendung von K_d -Werten aus Batch-Sorptionsexperimenten in der Sicherheitsanalyse beruht, fortzusetzen;
- die Stichhaltigkeit der Verwendung von natürlichen Analoga nachzuweisen;
- die Diffusionsprozesse im Opalinuston vertiefter auszuarbeiten.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchung der Diffusion von Radionukliden in Opalinuston, die Untersuchung der Konsistenz zwischen scheinbaren Diffusionskoeffizienten und Sorptionsmessungen im Batch-Verfahren (Bradbury & Baeyens 2002, Van Loon et al. 2005b) und die Untersuchung der Abhängigkeit scheinbarer Diffusionskoeffizienten von der Porenwasserchemie (Glaus et al. 2007) gehören zu den Schwerpunkten der Forschung am LES / PSI. Im Felslabor Mont Terri wurden und werden Versuche zur Erforschung des Diffusionsverhaltens von Radionukliden im Opalinuston durchgeführt (DI, FM-C, DI-A, DI-A2, DI-B, DR, DR-A). Versuche in ähnlichen Tongesteinen (v.a. Callovo-Oxfordien in Frankreich) werden beobachtet. Die Untersuchung von natürlichen Profilen (Cl, Isotope) wird weitergeführt, z.B. am Mont Russelin. In diesen Fragen besteht auch eine internationale Zusammenarbeit, z.B. innerhalb des EU-FP6-Projekts FUNMIG. Die neuen Erkenntnisse werden auch in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-03

NEA-IRT, Seite 66 und KNE, Seite 7:

NEA-IRT: Das Verständnis des Verhaltens der Nahfeldbarrieren setzt die Kenntnis der unterschiedlichen chemischen, physikalischen und geochemischen Prozesse voraus, welche die Löslichkeits-, Speziations-, Sorptions- und Diffusionseigenschaften von gelösten Elementen in jeder einzelnen Barriere kontrollieren. Das IRT anerkennt den beträchtlichen Arbeitsaufwand bei der Erstellung und beim Unterhalt der thermodynamischen Datenbank der Nagra/PSI (Hummel et al. 2002), welche die verfügbaren Datensätze und die entsprechenden Ungewissheiten berücksichtigt. Das IRT ermutigt die Nagra, diese Aktivitäten fortzusetzen und neue Entwicklungen eng zu verfolgen, und erkennt die Bereitschaft der Nagra dazu an, wie aus deren Unterstützung der einschlägigen NEA-Aktivitäten nachweislich erkennbar ist.

KNE: Im Hinblick auf spätere Forschungsarbeiten empfiehlt die KNE, die Lücken in den thermodynamischen Datensätzen durch internationale Forschungsprojekte zu schliessen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra wird weiterhin die Aktivitäten der NEA im Zusammenhang mit für die Endlagerung relevanten internationalen Studien zu thermodynamischen Datenbasen unterstützen. Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden die neuen Erkenntnisse berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-04

NEA-IRT, Seite 12:

Das IRT ist der Ansicht, dass sich das Nagra-Programm zu den Eigenschaften des Tons bzgl. Radionuklid-Rückhaltung an der Spitze der wissenschaftlichen Forschung befindet. Das IRT geht mit der Nagra einig, dass dieses Programm fortgesetzt werden sollte, um das Verständnis der Eigenschaften des Opalinustons und auch des Bentonits weiter zu erhöhen und Ungewissheiten zu vermindern.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchung der Diffusion von Radionukliden in Opalinuston und kompaktiertem Bentonit (Bradbury et al. 2005, Dähn et al. 2003, Dähn et al. 2006), inkl. Temperaturabhängigkeit, die Untersuchung der Konsistenz zwischen scheinbaren Diffusionskoeffizienten und Sorptionsmessungen im Batch-Verfahren (Bradbury & Baeyens 2002, Van Loon et al. 2005b) und die Untersuchung der Abhängigkeit scheinbarer Diffusionskoeffizienten von der Porenwasserchemie (Glaus et al. 2007) gehören zu den Schwerpunkten der Forschung am LES / PSI. Im Felslabor Mont Terri wurden und werden Versuche zur Erforschung des Diffusionsverhaltens von Radionukliden im Opalinuston durchgeführt. In der Frage besteht auch eine internationale Zusammenarbeit z.B. innerhalb der EU-FP6 Projekte NF-PRO und FUNMIG. Die neuen Erkenntnisse werden in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-05*HSK, Seite 202:*

Die HSK empfiehlt der Nagra, im Fall einer Weiterführung des Projekts das Diffusionsverhalten weiterer Radionuklide im Opalinuston zu untersuchen, damit realistischere Voraussagen über D_e gemacht und Unsicherheiten abgebaut werden können.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchung der Diffusion von Radionukliden in Opalinuston gehört zu den Schwerpunkten der Forschung am LES / PSI. Im Felslabor Mont Terri wurden und werden Versuche zur Erforschung des Diffusionsverhaltens von Radionukliden im Opalinuston durchgeführt (Wersin et al. 2008, Van Loon et al. 2003, Van Loon et al. 2004, Van Loon et al. 2005a). Die laufenden Untersuchungen berücksichtigen Kat- und Anionen, sowie die Anisotropie des Opalinustons. In diesen Fragen besteht auch eine internationale Zusammenarbeit, z.B. innerhalb des EU-FP6-Projekts FUNMIG. Die neuen Erkenntnisse werden in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-06*NEA-IRT, Seiten 81 – 82:*

Das IRT ermutigt die Nagra jedoch, die Möglichkeiten anderer, in neuerer Zeit entwickelten Methoden auf dem Gebiet der Diffusions- und Retentionsstudien zu erforschen, wie z.B. die Elektromigrations-Methode (Maes et al. 2002). [...]

Mit dem Ziel, das Vertrauen in das Systemverhalten insgesamt zu erhöhen, ermutigt das IRT die Nagra, ihren Ansatz, der in der Verwendung von K_d -Werten aus Batch-Sorptionsexperimenten in den Modellrechnungen der Sicherheitsanalyse besteht, weiter zu validieren. Dies gilt insbesondere für redox-sensitive Elemente (Tc, U und Np), und für den Nachweis der Stichthaltigkeit von natürlichen Analoga (zum Beispiel Th(IV) und Tc(IV)). [...]

Das IRT ermutigt die Nagra jedoch, die detaillierten Diffusionsprozesse in Tonsystemen vertiefter auszuarbeiten, um die noch offenen Fragen, wie z.B. die erhöhte effektive Diffusivität von Na^+ gegenüber Tritium, zu klären.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchung der Diffusion von Radionukliden in Opalinuston, die Untersuchung der Konsistenz zwischen scheinbaren Diffusionskoeffizienten und Sorptionsmessungen im Batch-Verfahren (Bradbury & Baeyens 2002, Van Loon et al. 2005b) und die Untersuchung der Abhängigkeit scheinbarer Diffusionskoeffizienten von der Porenwasserchemie (Glaus et al. 2007) gehören zu den Schwerpunkten der Forschung am LES / PSI. Im Felslabor Mont Terri wurden und werden Versuche zur Erforschung des Diffusionsverhaltens von Radionukliden im Opalinuston durchgeführt. In der Frage besteht auch eine internationale Zusammenarbeit, z.B. innerhalb des EU-FP6-Projekts FUNMIG. Die neuen Erkenntnisse werden in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-07

KNE, Seite 7 und HSK, Seiten 196 – 200:

KNE: Die Untersuchungen zum Sorptionsverhalten der Radionuklide sind weiterzuführen und zu vervollständigen.

HSK: [Zusammenfassung der Diskussion zur Radionuklidsorption im Opalinuston: Bei den Elementen Mo, Sn, I, Cs, Po, Pa, U und Np akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten eine tiefere untere Limite und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor.

Für Zr, Nb, Tc und die dreiwertigen Actinide setzt die HSK tiefere Referenzwerte ein als die Nagra.]

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra wird bei der Aktualisierung der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch in Zusammenarbeit mit dem LES / PSI die Werte neu evaluieren, die verwendeten Analogien (Th(IV) für Tc(IV) und Sn(IV) für Zr(IV)) überprüfen und neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigen. Diesbezügliche Forschungsarbeiten sind auch am PSI im Gange (Bradbury & Baeyens 2005a, Glaus et al. 2005, Bradbury & Baeyens 2007) oder geplant, z.B. Untersuchungen des Karbonateinflusses auf die Sorption von Ni, U(VI) und Eu (als Analogon für die dreiwertigen Actinide) an Illit innerhalb des EU-FP6-Projekts FUNMIG (Bradbury & Baeyens 2006c).

Empfehlung Nr. 4.2.1-08

HSK, Seiten 164 – 170:

[Zusammenfassung der Diskussion zur Radionuklidsorption in der Bentonit-Barriere: Bei den Elementen Sn, I, Po, Th, Pa, U und Np akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten eine tiefere untere Limite und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor.

Für Zr, Nb, Tc, Cs und die dreiwertigen Actinide setzt die HSK tiefere Referenzwerte ein als die Nagra.]

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra wird bei der Aktualisierung der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch in Zusammenarbeit mit dem LES / PSI die Werte neu evaluieren und neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigen. Diesbezügliche Forschungsarbeiten sind auch am PSI im Gange (Bradbury & Baeyens 2005b, Bradbury & Baeyens 2005c, Bradbury & Baeyens 2006a) oder geplant, z.B. Untersuchungen des Karbonateinflusses auf die Sorption von Ni, U(VI) und Eu (als Analogon für die dreiwertigen Actinide; Marques et al. 2008) an Montmorillonit innerhalb des EU-FP6-Projekts NF-PRO sowie die Messung der Diffusion von Cs in kompaktiertem Bentonit (Van Loon & Glaus 2008).

Empfehlung Nr. 4.2.1-09*KNE, Seite G 3:*

The radionuclides are likely to sorb to magnetite or be incorporated into siderite. Unfortunately there is no quantitative information at present.

Stellungnahme der Nagra:

Die grossen Mengen an Eisenkorrosionsprodukten werden sicherlich zur Rückhaltung der Radionuklide beitragen. Da bisher keine entsprechenden Daten für die Sorption oder Inkorporation zur Verfügung standen, wurde diese Rückhaltung als Reserve-FEP behandelt. Im Rahmen des Sicherheitsnachweises für das Rahmenbewilligungsgesuch wird evaluiert, wie weit dieser zur Sicherheit beitragende Reserve-FEP aktiviert werden kann.

Empfehlung Nr. 4.2.1-10*HSK, Seite 188:*

Generell ist zu sagen, dass bezüglich des chemischen Verhaltens vieler Radionuklide bei den hohen pH-Werten des Zementwassers Kenntnislücken bestehen. Die Nagra hat diese Tatsache teilweise berücksichtigt; die HSK hat vorsichtshalber die unteren Grenzwerte zum Teil stark herabgesetzt. Wie die Berechnungen der HSK zeigen, stellt die Verwendung dieser bewusst konservativ gewählten unteren Grenzwerte den Sicherheitsnachweis jedoch nicht in Frage. Für das Verständnis des Verhaltens der Radionuklide in der Zementmatrix ist es jedoch wichtig, die unter diesen Bedingungen stattfindenden Gleichgewichtsreaktionen zu kennen. Die HSK empfiehlt, die notwendigen thermodynamischen Daten zu erheben, um die Ungewissheiten zu reduzieren.

Stellungnahme der Nagra:

Bei den PSI-Arbeiten und bei der Aktualisierung der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch wird der Quantifizierung von Ungewissheiten vermehrte Beachtung geschenkt. Die Herabsetzung der Referenzwerte für Lanthanide und Actinide wird von der HSK mit einer möglichen Abhängigkeit der Sorptionswerte betroffener Elemente vom fest – flüssig – Verhältnis im Experiment begründet. Gegenwärtige Untersuchungen am PSI gehen auch dieser Frage nach (Tits et al. 2003, Tits et al. 2006a, Tits et al. 2006b, Wieland et al. 2006, Wieland et al. 2008, Bonhoure et al. 2006, Vespa et al. 2006a, Vespa et al. 2006b). In Bezug auf thermodynamische Daten beteiligt sich die Schweiz (HSK, Nagra, PSI) am TDB-Projekt der OECD/NEA (NEA 2005), welches solche Daten aus der internationalen Literatur zusammenstellt und rezensiert. Tatsächlich sind nur wenige Gleichgewichtskonstanten für hohe pH-Werte vorhanden. Lücken werden durch das PSI jedoch höchstens punktuell mit eigenen Messungen gefüllt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-11

HSK, Seite 171:

Für den Fall einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK der Nagra, das Diffusionsverhalten sorbierender Radionuklide im Bentonit eingehender zu untersuchen. Dadurch könnten realistischere Voraussagen über D_e gemacht und Unsicherheiten abgebaut werden. Im Weiteren empfiehlt die HSK, den Einfluss der Temperatur auf das Diffusionsverhalten der Radionuklide im Bentonit abzuklären.

Stellungnahme der Nagra:

Die Untersuchung der Diffusion von Radionukliden in kompaktiertem Bentonit (inkl. Temperaturabhängigkeit), die Untersuchung der Konsistenz zwischen scheinbaren Diffusionskoeffizienten und Sorptionsmessungen im Batch-Verfahren (Bradbury & Baeyens 2002, Van Loon et al. 2005b) und die Untersuchung der Abhängigkeit scheinbarer Diffusionskoeffizienten von der Porenwasserchemie (Glaus et al. 2007) gehören zu den Schwerpunkten der Forschung am LES / PSI. In dieser Frage bestehen verschiedene internationale Zusammenarbeiten z.B. innerhalb des EU-FP6-Projekts NF-PRO. Die neuen Erkenntnisse werden in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-12

KNE, Seiten 7 und G 3:

Seite 7: Bezüglich des durch Korrosion gebildeten Wasserstoffgases wird empfohlen, dessen Einfluss auf die chemischen Reaktionsvorgänge in die Betrachtungen miteinzubeziehen.

Seite G 3: The corrosion process should be re-evaluated and the role of H_2 gas should be assessed.

Stellungnahme der Nagra:

Die verschiedenen Faktoren, welche die Redox-Reaktionen bestimmen, und auch das Redox-Verhalten spezifischer Radionuklide wird am PSI und in Zusammenarbeit mit weiteren Partnern untersucht.

Empfehlung Nr. 4.2.1-13

KNE, Seite G 10:

Further research requirements:

- i. the sorption of Fe (II)
- ii. the sorption of Np(V) and Pu(V)
- iii. the sorption of U(VI).

Stellungnahme der Nagra:

U(VI) wird am LES / PSI gegenwärtig untersucht (Harfouche et al. 2006). Die Untersuchung von Redox-sensitiven Elementen wie Np ist in Planung. Eisen ist im Zement selber in so hohen Konzentrationen vorhanden, dass es durch Festkörper löslichkeitsdominiert sein wird (vgl.

Wieland & Van Loon 2002). Das Verhalten von Fe(II) / Fe(III) in Zement wird in der Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.2.1-14 diskutiert. Die neuen Erkenntnisse werden in der Sorptions-Datenbank für das Rahmenbewilligungsgesuch berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-14

KNE, Seite G 5:

It would be important to assess the role of cement minerals in the speciation/stabilisation of Fe(II) and Fe(III).

Stellungnahme der Nagra:

In Zusammenarbeit zwischen LES / PSI und EMPA (B. Lothenbach) werden im Rahmen des Nationalfondsprojekts "Fate of iron during the hydration of cement" (Start: 2008) die Grundlagen der Eisenspeziation in Zement untersucht.

Empfehlung Nr. 4.2.1-15

HSK, Seiten 177 – 178:

Kleine Unsicherheiten bestehen noch: In NTB 97-04 wurde festgestellt, dass die Abbauprodukte unreiner Zellulosematerialien einen stärkeren Einfluss auf die Sorption von Ni(II) haben können als ISA. Eine Überprüfung dieses Sachverhalts wäre für das Verständnis der Vorgänge wertvoll, weil Ni(II) als Modellkation für Metallionen der Oxidationsstufe +II verwendet wird. Allerdings ist dies für die Sicherheitsanalyse nicht direkt von Belang, da die Nagra im Zement nicht mit einer Sorption von Ni(II) und seinen Homologen rechnet.

Stellungnahme der Nagra:

Voruntersuchungen am PSI ergaben, dass solche Abklärungen mit grossem Aufwand verbunden sind. Sie wurden vorläufig zurückgestellt, weil aufgrund chemischer Überlegungen angenommen werden kann, dass der Effekt auf "weiche" zweiwertige Kationen durch im Abfall vorhandenes Cyanid überspielt wird. Die internationale Forschung auf dem Gebiet der alkalischen Zersetzung von zelluloseartigen Materialien wird weiter beobachtet.

Empfehlung Nr. 4.2.1-16

HSK, Seiten 159 – 164:

[Zusammenfassung der Diskussion zu den maximalen Löslichkeiten im Bentonit-Porenwasser: Bei den Elementen Zr, Sn und den Lanthaniden Sm und Ho akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten eine höhere obere Limite und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor.

Für die Elemente Sr, Ra und Pa und für U unter oxidierenden Bedingungen setzt die HSK höhere Referenzwerte ein als die Nagra.]

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra wird bei der Aktualisierung der Löslichkeitslimiten für das Rahmenbewilligungsgesuch in Zusammenarbeit mit dem LES / PSI die Werte neu evaluieren und neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigen. Diesbezügliche Arbeiten sind am PSI im Gange oder geplant, z.B. die Aufdatierung der Nagra/PSI-thermodynamischen Datenbank sowie die Untersuchung der Mischphasenbildung von Ra in Zusammenarbeit mit JAEA.

Empfehlung Nr. 4.2.1-17*KSA, Seite 66:*

Die Bestimmung von Löslichkeitslimiten in wässrigen Lösungen wie Bentonitporenwasser ist mit Unsicherheiten verbunden. Auf Grund der Erfahrungen mit Deponiewässern hat die KSA den Eindruck, dass die in der Sicherheitsanalyse verwendeten Werte eher optimistisch sind.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch werden die Löslichkeitslimiten überprüft werden. Der heutige Kenntnisstand stützt den Eindruck der KSA nicht. Die jetzt verwendeten Löslichkeitslimiten berücksichtigen in der Regel die Löslichkeit von unter den vorherrschenden chemisch-physikalischen Bedingungen sich bildenden reinen Festkörpern, nicht aber den Einbau der in Spuren vorhandenen Radionuklide in andere Festkörper. Solche Mischphasen, die in der Natur eher die Regel sind, führen zu tieferen Löslichkeitslimiten. Beim Vergleich mit Deponiesickerwässern müssen die geochemischen Bedingungen und Störeinflüsse mitberücksichtigt werden.

Empfehlung Nr. 4.2.1-18*KNE, Seite 7:*

Für zukünftige Modellrechnungen des LMA-Zement-Systems empfiehlt die KNE, statt mit einfachen Mischungstank-Modellen die Quellterme unter Berücksichtigung der Diffusionsprozesse zu modellieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra ist in Zusammenarbeit mit dem PSI daran, detailliertere Modelle zur Abschätzung der zeitlichen Entwicklung der chemischen Bedingungen im LMA-Nahfeld bereitzustellen. Diese Modelle sollen für die Erarbeitung der Unterlagen für das Rahmenbewilligungsgesuch verwendet werden.

Empfehlung Nr. 4.2.1-19*HSK, Seiten 181 – 184:*

[Zusammenfassung der Diskussion zu den maximalen Löslichkeiten im Zement-Porenwasser: Bei den Elementen Se, Zr, und Ra akzeptiert die HSK den Referenzwert, zieht aber wegen vorhandener Ungewissheiten eine höhere obere Limite und damit eine grosszügigere Sicherheitsmarge vor.

Für das Element U setzt die HSK einen höheren Referenzwert und eine höhere obere Limite ein als die Nagra.]

Stellungnahme der Nagra:

Die Abweichungen der HSK-Werte von den Nagra/LES-Werten sind relativ gering. Die Nagra wird bei der Aktualisierung der Löslichkeitslimiten für das Rahmenbewilligungsgesuch in Zusammenarbeit mit dem LES / PSI die Werte neu evaluieren und neue wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigen. Die Aufdatierung der Nagra/PSI-thermodynamischen Datenbank (Hummel et al. 2002) wurde eingeleitet.

Empfehlung Nr. 4.2.1-20*KNE, Seite G 12:*

Very little is known of Proactinium. I agree with Hans Wanner's statements and think that further research is definitely required on this element.

Stellungnahme der Nagra:

In der Tat ist der Kenntnisstand über die Pa-Chemie sehr beschränkt. Dies ist zum Teil auf die schwierige Handhabung des Elementes im Labor zurückzuführen. Dieses Problem können Nagra und LES / PSI nicht lösen. Aus Sicht der Sicherheitsanalyse hat die Verbesserung des Kenntnisstands bezüglich Pa nicht erste Priorität, da wegen der im Vergleich zu seinem Vorgänger U-235 ($7 \cdot 10^8$ a) relativ kurzen Halbwertszeit von $3 \cdot 3 \cdot 10^4$ a für Pa-231 die Löslichkeitslimite und Sorption eine begrenzte Bedeutung haben.

Empfehlung Nr. 4.2.1-21*HSK, Seiten 163 – 164:*

Das Mischphasenmodell der Nagra setzt voraus, dass das Ra-Inventar des Abfalls im gesamten Bentonit verteilt ist, was zumindest in der Anfangsphase der Freisetzung nicht zutrifft. Für diese Phase ist die auf dem Sättigungsmodell mit RaSO_4 beruhende höhere Löslichkeit von $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ zu verwenden. Der von der Nagra vorgeschlagene, tiefere Wert wird zu einem späteren Zeitpunkt der Freisetzung realistischer sein. Mit den vorhandenen Kenntnissen ist es jedoch schwierig, diesen Zeitpunkt abzuschätzen. Deshalb verwendet die HSK vorläufig den Wert von $5 \cdot 10^{-8} \text{ mol dm}^{-3}$ als Referenzwert. Für den Fall einer Weiterführung des Projekts empfiehlt die HSK der Nagra, die Bildung von Mischphasen vertieft zu untersuchen und der Frage der Kinetik besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Stellungnahme der Nagra:

Das LES / PSI begann in Zusammenarbeit mit der Japan Atomic Energy Agency (JAEA) eine Studie zum Einbau von Radium in Bariumminerale und Calcit. Das Thema Mischphasen wurde auch innerhalb des NEA-TDB-Projekts aufgegriffen. Die Anwendung scheitert meist am Datenmangel und an der Ungewissheit, ob sich solche Mischphasen in den relevanten Zeiträumen bilden können; Radium ist eines der wenigen Beispiele, wo die Behandlung als Mischphase Erfolg versprechend ist. Falls die Fortschritte es erlauben, werden beim Rahmenbewilligungsgesuch für ausgewählte Elemente Mischphasen berücksichtigt.

Empfehlung Nr. 4.2.1-22

NEA-IRT, Seite 77:

Co-Präzipitation ist ein "Reserve-FEP" und die Nagra sollte danach trachten, sie in Modelle einzubauen, sobald mehr Daten verfügbar sind.

Stellungnahme der Nagra:

Für den Sicherheitsbericht zum Rahmenbewilligungsgesuch wird geprüft werden, ob die Mischphasenbildung auch für andere Elemente als Ra in der Modellierung berücksichtigt werden kann. Die Schweiz (HSK, Nagra, PSI) beteiligt sich am NEA-TDB-Projekt, im Rahmen dessen im Jahr 2007 eine diesbezügliche Studie veröffentlicht wurde. Die Chancen einer Quantifizierung der Mischphasenbildung für andere Elemente sind aber in naher Zukunft nicht sehr hoch wegen Mangel an Daten und Argumentationsschwierigkeiten über die Mischphasenbildung in relevanten Zeiträumen (vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.2.1-21).

4.3 Konzepte für Monitoring und Rückholbarkeit**4.3.1 Monitoring****Empfehlung Nr. 4.3.1-01**

KNE, Seite H 17:

Die Langzeitüberwachung ist durch den stufenweise ausgeführten Verschluss der Anlage so lang gewährleistet, bis das Pilotlager und das weiterhin betriebene Testlager nicht mehr zugänglich sind. Auch hier gilt wiederum die Argumentation wie schon beim Pilotlager, dass zunächst noch festzulegen ist, welche Langzeitüberwachungen durchgeführt werden sollen bzw. müssen. Daher ist die Anforderung der Langzeitüberwachung gemeinsam mit der Anforderung des Pilotlagers weiter zu diskutieren.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird ein Konzept bzgl. Monitoring erstellt, welches auch die Überwachung des Pilotlagers bzw. Langzeituntersuchungen im Pilotlager und im Testlager (Felslabor) sowie eine Langzeitüberwachung an anderen Orten (auch an der Oberfläche) umfasst. Dieses Konzept wird im Hinblick auf die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet.

Die Arbeiten im geplanten EU-FP7-Projekt MoDeRn schliessen auch Abklärungen bezüglich der Überwachung eines Pilotlagers ein.

Empfehlung Nr. 4.3.1-02

KSA, Empfehlung 5-4, Seiten 48, 51 und 96:

Es sollen ein Monitoringkonzept für die Überwachung des Pilotlagers erstellt und die Forschung und Entwicklung für den Einsatz geeigneter langzeitstabiler Messsysteme zielgerichtet vorangetrieben werden.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird ein Konzept bzgl. Monitoring erstellt, welches auch die Überwachung des Pilotlagers umfasst. Dieses Konzept wird dann im Hinblick auf die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet. Weiter wird im Rahmen partnerschaftlicher Projekte an der Entwicklung von Messsystemen und deren Erprobung gearbeitet.

Zurzeit laufen Verhandlungen mit der EU zur Durchführung des EU-FP7 Projekts MoDeRn. Dieses Projekt schliesst sowohl die Ausarbeitung von Monitoringkonzepten als auch die Instrumentenentwicklung ein (z.B. 'wireless transmission', 'non-intrusive' Monitoring). Die Rolle eines Pilotlagers und ein darauf abgestimmtes Monitoringprogramm werden ebenfalls in diesem EU-Projekt diskutiert werden.

Empfehlung Nr. 4.3.1-03*KSA, Seite 47:*

Ergänzend stellt die KSA fest, dass die EKRA gemäss Konzeptskizze über dem Wirtgestein Stollen für die Umweltüberwachung sowie eine Trennung der Zugänge zu Pilot- und Hauptlager ebenfalls über dem Wirtgestein vorsieht. Diese konzeptionellen Elemente sind im Layout gemäss EN 2002 nicht aufgenommen und werden von der Nagra auch nicht angesprochen. Allerdings legt auch die EKRA in ihren Berichten keine weiteren Überlegungen dazu dar. Eine Auseinandersetzung damit erscheint der KSA angezeigt, wobei bezüglich des Beobachtungskonzepts ohnehin noch grundlegende Arbeit geleistet werden muss (siehe Unterkapitel 5.4). In diesem Zusammenhang sollte gleichzeitig auch die Frage erörtert werden, ob es sinnvoll ist, mit dem Zugangstunnel den Lagerbereich zu überfahren, oder ob der Tunnel seitlich zur Lagerfläche anzulegen ist.

Stellungnahme der Nagra:

Für das Rahmenbewilligungsgesuch wird ein Monitoringkonzept ausgearbeitet. In diesem wird auch die Umweltüberwachung bearbeitet. Das Monitoringkonzept wird im Hinblick auf die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet. Dazu gehören auch Abklärungen bzgl. Linienführung der Rampe und ihre allfällige Nutzung für die Umweltüberwachung. Als wichtige Randbedingung für die Auslegung der Anlagen bzgl. Monitoring / Umweltüberwachung gibt der Entwurf der HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008) vor, dass bei der Auslegung keine Kompromisse bzgl. Langzeitsicherheit gemacht werden dürfen; deshalb versucht die Nagra, die Anzahl Tunnels, Rampen und Schächte zu minimieren, welche die Wirksamkeit des Wirtgesteins beeinträchtigen könnten. Bei der Optimierung des Designs wird überprüft, inwieweit eine Trennung der Zugänge zu Pilot- und Hauptlager unter Berücksichtigung der Priorität der Sicherheitsaspekte sinnvoll und machbar ist.

Empfehlung Nr. 4.3.1-04*KNE, Seite H 11:*

Die exakten Detailanforderungen an das Pilotlager hinsichtlich der vorzusehenden Ausstattung sind in den weiteren Projektphasen noch entsprechend zu definieren durch die Nagra.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für das Pilotlager unter Berücksichtigung von Überwachungskonzepten erarbeitet, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Diese Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die Auslegung, inkl. Ausstattung erfolgt auf Grundlage von standortspezifischen Untersuchungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.3.1-05*KNE, Seite H 16:*

Die im Pilotlager durchzuführenden Langzeituntersuchungen sind jedoch noch nicht bekannt. Zur endgültigen Beurteilung des Layouts des Pilotlagers und der Kontrollstollen sind somit weitere Angaben notwendig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Stellungnahme der Nagra:

Die Vertiefung der Konzepte für die Untersuchungen im Pilotlager erfolgt stufengerecht und die Auslegung des Pilotlagers erfolgt definitiv im Rahmen des nuklearen Baubewilligungsgesuchs.

Empfehlung Nr. 4.3.1-06*HSK, Seite 93:*

Die Überwachung des spaltbaren Materials stellt in den Augen der HSK keine besonderen Anforderungen und kann gemäss den Vorschriften der IAEA (Safeguards) erfolgen. Die entsprechenden Überwachungsmechanismen werden bereits heute angewandt und die Einlagerung der Abfälle, die Versiegelung der Stollen und schliesslich der Lagerverschluss vermindern stufenweise das Risiko einer illegalen Entfernung spaltbaren Materials. Die Vorgaben einer nach Lagerverschluss weitergehenden Überwachung des Lagers bleiben noch zu entwickeln.

Stellungnahme der Nagra:

Erste Konzepte zur Überwachung bzgl. Safeguards nach Lagerverschluss werden im Konzeptbericht zum Monitoring dokumentiert, welcher Bestandteil des Rahmenbewilligungsgesuchs ist. Diese Konzepte werden stufengerecht im Rahmen der weiteren nuklearen Bewilligungen vertieft (Baugesuch, Betriebsgesuch, Verschluss).

Empfehlung Nr. 4.3.1-07*HSK, Seite 96:*

Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten sind die Langzeitbeständigkeit, die Zuverlässigkeit und die Wartungsmöglichkeiten der [Überwachungs-]Instrumente noch genauer aufzuzeigen.

Stellungnahme der Nagra:

Im Rahmen von Partnerprojekten (z.B. EU-FP7: MoDeRn) werden Messsysteme für das Monitoring entwickelt und getestet. Dabei sind die erforderliche lange Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Sensoren, die Energieversorgung und die Datenübertragung zentrale Themen.

Empfehlung Nr. 4.3.1-08

HSK, Seite 96:

Die HSK erwartet, dass zwecks Beweissicherung bereits vor dem Bau eines geologischen Tiefenlagers der natürliche hydrogeologische und radiologische Zustand des Standortes im Rahmen eines Monitoringprogrammes während der Standortcharakterisierung erhoben wird (Nullmessung). Diese Messungen sollen während des Baus, des Betriebs und der schrittweisen Verfüllung des Tiefenlagers weitergeführt werden und Vergleichsmöglichkeiten für die spätere nachbetriebliche Überwachungsphase liefern.

Stellungnahme der Nagra:

Es ist vorgesehen, vor Beginn mit den Untertagarbeiten (Erschliessung und Bau Felslabor) mit einem Feldprogramm den natürlichen Zustand von Schlüsselparametern zu bestimmen (Nullmessungen). Hierzu werden existierende oder neue Bohrungen (Langzeitbeobachtungssysteme) sowie Messungen an der Oberfläche genutzt. Beim Bau und Betrieb des Tiefenlagers sowie in der Beobachtungsperiode wird die Veränderung der Schlüsselparameter kontinuierlich aufgezeichnet bzw. werden Daten periodisch erhoben, um allfällige Änderungen feststellen zu können. Dies dient einerseits der Beweissicherung und liefert andererseits einen wichtigen Datensatz für die Kalibrierung der Standortmodelle. Das Programm für diese Messungen (was, wann, wie und wo) wird in einem Monitoringkonzept für das Rahmenbewilligungsgesuch festgelegt.

4.3.2 Rückholung**Empfehlung Nr. 4.3.2-01**

HSK, Seiten 94 und 98:

Seite 94: Die Detailausführungen zur Rückholung der Abfälle müssen, falls das Projekt weitergeführt wird, im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch noch genauer erarbeitet werden und dabei auch die verschiedenen möglichen Szenarien, die zum Entscheid eines Rückholens der Abfälle führen könnten, aufzeigen.

Seite 98: Die Rückholung der eingelagerten Abfallbehälter ist nach Ansicht der HSK grundsätzlich machbar. Eine erleichterte Rückholbarkeit der Abfälle ist dahingehend sichergestellt, dass die Verfüllung und der Verschluss der Gesamtanlage einschliesslich der Zugangsbauwerke schrittweise erfolgt und sich über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten erstreckt. Bis zur letzten Verschlussstufe, der Verfüllung und Versiegelung der Rampe, ist die Zugänglichkeit zu den eingelagerten Abfällen gewährleistet. Im Falle der Realisierung des Projekts ist das Vorgehen zur Rückholung der Abfälle detaillierter zu erarbeiten.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für die Rückholung weiter vertieft als Input für das einzureichende Projekt (Anlage in ihren Grundzügen). Die Konzepte werden stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Management Prozesses festgehalten.

Mögliche generelle Gründe zum Rückholen der Abfälle werden im Entwurf der HSK-Richtlinie G03 (HSK 2008) angesprochen. Generell ist die Nagra der Meinung, dass die Rückholbarkeit gewährleistet werden muss, unabhängig vom Grund einer allfälligen Rückholung.

Empfehlung Nr. 4.3.2-02*HSK, Seite 94:*

Bei einer allfälligen Rückholung muss gewährleistet sein, dass die zurückgeholten Behälter an der Oberfläche unter Einhaltung der Strahlenschutzgesetzgebung sicher gehandhabt werden können. Es soll deshalb in Erwägung gezogen werden, die Übertageanlagen (Betriebsgebäude, Schleuse) bis zum definitiven Verschluss des Lagers betriebstauglich zu halten.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für die Rückholung weiter vertieft als Input für das einzureichende Projekt (Anlage in ihren Grundzügen). Dazu gehört insbesondere auch die Untersuchung und Beschreibung der Abläufe zur Rückholung und die Klärung des Umgangs mit den rückgeholten Abfällen in den Grundzügen. Die Konzepte zur Handhabung rückgeholter Behälter werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Management festgehalten. Diese Projektkonzepte bilden auch eine Grundlage bei der eingeleiteten Planung von Anlagenmodulen für die Empfangsanlagen.

Die Auslegung der Oberflächenanlagen unter Berücksichtigung der Rückholung erfolgt stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte auf Grundlage der standortspezifischen Randbedingungen. Die definitive Auslegung der Oberflächenanlagen erfolgt für das nukleare Baugesuch.

Empfehlung Nr. 4.3.2-03*KSA, Empfehlung 5-6, Seiten 50, 51 und 96:*

Die Rückholstudie soll bezüglich der Verlässlichkeit bzw. Reparierbarkeit der automatisierten Rückbaugeräte bei den vorherrschenden Einsatzbedingungen und bezüglich der zum Rückbau eventuell notwendigen Oberflächenanlagen vertieft werden.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für die Rückholung erarbeitet, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Dazu gehören insbesondere auch vertiefte Abklärungen und Untersuchungen der In-situ-Bedingungen (Standfestigkeit untertägiger Anlagen, Temperaturen, Zustand der Schienen, etc.) zum Zeitpunkt der Rückholung und die Überprüfung und möglicherweise die Verbesserung der Rückholkonzepte inkl. der Auslegung der Rückholungseinrichtungen (Zuverlässigkeit, Robustheit). Die Konzepte zur Handhabung rückgeholter Behälter werden hinsichtlich der Auslegung der Oberflächenanlagen,

inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Im Rahmen der Untersuchungen im Felslabor am Standort sind Demonstrationsversuche zur Rückholung vorgesehen; diese werden im Hinblick auf das nukleare Baubewilligungsgesuch durchgeführt.

Die Konzepte und die Auslegung werden stufengerecht für die weiteren Bewilligungsschritte verfeinert.

Empfehlung Nr. 4.3.2-04

HSK, Seite 94:

Die Felssicherung der BE/HAA-Lagerstollen ist nur auf eine kurze Betriebszeit ausgelegt. Nach der Einlagerung der BE/HAA-Behälter und der Verfüllung mit Bentonitgranulat ist solange mit Konvergenzerscheinungen im Gebirge zu rechnen, bis sich ein Kräftegleichgewicht mit der Verfüllung eingestellt hat. Bei einer frühzeitigen Rückholung könnten teilweise reduzierte und instabile Tunnelquerschnitte vorliegen, wodurch ein fernbedientes Rückholen der Behälter ohne intensive Nachsicherung nicht möglich wäre. Die Nagra legt zu dieser Problematik Überlegungen zur Nachsicherung vor (ROWA 1999). Inwiefern bei solchen Verhältnissen die Arbeiten ausschliesslich fernbedient erfolgen können, bleibt abzuklären.

Stellungnahme der Nagra:

Die Konzepte zur Rückholung werden stufenweise verfeinert. Dazu gehört auch eine vertiefte Analyse der In-situ-Bedingungen. Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch ist eine überarbeitete Version des Rückholungskonzepts geplant.

Empfehlung Nr. 4.3.2-05

HSK, Seite 94:

Die Nagra geht in ihrem Rückholkonzept davon aus, dass die für den Einlagerungsbetrieb verlegten Schienen bei der Rückholung der BE-Behälter noch zur Verfügung stehen. Die starke Temperaturzunahme und die Konvergenz des Gebirges werden jedoch zu Verformungen an den Schienen führen, was deren Wiederverwendung in Frage stellen könnte. Hier besteht noch Abklärungsbedarf.

Stellungnahme der Nagra:

Diese Empfehlung wird bei der weiteren Vertiefung der Konzepte zur Rückholung berücksichtigt (Teil der Analyse der erwarteten In-situ-Bedingungen).

Empfehlung Nr. 4.3.2-06

HSK, Seite 94:

Je später die Rückholung der BE-Behälter erfolgt, desto höhere Temperaturen sind in den Lagerstollen zu erwarten. Berechnungen der Nagra (NTB 01-04) gehen von Temperaturen aus, die bereits nach wenigen Jahren an der Behälter-Bentonit-Grenze über 150°C und an der

Bentonit-Opalinuston-Grenze bei 80°C liegen. In ROWA (1999) werden die Anforderungen bezüglich höherer Temperaturen für die verschiedenen Rückholmodule zwar erwähnt, die dort angenommenen Temperaturen sind jedoch seither nach oben korrigiert worden und die technischen Lösungen des Temperaturproblems werden nicht im Detail ausgeführt.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für die Rückholung erarbeitet, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Dazu gehören insbesondere auch vertiefte Abklärungen und Untersuchungen der In-situ-Bedingungen (Standfestigkeit untertägiger Anlagen, Temperaturen, etc.) zum Zeitpunkt der Rückholung und die Überprüfung und möglicherweise die Verbesserung der Rückholkonzepte, inkl. der Auslegung der Rückholungseinrichtungen unter Berücksichtigung hoher Temperaturen.

Im Rahmen der Untersuchungen im Felslabor am Standort sind Demonstrationsversuche zur Rückholung vorgesehen.

Die Konzepte und die Auslegung werden stufengerecht für die weiteren Bewilligungsschritte verfeinert.

4.4 Anlagenkonzepte und Betriebsabläufe

Empfehlung Nr. 4.4-01

HSK, Seite 88:

Hinsichtlich der Linienführung des Zugangstunnels (Rampe) sieht die HSK noch gewisse Optimierungsmöglichkeiten. Nach Ansicht der HSK ergäben sich bezüglich der Wasserhaltung und der Lüftung wesentliche Vorteile in einer Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht auf verschiedenen Tiefenlagen.

Stellungnahme der Nagra:

Eine Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht stellt auch für die Nagra eine Optimierung aus baulicher und betrieblicher Sicht dar. Dahingehend wurde das Projekt zum Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a) bereits angepasst und diente als Projekt für die Kostenstudie 2006.

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden alternative, standortunabhängige Projektkonzepte auch hinsichtlich der Linienführung sowie der Anzahl Schächte erarbeitet, soweit dies für die Grundzüge des Projekts massgebend ist.

Die Linienführung des Zugangstunnels wird in den Grundzügen im Rahmen des Rahmenbewilligungsgesuchs aufgezeigt, wobei voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden. Die definitive Linienführung erfolgt stufengerecht im Rahmen des nuklearen Baugesuchs auf Grundlage der standortspezifischen erdwissenschaftlichen Untersuchungen.

Empfehlung Nr. 4.4-02

HSK, Seite 90:

Aus dem Vergleich mit ausländischen Endlagerprojekten (u.a. Deutschland, Finnland, Schweden, Frankreich, USA) sind hinsichtlich des Layouts der Gesamtanlage Optimierungsansätze erkennbar. Hier ist beispielsweise aufzuführen, dass alternativ zum Zugangstunnel (Rampe) ein zweiter Schacht in Frage kommen könnte (Vorteil für die Bewetterung). Ein weiterer Ansatz besteht in der Überlegung, Schacht und Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenknoten miteinander zu verbinden, was für die Wasserhaltung und Lüftung Vorteile bringen könnte. Weiterhin könnte eine Neuordnung des Testlagers in einem separaten Bereich (beispielsweise in Form eines zusätzlichen Stollens) insofern von Vorteil sein, dass mögliche Beeinträchtigungen des wissenschaftlichen Messprogramms infolge der Bauaktivitäten ausgeschlossen werden können.

Stellungnahme der Nagra:

In Anlehnung an den Bergbau haben sich vor allem Vertikalschächte und Rampen als Varianten für die untertägige Erschliessung der Lagerzone für geologische Tiefenlager herauskristallisiert. Aus betrieblichen, Lüftungstechnischen und sicherheitstechnischen Gründen sind mindestens zwei unabhängige Verbindungen zu einem Tiefenlager vorgesehen. Die diversen gegenwärtigen ausländischen Lagerkonzepte basieren auf verschiedenen Optionen: Es gibt solche, welche nur über Vertikalschächte erschlossen werden (z.B. Projekt Argile 2005, Frankreich, ANDRA 2005) oder solche, welche Kombinationen mit Schächten und Rampe vorsehen (z.B. Olkiluoto, Finnland). Die ausländischen Konzepte unterscheiden sich auch in der Anzahl von Zugängen und Schächten. Sowohl die Art der Zugänge (Rampe, Schacht) als auch die Anzahl hängen von den standort- und system-spezifischen Randbedingungen ab (Tiefenlage, Geologie, Lagergrösse, Gewicht des Transportguts, Realisierungsprogramm, u.a.) und haben alle ihre Vor- und Nachteile.

Im Rahmen von standortunabhängigen (generischen) Projektkonzepten wurde damit begonnen, alternative Lagerauslegungen auch unter Berücksichtigung der Erfahrungen im Ausland zu entwickeln und miteinander zu vergleichen, nicht zuletzt mit dem Ziel, den Handlungsspielraum und die Robustheit zu erhöhen. Die alternativen Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die Auslegung erfolgt stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.4-03

HSK, Seite 75:

Das Tiefenlager sollte einen Sicherheitsabstand zu [bestehenden Sockelstörungen] haben, der nach schwedischen Studien in der Grössenordnung von 100 - 200 m liegt.

Stellungnahme der Nagra:

Diese Bedingung wurde bereits im Entsorgungsnachweis und wird auch bei einer zukünftigen Planung eines Tiefenlagers berücksichtigt. Im Rahmen der Identifizierung möglicher Standortgebiete im Rahmen des Sachplanverfahrens wird ein Sicherheitsabstand von 200 m zu regionalen Störungen eingehalten (Richtwert), bei entsprechenden Hinweisen kann er auch grösser sein.

Empfehlung Nr. 4.4-04

HSK, Seite 88:

Bei einem konkreten Bauprojekt sind die Bauwerke der Aussenanlagen sowie die oberflächennahen Teile des Tiefenlagers entsprechend ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung gemäss der Richtlinie HSK-R-04 zu klassieren und mit Hilfe der SIA-Normen zu bemessen. Mit der Klassierung wird das Niveau der Erdbebengefährdung festgelegt.

Stellungnahme der Nagra:

Die Klassierung der Bauwerke erfolgt mit der Festlegung der Grundlagen gemäss Hierarchie B1 im Rahmen der Vorbereitung des nuklearen Baugesuchs.

Empfehlung Nr. 4.4-05

HSK, Seite 93:

Für die Einlagerung der Abfälle mit höheren Anteilen an Nitrat (sog. LMA-2) ist ein separater Lagertunnel vorgesehen, der in direkter Fortsetzung des hinteren LMA-Betriebstunnels liegt (siehe Fig. 3.2-2). Damit liegt der hintere Abschnitt des Betriebstunnels LMA direkt im Strahlenfeld der im Lagertunnel LMA-2 eingelagerten Abfälle. Aus Gründen des Strahlenschutzes und der besseren radiologischen Überwachung der Abluft schlägt die HSK vor, den Lagertunnel LMA-2 gegenüber dem Betriebstunnel seitlich abzuwinkeln.

Stellungnahme der Nagra:

Das Projekt zum Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a) wurde diesbezüglich bereits angepasst und ist mit abgewinkeltem Lagertunnel LMA-2 in das Projekt zur Kostenstudie 2006 eingeflossen.

Empfehlung Nr. 4.4-06

HSK, Seiten 88 und 97:

Seite 88: Die Dimensionen der vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte sind für den Bau und den Betrieb des Lagers teilweise eher knapp. [...]

Der neu vorgeschlagene grössere Schachtquerschnitt in Kombination mit der Skipförderung (Gefässförderung) erlaubt nur bedingt Transporte von sperrigem und schwerem Baumaterial durch den Schacht. Die geplante Trennung zwischen Baubetrieb durch den Schacht und Einlagerungsbetrieb durch den Zugangstunnel ist deshalb nicht vollständig möglich. Die HSK empfiehlt deshalb, die Tunnel- und Schachtquerschnitte in der nachfolgenden Planungsphase auf der Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenzen zu optimieren.

Seite 97: Die Tunnel- und Schachtquerschnitte sind auf der Grundlage des benötigten Betriebslichtraumprofils, der Linienführung, der Bauverfahren und der zu erwartenden Konvergenz zu optimieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Tunnel- und Schachtquerschnitte wurden bzw. werden unter Berücksichtigung der Anforderungen bzgl. Bau, Betrieb und Verschluss neu evaluiert, vgl. auch die Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.4-08.

Empfehlung Nr. 4.4-07*KNE, Seite H 10:*

Die in NTB 02-02 vorgeschlagenen Ausbruchquerschnitte des Zugangstunnels mit rund 43.0 m² im Deckgebirge und 36.3 m² im Opalinuston erscheinen uns sowohl aus Sicht des Baus als auch des späteren Betriebes als zu klein. Die Begründung für grössere Querschnitte liegt vor allem in dem zu erwartenden Begegnungsverkehr. Dieser Punkt wurde mit der Nagra besprochen, welche darauf hin in NIB 04-06 grössere Ausbruchquerschnitte von bis zu 54.5 m² vorgeschlagen hat. Die neu vorgeschlagenen grösseren Querschnitte erachten wir als vernünftige Mindestwerte. Im Rahmen der späteren Detailplanung sind diese Querschnitte jedoch auf der Grundlage der Linienführung, der Bauverfahren, der zu erwartenden Konvergenzen und des Innenausbaus weiter zu optimieren.

Stellungnahme der Nagra:

Der Querschnitt des Zugangstunnels wurde bzw. wird unter Berücksichtigung der Anforderungen bzgl. Bau, Betrieb und Verschluss neu evaluiert (vgl. auch die Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.4-08).

Empfehlung Nr. 4.4-08*KNE, Seiten H 14 – H 15 (bzw. Seite 8):*

Die Dimensionen der in NTB 02-02 vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte sind für den Bau und Betrieb teilweise eher knapp. Mit dem ergänzenden Bericht NIB 04-06 hat die Nagra neue Vorschläge mit grösseren Querschnitten für den Zugangstunnel sowie den Lüftungs- und Bauschacht vorgelegt. Wir erachten diese neuen Querschnitte für alle vorgesehenen Bauetappen und Betriebsphasen als ausreichend im Sinne von minimal erforderlich. Die vorgeschlagenen Querschnittabmessungen werden bei allen Bauwerksbestandteilen als eine untere Grenze der wirtschaftlichen und baubetrieblichen Machbarkeit betrachtet. Auch der neu vorgeschlagene Schachtquerschnitt in Kombination mit der Skipförderung erlaubt nur bedingt Transporte von Baumaterial durch den Schacht. Die postulierte Trennung zwischen Baubetrieb durch den Schacht und Einlagerungsbetrieb durch den Zugangstunnel ist deshalb nicht vollständig möglich. Wir empfehlen, die Tunnel- und Schachtquerschnitte in einer nachfolgenden Planungsphase nochmals zu überprüfen. [...]

Die Ausrüstung des Schachtes bedarf hinsichtlich des Schachtspiegels, d.h. hinsichtlich der technischen Ausrüstung des Schachtes und der jeweiligen Anordnung untereinander, einer Überprüfung.

Stellungnahme der Nagra:

Die Querschnitte der untertägigen Anlagenteile insbesondere im Wirtgestein sind unter Berücksichtigung gegensätzlicher Forderungen zu optimieren: Einerseits sind die Querschnitte aus Sicht der Langzeitsicherheit (Störung des Wirtgesteins, Verfüllung, hydraulisch bevorzugte Fliesspfade) klein zu halten, während aus baulichen und betrieblichen Gesichtspunkten eher grössere Querschnitte erwünscht sind.

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden alternative (teilweise standortunabhängige) Projektkonzepte bezüglich der Anordnung und Querschnittswahl unter Berücksichtigung der Lüftungstechnischen, baulichen und betrieblichen Anforderungen und unter Berücksichtigung der Vorgaben bzgl. Langzeitsicherheit untersucht, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Die alternativen Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die Auslegung der Querschnitte erfolgt auf Grundlage standortspezifischer erdwissenschaftlicher Untersuchungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.4-09

HSK, Seite 89:

Die thermisch induzierten Zusatzspannungen sind im Tiefenlager selbst am grössten und Deformationen können zu Schäden an den Innenschalen der Betriebs- und Bautunnel führen. Emch+Berger (2005) schätzen aufgrund überschlägiger Rechnungen ab, dass der vorgesehene Innenausbau seine Aufnahmekapazität für diese Zusatzbelastung infolge thermischer Verformung nach rund 50 Jahren erreicht haben wird. Schäden müssten bei einem längeren Offenhalten dieser Tunnel repariert werden. Die HSK empfiehlt, die Dimensionierung der Innenschalen im Falle der Realisierung des Lagers genauer abzuklären.

Stellungnahme der Nagra:

Generell wird die Forschung und Entwicklung zur Vertiefung des Prozessverständnisses für den Opalinuston bzgl. Felsmechanik und gekoppelter Phänomene weitergeführt. Dieses Prozessverständnis bildet u.a. eine wichtige Grundlage für die Dimensionierung von Tunnelgewölben der untertägigen Anlagenteile. Zudem werden für das Sachplanverfahren und im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch standortunabhängige Projektkonzepte entwickelt, soweit diese für das Projekt in den Grundzügen relevant sind. Die Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die eigentliche Dimensionierung der untertägigen Anlagenteile in der Lagerzone erfolgt stufengerecht für das nukleare Baugesuch auf Grundlage der standortspezifischen erdwissenschaftlichen Untersuchungen (inkl. Untersuchungen im Felslabor).

Empfehlung Nr. 4.4-10

KNE, Seiten H 8 und H 9:

Seite H 8: Die thermisch induzierten Zusatzspannungen und Deformationen können schon in relativ kurzen Zeiträumen zu Schäden an den Innenschalen der Betriebs- und Bautunnel führen.

Seite H 9: Die Dimensionierung der verschiedenen Innenschalen nach NIB 00-51 Rev.1 sollte aufgrund der dargestellten Elementgrössen einer eingehenden Überprüfung in der nächsten Planungsphase unterzogen werden.

Stellungnahme der Nagra:

Vgl. Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.4-09.

Empfehlung Nr. 4.4-11

KNE, Seiten 8 und H 16:

Der vorgelegte Entsorgungsnachweis enthält allerdings keine Aussagen zur Abhängigkeit der bautechnischen Machbarkeit von der Tiefe unter der Geländeoberkante.

Stellungnahme der Nagra:

Die bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers ist u.a. vom In-situ-Spannungsfeld und auch von den felsmechanischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Wirtgesteins und den darüberliegenden Schichten abhängig. Eine Aussage zur bautechnischen Machbarkeit bedingt daher, dass diese Daten mit genügender Genauigkeit abgeschätzt werden können, wobei die Ansprüche mit zunehmender Projektstufe wachsen.

Im Rahmen der Vorbereitungen zur Etappe 1 des Sachplans wurden Modellrechnungen für SMA-Lagerkammern durchgeführt, welche auch die Bedeutung unterschiedlicher Tiefen für ein SMA-Lager untersuchten (Electrowatt Infra 2004, TeKamp 2008). Die Resultate dieser orientierenden Berechnungen können teilweise auch für ein HAA-Lager verwendet werden. Detaillierte Aussagen zur bautechnischen Machbarkeit werden für den gewählten Standort und die gewählte Lagertiefe in den Unterlagen zum Rahmenbewilligungsgesuch präsentiert, welche auch die Erkenntnisse aus den laufenden Felduntersuchungen am Mont Terri (z.B. MB-Versuch) berücksichtigen werden.

Zusätzlich wird untersucht, welche alternativen Möglichkeiten zur Ausbruchsicherung der Hohlräume bestehen, ohne unzulässige negative Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit in Kauf nehmen zu müssen. Untersuchungen zum Einsatz von Niedrig-pH-Spritzbeton wurden im EU-FP6 Projekt ESDRED durchgeführt (Fries et al. 2007). Neue In-situ-Versuche im Felslabor Mont Terri sind geplant (SR-Versuch).

Empfehlung Nr. 4.4-12

KNE, Seite H 15:

Im Zusammenhang mit der Ausbruchsicherung der Lagerstollen ohne Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement sehen wir weiteren Forschungsbedarf.

Stellungnahme der Nagra:

Generell wird die Forschung und Entwicklung zur Vertiefung des Prozessverständnisses für den Opalinuston bzgl. Felsmechanik und gekoppelter Phänomene weitergeführt. Dieses Prozessverständnis bildet eine wichtige Grundlage für eine Ausbruchsicherung der Lagerstollen ohne Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement.

Zusätzlich wurden Studien begonnen, standortunabhängige (generische) Projektkonzepte für alternative Ausbruchsicherungen der BE- / HAA-Lagerstollen sowohl ohne zementhaltige Materialien aber auch solche mit zementhaltigen Materialien zu entwickeln und aus Sicht der Langzeitsicherheit zu beurteilen, um den Handlungsspielraum und die Robustheit der Anlagenkonzepte zu erweitern. Die zu untersuchenden Optionen orientieren sich an erprobten Konzepten aus dem Tunnel- und Bergbau und berücksichtigen laufende Entwicklungen, z.B. von Portlandit-freien Zementen. Die alternativen Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Bei Bedarf werden Versuche in den Felslabors (z.B. Mont Terri) durchgeführt. Die definitive Ausbruchsicherung kann erst aufgrund der standortspezifischen Situation und In-situ-Daten festgelegt werden. Die definitive Auslegung der Ausbruchsicherung wird auf der Basis der Erkenntnisse aus dem Felslabor am bewilligten Standort für das nukleare Baugesuch festgelegt.

Empfehlung Nr. 4.4-13

KNE, Seite H 15:

Weiterhin sollte das Wasserhaltungskonzept dahingehend überprüft werden, dass zumindest streckenweise geschlossene Sammelleitungen einzuplanen sind. Zum Layout der Wasserhaltung sind wir der Auffassung, dass Wasser aus den Deckschichten nicht bis in den OPA geführt werden darf.

Stellungnahme der Nagra:

Auf der Basis von Daten aus der Erkundung von der Oberfläche wird am bewilligten Standort das Wasserhaltungskonzept evaluiert und in das Baugesuch für das Felslabor integriert. Grundsätzlich soll die Wasserhaltung verhindern, dass Wasser aus den Deckschichten in das Wirtgestein der Lagerzone gelangt.

Das Wasserhaltungskonzept wird auf der Basis der Erkenntnisse aus der untertägigen Exploration überprüft und für die definitive Auslegung der Anlagenteile des Lagers zur Vorbereitung des nuklearen Baugesuchs aktualisiert.

Empfehlung Nr. 4.4-14

HSK, Seiten 88 – 89 und 97 (entspricht KNE, Seiten 8 und H 15):

Seite 88 – 89: Die gewählten Bauverfahren für Ausbruch, Schutterung und Sicherung beurteilt die HSK als grundsätzlich machbar. Im Falle der Realisierung des Projektes sollten nach Ansicht der HSK folgende Aspekte noch näher geklärt werden:

- Zweckmässigkeit des Raisedrill-Verfahrens: Diese Methode hat den Nachteil, dass die Felssicherung und der Einbau der Schachtauskleidung erst nach Abschluss des Bohrverfahrens erfolgen kann und ein sofortiges Reagieren bei Problemen der Standfestigkeit des Gebirges und der Wasserhaltung eingeschränkt ist.
- Wasserhaltungskonzept: Zum Layout der Wasserhaltung vertritt die HSK die Auffassung, dass Wasser aus den überliegenden Deckschichten nicht bis in den Opalinuston hinunter geführt werden darf. Das könnte zu einer Entfestigung des Opalinustons bei Kontakt mit Wasser führen. Das in der Rampe und im Schacht zufließende Wasser sollte oberhalb des Opalinustons vor Ort aufgefangen und abgepumpt werden, was streckenweise geschlossene Sammelleitungen erfordert.
- Der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine zur Auffahrung der BE/HAA-Lagerstollen aus dem engen Bautunnel heraus bedarf in einigen Details (beispielsweise Freiflächen für Auf- und Abbau inkl. Nachläufer) noch weiterer Klärung. Auch bezüglich der Ausbruchsicherung der Lagerstollen ohne Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement sieht die HSK weiteren Abklärungsbedarf.

Seite 97: Es besteht Abklärungsbedarf im Bauverfahren betreffend Zweckmässigkeit des Raisedrill-Verfahrens, Wasserhaltung, Einsatz einer Tunnelbohrmaschine und Ausbruchsicherung.

Stellungnahme der Nagra:

Die erwähnten Empfehlungen betreffen Aspekte der Bauausführung. Als Vorbereitung für das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte zu den aufgelisteten Bauverfahren entwickelt, soweit sie für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Zum Teil wurde mit diesen Arbeiten bereits begonnen.

Die Projektkonzepte, inkl. Ableitung von Anforderungen, werden stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Auf der Basis von standortspezifischen Grundlagen aus den erdwissenschaftlichen Untersuchungen erfolgt die Festlegung der Bauverfahren stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.4-15

KNE, Seite H 15 (bzw. Seite 8):

Die Arbeitssicherheit ist grundsätzlich in allen Bau- und Betriebsphasen gewährleistet. Für die jeweiligen Bauphasen sind Flucht- und Rettungsmöglichkeiten in den Vortrieben in den nachfolgenden Planungsphasen noch detaillierter aufzuzeigen, indem beispielsweise die Standorte der Rettungscontainer im Grubengebäude aufgezeigt werden.

Der Einlagerungsbetrieb ist sicher durchführbar. Im Zuge der nachfolgenden Detailplanung wird vorgeschlagen, eine detaillierte Ermittlung der Brandlasten durchzuführen. Hieraus resultiert die Festlegung eines Sicherheitskonzeptes für den Einlagerungsbetrieb ab der Bauetappe 3.

Stellungnahme der Nagra:

Als Vorbereitung auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte für Flucht- und Rettungsmöglichkeiten zusammen mit Lüftungskonzepten erarbeitet, soweit sie für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Diese Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die weitere Planung erfolgt auf Grundlage standortspezifischer Untersuchungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte und unter Berücksichtigung der verschiedenen Ausbaustufen, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch evtl. noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.4-16

HSK, Seiten 89 und 97:

Seite 89: Lüftungstechnische Probleme werden für die Bauetappen 1 und 2 keine gesehen. Für die Bauetappe 3 hingegen ist eine Erhöhung der Luftmengen unumgänglich. Die zusätzliche Erwärmung infolge der Einlagerung der wärmeentwickelnden BE/HAA stellt in dieser Phase erhöhte Anforderungen an das Lüftungssystem; es sind zusätzliche Kühlmöglichkeiten in Erwägung zu ziehen. Eine unabhängige und rauchfreie Luftversorgung für Rettungsbombe und Zugangsbereich ist zusätzlich zu prüfen. Die aufgeführten Punkte betreffen nach Ansicht der HSK lösbare Probleme und stellen die grundsätzliche Machbarkeit nicht in Frage.

Seite 97: Die Auslegung der Lüftung ist insbesondere für die dritte Bauetappe, wenn viel Wärme abzuführen ist, zu optimieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Lüftung muss in allen Phasen vom Bau bis zum Verschluss des Tiefenlagers für ein Klima sorgen, das die Zugänglichkeit für Personen ermöglicht und die Funktionstüchtigkeit von Einrichtungen sicherstellt. Durch Versorgung der untertägigen Anlagenteile mit Frischluft unterstützt die Lüftung die Einhaltung der gesetzlichen Luftqualität (unterstützt durch Entstaubungsanlagen) und klimatischen Bedingungen (unterstützt allenfalls durch Kühlmassnahmen). Im Störfallereignis (v.a. Brand) stellt die Lüftung ein wichtiges Element bei der Rettung und Intervention dar. Während dem Betrieb mit radioaktiven Materialien (Freisetzung volatiler Nuklide) stellt die Lüftung auch die Einhaltung von Abgabelimiten volatiler Nuklide sicher.

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden standortunabhängige Projektkonzepte zur Lüftung erarbeitet, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Die Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die Auslegung der Lüftung erfolgt auf Grundlage standortspezifischer Untersuchungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte, wobei beim Rahmenbewilligungsgesuch voraussichtlich noch Alternativen offen gehalten werden.

Empfehlung Nr. 4.4-17*KNE, Seite H 15:*

Lüftungstechnische Probleme werden für die Bauetappe 1 und 2 nicht gesehen, so lange die vorgegebenen Richtwerte jederzeit gewährleistet werden können. Für die Bauetappe 3 hingegen ist eine Erhöhung der Luftmengen unumgänglich. Weiterhin sind bzgl. der zusätzlichen Erwärmung des Gebirges infolge Einlagerungsbetrieb ggf. zusätzliche Kühlmöglichkeiten in Erwägung zu ziehen. Eine unabhängige und rauchfreie Luftversorgung für Rettungsbombe und Zugangsbereich ist zusätzlich zu prüfen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Lüftung wird neu evaluiert, auch unter Berücksichtigung der Anforderungen aus der Störfallbewältigung (vgl. auch die Stellungnahmen zu den Empfehlungen Nr. 4.4-16 und 4.4-18).

Empfehlung Nr. 4.4-18*KNE, Seite H 13:*

Die klimatischen Verhältnisse während der Bauarbeiten sind noch detaillierter zu beschreiben. Ein möglicher Bedarf an Kühleinrichtungen im laufenden Betrieb unter Berücksichtigung der Wärmequellen (Gestein, Motoren, Abgase u.a.) ist ebenfalls zu prüfen.

Stellungnahme der Nagra:

Im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch werden Projektkonzepte erstellt, welche den Kühlungsbedarf und die hierzu erforderlichen Massnahmen für verschiedene mögliche klimatische Verhältnisse ermitteln, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind. Diese Projektkonzepte werden hinsichtlich ihrer Auslegung, inkl. Ableitung von Anforderungen, stufengerecht präzisiert und im Rahmen des Requirements Managements festgehalten.

Die weitere Planung der Massnahmen zur Sicherstellung der erforderlichen klimatischen Verhältnisse erfolgt auf der Grundlage der standortspezifischen erdwissenschaftlichen Untersuchungen stufengerecht für die verschiedenen Bewilligungsschritte.

Empfehlung Nr. 4.4-19

HSK, Seite 98:

Die genauen Arbeitsabläufe des Betriebs, die detaillierte Umsetzung der Überwachungsmaßnahmen sowie die Ausführung der Verfüllarbeiten und des endgültigen Verschlusses des Lagers sind im Falle der Realisierung des Projekts im Verlaufe der späteren Bewilligungsverfahren weiter zu konkretisieren.

Stellungnahme der Nagra:

Die Betriebs- und Arbeitsabläufe werden konzeptuell im Rahmenbewilligungsgesuch dargestellt, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind, und für die weiteren nuklearen Bewilligungen stufengerecht detaillierter ausgearbeitet. Dazu gehören auch die Abläufe für die Verfüllung und Versiegelung im Zusammenhang mit dem Verschluss des Lagers.

Empfehlung Nr. 4.4-20

HSK, Seite 145:

Die Anfangstemperatur des Behälters beeinflusst den Temperaturverlauf in der Umgebung wenig, sollte aber im Rahmen der Auslegung für die Betriebsphase genauer bestimmt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Es sind Modellrechnungen zur Temperaturentwicklung und den daraus resultierenden klimatischen Verhältnisse im Endlager während der Betriebsphase in Zusammenhang mit der Auslegung der Lüftung geplant bzw. zum Teil wurde damit bereits begonnen. Diese Arbeiten werden im Hinblick auf das Rahmenbewilligungsgesuch so detailliert durchgeführt, soweit diese für die Grundzüge des Projekts massgebend sind; die Arbeiten werden in den späteren Phasen stufenweise konkretisiert (vgl. auch Stellungnahme zu Empfehlung Nr. 4.4-16).

Empfehlung Nr. 4.4-21

HSK, Seiten 92 und 97:

Seite 92: Die von der Nagra diskutierten Konzepte zur Sicherheit, zum Strahlenschutz und zur Beherrschung von Störfällen während des Einlagerungsbetriebs sind dem heutigen Projektstand entsprechend aufgeführt. Diese Ausführungen sind nach Ansicht der HSK für den Machbarkeitsnachweis genügend. Für den Betrieb der ober- und unterirdischen Anlagen ergeben sich aus Sicht der HSK keine kritischen Sicherheitsaspekte. Da sich Bau- und Betriebsphase überlappen, erachtet es die HSK als wichtig, dass in einer nächsten Projektstufe die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungsereignisse und der zu treffenden Massnahmen noch verfeinert wird.

Seite 97: Die Analyse der möglichen untertägigen Gefährdungsereignisse und der zu treffenden Massnahmen sind zu verfeinern.

Stellungnahme der Nagra:

Als Vorbereitung für das Rahmenbewilligungsgesuch wird eine vereinfachte Analyse der Sicherheit für die verschiedenen Phasen des Lagerbaus und -betriebs durchgeführt und die

Lagerkonzepte unter dem Gesichtspunkt der (nuklearen und konventionellen) Sicherheit beurteilt und bei Bedarf angepasst. Dazu werden auch stufengerecht Gefährdungsbilder identifiziert und mögliche Massnahmen evaluiert. Im Rahmen der stufengerechten Verfeinerung der Auslegung der verschiedenen Ausbaustufen der Anlagen (Felslabor, Bauphase Gesamtanlage, Betrieb der Anlage, Verschluss) werden die Unterlagen für die verschiedenen Bewilligungsschritte vertieft und die Auslegung der Anlage aus Sicht der Sicherheit jeweils überprüft und bei Bedarf angepasst.

5 Weitere Aspekte

5.1 Das Management-System der Nagra

Empfehlung Nr. 5.1-01

KSA, Empfehlung 8-3, Seiten 89 und 99:

Die Nagra soll ihr Management-System unter Berücksichtigung der entsprechenden Empfehlungen der IEAO auf die Norm ISO 9004:2000 ausbauen und künftig laufend dem sich ändernden Stand des Entsorgungsprogramms anpassen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra hat 2005 ihr Qualitätsmanagement-System nach ISO 9001:2000 zertifizieren lassen. Das Qualitätsmanagement-System der Nagra ist so ausgerichtet, dass es alle relevanten Geschäftstätigkeiten umfasst (strategische Planung, operative Führung, Mitarbeiterprozesse, Projektprozesse, Öffentlichkeitsarbeit, unterstützende Prozesse). Das System wird bei Bedarf den neuen Bedürfnissen angepasst, auch unter Berücksichtigung der Empfehlungen der IAEA. Zurzeit besteht aus Sicht der Nagra kein Bedarf, das System auf ISO 9004 auszurichten.

Empfehlung Nr. 5.1-02

NEA-IRT, Seiten 56 – 57:

Die Nagra hat [...] erklärt, dass sie eine Zertifizierung ihres QS-Systems nach ISO 9001:2000 anstrebt und das IRT empfiehlt der Nagra mit der Zertifizierung fortzufahren. Damit wird das QS-System der Nagra einem formellen Audit unterzogen. Das IRT schlägt der Nagra ausserdem vor, in künftige Projektpläne und in ihr QS-System einen formellen Audit-Plan einzubeziehen und dabei eine Mischung von internen und externen Audits zu verwenden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra hat 2005 ihr Qualitätsmanagement-System nach ISO 9001:2000 zertifizieren lassen. Gemäss diesem werden regelmässig interne und externe Audits durchgeführt, welche auch die Projekte umfassen.

Empfehlung Nr. 5.1-03

KSA, Empfehlung 8-5, Seiten 92 und 100:

Die Nagra soll zudem in ihr QM-System einen Prozess "Wissensmanagement" aufnehmen.

Stellungnahme der Nagra:

Wissensmanagement (Knowledge-Management) ist Bestandteil des Nagra Qualitätsmanagement-Systems. Das von der Nagra betriebene Knowledge-Management ist Bestandteil der strategischen Planung und hat einen direkten Einfluss auf das mittelfristige Arbeitsprogramm und die strategische Ressourcenplanung. Bezüglich des Wissensmanagements sind auch die periodischen Synthesen zu erwähnen, wo in der Berichterstattung (Hauptberichte, Referenzberichte) das jeweilige Wissen integral und im Kontext dargestellt wird; diese Information wird auch in sogenannten Projektdokumentationen festgehalten.

Empfehlung Nr. 5.1-04

KSA, Empfehlung 8-5, Seiten 92 und 100:

Die Erkenntnisse und Daten aus Entwicklungs- und Forschungsarbeiten der Nagra sowie weiterer beteiligter Organisationen und der Behörden, sollen von der Nagra [in einer] Datenbank zusammengestellt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra hat im Rahmen ihres Qualitätsmanagement-Systems ein Knowledge-Management- und ein Requirements Management-System erstellt, um das relevante Wissen im Zusammenhang mit der Entwicklung der geologischen Tiefenlager unter Berücksichtigung der Anforderungen formell evaluieren zu können. In dieses System fliessen auch relevante Informationen anderer Organisationen (inkl. Behörden) ein. Die Resultate aus den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden in sogenannten Projektdokumentationen (Datenbanken) erfasst.

Empfehlung Nr. 5.1-05

NEA-IRT, Seite 57:

Das IRT ermuntert die Nagra zur Überprüfung der Instrumente und Methoden, die sie zur Archivierung, zur Suche und zum Bezug von Informationen benutzt, um das Firmengedächtnis zu erhalten - im Hinblick darauf, dass in einigen anderen Organisationen die Projektdokumentation nicht ausreichte, um alle wichtigen Informationen langfristig zu sichern.

Stellungnahme der Nagra:

Das Informations- und Wissensmanagement (Knowledge-Management) ist Bestandteil des 2005 zertifizierten Nagra Qualitätsmanagement-Systems (vgl. auch die Stellungnahmen zu den Empfehlungen Nr. 5.1-03 und 5.1-04).

Empfehlung Nr. 5.1-06

KSA, Seite 63:

Die KSA unterstützt die HSK, wenn sie eine auch personell unabhängige Nagra-interne Qualitätskontrolle als wichtig erachtet. Darüber hinaus sollte die Nagra ein Team aus externen Experten bilden, welche ihre Arbeiten im Sinne eines externen Review periodisch überprüft.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra gibt der Qualitätskontrolle durch unabhängige externe Reviews und Stellungnahmen einen hohen Stellenwert. Dementsprechend engagiert sie auf verschiedenen Ebenen unabhängige hochqualifizierte Personen, die eine unabhängige Meinung zu verschiedenen Aspekten der Nagra-Arbeit abgeben. Auf oberster Ebene wurde die Nagra-Verwaltung verstärkt mit einer Person mit ausgewiesenen Erfahrungen in grossen Projekten mit erdwissenschaftlichen Aspekten (P. Zbinden, ehem. Vorsitzender der Geschäftsleitung Alptransit Gotthard). Weiter hat die Nagra seit mehreren Jahren ein geologisches Beratergremium. Für ausgewählte Themen hat die Nagra Review-Teams mit international anerkannten Spezialisten engagiert, welche die Nagra-Arbeiten beurteilen (Canister Materials Review Board, Gas Review Team, etc.). Schliesslich unterhält die Nagra ein breites Netzwerk an Kontakten zu etablierten Wissenschaftlern, die für den Review von Berichten eingeschaltet werden.

Empfehlung Nr. 5.1-07

KSA, Empfehlung 8-3, Seiten 90 und 99:

Die Nagra [soll] ein ständiges Gremium von unabhängigen externen Experten bestellen, welches ihre Arbeiten auf Qualität, Vollständigkeit der Nachweisführung sowie die Grundausrichtung ihrer Tätigkeit überprüft.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra hat seit mehreren Jahren ein geologisches Beratergremium. Auch für andere spezifische Themen hat die Nagra ein Expertengremium (Canister Materials Review Board, Gas Release Review Board) mit international anerkannten Fachspezialisten. Die Nagra beabsichtigt, ihr Netzwerk an ständigen Experten zu erweitern. Weiter unterhält die Nagra Kontakte zu einer ganzen Reihe von anerkannten Wissenschaftlern, die als Reviewer für einzelne Arbeiten bzw. Berichte dienen.

5.2 Weitere organisatorische Aspekte**Empfehlung Nr. 5.2-01**

KSA, Seite 57:

Aus heutiger Sicht sind zwar im Zürcher Weinland kaum Nutzungskonflikte zu erwarten. Langzeitszenarien zum menschlichen Eindringen in ein Tiefenlager sind aber nach Ansicht der KSA immer mit Unsicherheiten behaftet: Es ist nicht abschliessend vorhersehbar, was Veranlassung sein könnte, in den Bereich eines geologischen Tiefenlagers vorzudringen. Ausserdem ist gegenüber wirtschaftlichen Argumenten für die hier zur Diskussion stehenden Zeiträume Vorsicht angebracht. Aus Sicht der KSA ist es daher angezeigt, im weiteren Verlauf des Verfahrens, das zu einem geologischen Tiefenlager führt, auch die Wirksamkeit von Sicherungsmassnahmen gegen menschliches Eindringen näher zu untersuchen.

Stellungnahme der Nagra:

Mögliche Massnahmen gegen menschliches Eindringen werden im Rahmenbewilligungsgesuch behandelt. Dazu gehören auch die Analyse der möglichen Ausgestaltung von "Markers" und deren Wirksamkeit sowie das Thema "Langzeitarchivierung".

Empfehlung Nr. 5.2-02

KSA, Empfehlung 8-6 [Seite 92 als "8-7" bezeichnet], Seiten 92 und 100:

Die Nagra und die Behörden sollen schon jetzt Forschungsarbeiten zur Weitergabe der Informationen über ein verschlossenes geologisches Tiefenlager an spätere Generationen aktiv verfolgen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Informationen zu einem versiegelten geologischen Tiefenlager sollen und müssen archiviert werden, und es sollen weitere Massnahmen ergriffen werden, um die Informationen für zukünftige Generationen zu erhalten. In Anbetracht des grossen internationalen Interesses wird

dieser Fragestellung im Kontext von internationalen Kooperationsprojekten nachgegangen, mit dem Ziel, die Methoden und Vorgehensweisen im Rahmen des Rahmenbewilligungsgesuchs auf Stufe Konzept darzulegen und zu beschreiben. Anschliessend werden die Unterlagen stufengerecht verfeinert; die Langzeitarchivierung und Markierung des Lagers sind auch Bestandteil der nachfolgenden Bewilligungsverfahren.

Empfehlung Nr. 5.2-03

KNE, Seiten E 14 – 15:

Es ist anzuregen, dass die den isotopengeochemischen Untersuchungen der Geosynthese zu Grunde gelegten Basisberichte, welche die eigentliche Datenanalyse enthalten, allgemein zugänglich gemacht werden. Denkbar wäre, die entsprechenden Berichte wenigstens als NTBs oder als Publikation in einer wissenschaftlichen Zeitschrift aufzubereiten (was wohl auch geplant oder bereits getan wurde) - hierzu wäre eine unabhängige Review sehr wünschenswert. Ein solches Vorgehen würde sicher zur - auch öffentlichen - Transparenz der Geosynthese und zu deren Akzeptanz als (erdwissen-) wissenschaftliche Einschätzung des OPAs als möglichem Wirtgestein beitragen.

Stellungnahme der Nagra:

Die isotopengeochemischen Untersuchungen wurden in einem Nagra Technischen Bericht veröffentlicht (Review Prof. G. de Marsily, Paris), die Modellierung der Wasserisotope in einer renommierten Fachzeitschrift (verschiedene unbekannte Reviewer), vgl. Gimmi & Waber 2004 resp. Gimmi et al. 2007. Generell ist es der Nagra wichtig, die wissenschaftlichen Resultate aus dem Nagra-Programm in anerkannten Fachzeitschriften zu publizieren.

Empfehlung Nr. 5.2-04

KNE, Seite E 15:

Bei künftigen Syntheseberichten ist zu empfehlen, dass die NAGRA die einzelnen Kapitel klarer zueinander in Bezug setzt und sie stärker untereinander vernetzt. Dazu gehört eine ausführliche und vollständige Indexierung und ein 'Executive Summary' zu Beginn von jedem Kapitel.

Stellungnahme der Nagra:

Bei zukünftigen Syntheseberichten wird versucht, den Bezug zwischen den einzelnen Kapiteln und die Vernetzung klarer darzustellen. Ob bei jedem Kapitel ein Executive Summary vorangestellt wird, oder eine umfassende Zusammenfassung am Anfang des Berichts, bleibt offen.

Empfehlung Nr. 5.2-05

KSA, Empfehlung 9-1, Seite 98:

Die Nagra soll die im Rahmen der Beurteilung durch HSK, KNE, NEA-IRT und KSA aufgeworfenen Fragen, die Hinweise und Empfehlungen sowie den identifizierten Bedarf an Forschung und Entwicklung – begleitend zum Entsorgungsprogramm gemäss Art. 32 KEG und Art. 52 KEV – im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprogramms weiter verfolgen.

Besondere Bedeutung ist dabei der Frage der für die Abfallbehälter verwendeten Werkstoffe beizumessen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Nagra hat den vorliegenden Bericht angefertigt, um das Vorgehen bei der Bearbeitung der in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis gemachten Hinweise und Empfehlungen zu klären; der Bericht ergänzt das strategische Arbeitsprogramm, welches im Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) dokumentiert ist. Ein Nagra-interner RD&D-Plan enthält die Details zu allen Forschungs- und Entwicklungsgebieten inklusive einer Darlegung der Anforderungen und dem Zeitpunkt der geplanten Studien.

Empfehlung Nr. 5.2-06

NEA-IRT, Seite 17:

Im Gespräch mit dem IRT wies die Nagra darauf hin, dass sie in der gegenwärtigen Phase des Entsorgungsprogramms keinen detaillierten Arbeitsplan aufstellen wollte, weil sie weder dem Prozess der Entscheidungsfindung noch den Ergebnissen verschiedener Prüfungsverfahren (einschliesslich der vorliegenden Expertenprüfung) vorgreifen wollte. Das IRT versteht diesen Entscheid. Für den Fall des Entscheids, das schweizerische Entsorgungsprogramm auf ein Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlands auszurichten, empfiehlt das IRT der Nagra jedoch, die verbleibenden Ungewissheiten nach Prioritäten zu ordnen und ein Arbeitsprogramm vorzubereiten, um diese Ungewissheiten weiter zu reduzieren.

Stellungnahme der Nagra:

Im vorliegenden Bericht wird aufgezeigt, wie die Arbeit im HAA-Programm in den nächsten Jahren ausgerichtet wird. Das Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) gibt die übergeordneten Aspekte des zukünftigen Arbeitsprogramms und der Nagra-interne RD&D-Plan eine Übersicht über die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für die nächsten 10 bis 15 Jahre (v.a. für das Rahmenbewilligungsgesuch).

Empfehlung Nr. 5.2-07

KSA, Empfehlung 8-1, Seiten 84 und 98:

Im Rahmen des von den Abfallproduzenten vorzulegenden Entsorgungsprogramms soll ein Forschungs- und Entwicklungsprogramm erstellt werden, das regelmässig dem aktuellen Stand von Wissen und Technik angepasst wird und auch sozialwissenschaftliche Untersuchungen und Projekte umfasst.

Stellungnahme der Nagra:

Das Entsorgungsprogramm (Nagra 2008a) enthält auch Angaben zum zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsprogramm. Dieses basiert auf einem detaillierteren Nagra-internen RD&D Plan. Darin sind keine sozialwissenschaftlichen Untersuchungen und Projekte vorgesehen, da gemäss Konzept Sachplan geologische Tiefenlager sozialwissenschaftliche Aspekte unter der Federführung des BFE mit den betroffenen Regionen abgewickelt werden.

Empfehlung Nr. 5.2-08

KSA, Empfehlung 8-4, Seiten 90 und 99:

In die Verfahrensschritte, die zur Umsetzung der geologischen Tiefenlagerung führen, insbesondere die im Anschluss an den Entsorgungsnachweis anstehende Standortwahl sollen alle wichtigen betroffenen Kreise einbezogen werden. Dieser Einbezug soll in einem geregelten partizipativen Prozess erfolgen, der gemäss dem aktuellen Stand des Wissens durchgeführt wird. Um die Glaubwürdigkeit des Verfahrens sicherzustellen, soll die Federführung beim Bund bzw. bei den betroffenen Kantonen liegen.

Stellungnahme der Nagra:

Die Standortwahl erfolgt gemäss Konzept Sachplan geologische Tiefenlager, welches unter der Federführung des BFE erarbeitet wurde. Das Konzept sieht ebenfalls einen klar geregelten partizipativen Prozess mit breiter Beteiligung der betroffenen Regionen vor. Auch die Umsetzung des Konzepts (d.h. die Standortwahl) erfolgt unter der Federführung des BFE.

Empfehlung Nr. 5.2-09

KSA, Empfehlung 8-2, Seiten 88 und 99:

Die Idee des Entsorgungsrats soll durch den Bund möglichst rasch umgesetzt werden.

Stellungnahme der Nagra:

Dies ist Aufgabe der Behörden und nicht der Nagra.

Anhang 2 – Zusammenstellung von Vorgaben in Gesetzen, Verordnungen und behördlichen Dokumenten für die Realisierung der geologischen Tiefenlager in der Schweiz

Tab. A.2-1: Entscheidungspunkte: Erforderliche Genehmigungen und Bewilligungen für die schrittweise Realisierung der geologischen Tiefenlager in der Schweiz

Phase / Meilenstein	Genehmigungen, Bewilligungen und Freigaben	Referenz
Standortwahl:		
SGT-Etappe 1 (Bearbeitung, Genehmigung)	Genehmigung Objektblätter der Etappe 1 (Stufe Vororientierung) für geologische Standortgebiete und Planungsperimeter	Konzept SGT (BFE 2008)
SGT-Etappe 2 (Bearbeitung, Genehmigung)	Genehmigung Objektblätter der Etappe 2 (Stufe Zwischenergebnis) für mindestens je 2 Standorte	Konzept SGT (BFE 2008)
Vorbereitung Rahmen- bewilligungsgesuch (RBG)	Bewilligung Feldarbeiten (erdwissenschaftliche Untersuchungen) im Hinblick auf das RBG	KEG Art. 35-36
SGT-Etappe 3 (Vorbereitung, Genehmigung)	Genehmigung Objektblatt der Etappe 3 (Stufe Festsetzung) für gewählten Standort SMA sowie HAA (zeitgleich mit Erteilung Rahmenbewilligung durch Bundesrat)	Konzept SGT (BFE 2008)
RBG (Vorbereitung, Prüfung, Bewilligungs- prozess)	Rahmenbewilligung	KEG Art. 12-14
Untertägige Exploration (Vorbereitung, Durchführung)	Bewilligung für Felslabor (Teil der erdwissenschaftlichen Untersuchungen zur Erarbeitung der Grundlagen für das nukleare Baugesuch)	KEG Art. 35-36
	Allfällige weitere erforderliche Bewilligungen nach kantonalem oder Bundesrecht	KEV Art. 61 Abs. 2
	Freigabe der Untersuchungen gemäss Bewilligung für erdwissenschaftliche Untersuchungen	KEG Art. 36 Abs. 1b
Bau Lager:		
Nukleares Baugesuch (Vorbereitung, Prüfung, Bewilligung)	Nukleare Baubewilligung	KEG Art. 15-17
Bau Lager	Freigabe für Bauten und Anlagenteile gemäss Baubewilligung	KEV Art. 26 & Anhang 4

Tab. A.2-1: (Fortsetzung)

Phase / Meilenstein	Genehmigungen, Bewilligungen und Freigaben	Referenz
Betrieb Lager:		
Nukleares Betriebsgesuch (Vorbereitung, Prüfung, Bewilligung)	Nukleare Betriebsbewilligung	KEG Art. 19-21 & Art. 37
Betrieb Lager	Freigaben verschiedener Stufen der Inbetriebnahme gemäss Betriebsbewilligung Ggf. Freigabe von freigabepflichtigen Änderungen in der Anlage	KEV Art. 29 & Anhang 4 KEV Art. 40
Vorbereitung Beobachtungsphase	Anordnungen des Departements für die Beobachtungsphase	KEG Art. 39 KEV Art. 68
Phase / Meilenstein	Genehmigungen, Bewilligungen und Freigaben	Referenz
Verschluss:		
Vorbereitung Verschluss Gesamtanlage	Bewilligung für den Verschluss der Gesamtanlage	KEG Art. 39 und 63
Periodische Aktualisierungen	Anpassung Entsorgungsprogramm Berechnung der Stilllegungs- und Entsorgungskosten	KEV Art. 52 Abs. 2 SEFV Art. 4

Tab. A.2-2: Einzureichende Unterlagen für die in Tab. A.2-1 aufgeführten Genehmigungen und Bewilligungen für die Realisierung der geologischen Tiefenlager.

Genehmigungen, Bewilligungen	Einzureichende Unterlagen	Referenz
Genehmigung Objektblätter SGT-Etappe 1 (Vororientierung)	Berichte mit: <ul style="list-style-type: none"> – Festlegung der Abfallzuteilung auf die geologischen Tiefenlager – Ableitung von Anforderungen an die Geologie (basierend auf orientierenden Sicherheitsbetrachtungen) – Vorschlag von geologischen Standortgebieten und deren Begründung – Grundlagen für die raumplanerische Bestandesaufnahme 	Konzept SGT
Genehmigung Objektblätter SGT-Etappe 2 (Zwischenergebnis)	Bericht mit Dokumentation der vorgeschlagenen Standorte und deren Begründung, inkl. provisorische Sicherheitsanalysen und Bewertung von raumplanerischen Aspekten und Aspekten der Umweltverträglichkeit	Konzept SGT
Bewilligung Feldarbeiten	a. Untersuchungsprogramm b. Geologischer Bericht c. Bericht über mögliche Auswirkungen der Untersuchungen auf Geologie und Umwelt d. Übersichtskarten und -pläne e. Gewünschte Dauer der Bewilligung	KEV Art. 58
Genehmigung Objektblatt SGT-Etappe 3 (Festsetzung)	Bericht zur Begründung des gewählten Standortes SMA bzw. HAA Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung (Die obigen zwei Berichte sind identisch mit denjenigen für die Rahmenbewilligungsgesuche)	Konzept SGT
Rahmenbewilligung	a. Sicherheits- und Sicherungsbericht, aus denen hervorgehen: <ol style="list-style-type: none"> 1. die Standorteigenschaften; 2. der Zweck und die Grundzüge des Projekts; 3. die voraussichtliche Strahlenexposition in der Umgebung der Anlage; 4. die wichtigen personellen und organisatorischen Angaben; 5. die Langzeitsicherheit b. Umweltverträglichkeitsbericht (UVP Stufe 1) c. Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung d. Konzept für die Beobachtungsphase und den Verschluss e. Zusatzberichte mit Angaben über: 1. Vergleich der zur Auswahl stehenden Optionen hinsichtlich der Sicherheit des geplanten Tiefenlagers; 2. Bewertung der für die Auswahl des Standorts ausschlaggebenden Eigenschaften; 3. Höhe der Kosten.	a, c – d: KEV Art. 23 b: USG Art. 9, UVPV Art. 6 sowie Anhang, Kapitel 4 e: KEV Art. 62

Tab. A.2-2: (Fortsetzung)

Genehmigungen, Bewilligungen	Einzureichende Unterlagen	Referenz
Bewilligung für Felslabor (erdwissenschaftliche Untersuchungen)	<ul style="list-style-type: none"> a. Untersuchungsprogramm b. Geologischer Bericht c. Bericht über mögliche Auswirkungen der Untersuchungen auf Geologie und Umwelt d. Übersichtskarten und -pläne e. Gewünschte Dauer der Bewilligung 	KEV Art. 58
Nukleare Baubewilligung	<ul style="list-style-type: none"> a. Anlagenkonzepte / Auslegungsgrundlagen gem. Art. 7–12 b. Umweltverträglichkeitsbericht (UVP Stufe 2) c. Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung d. Qualitätsmanagementprogramm für die Projektierungs- und die Bauphase e. Notfallschutzkonzept f. Projekt für die Beobachtungsphase und Plan für den Verschluss g. Bericht zur Übereinstimmung des Projekts mit der Rahmenbewilligung 	<ul style="list-style-type: none"> a – g: KEV Art. 24 Abs. 2 b: USG Art. 9, UVPV Art. 6 sowie Anhang, Kapitel 4
Nukleare Betriebsbewilligung	<ul style="list-style-type: none"> a. Organisatorische und technische Dokumente b. Diverse Unterlagen für die Betriebsbewilligung c. Nachweis für den Versicherungsschutz d. Bericht zur Übereinstimmung der Anlage mit der Rahmen- und der Baubewilligung e. Sicherheits- und Sicherungsbericht 	<ul style="list-style-type: none"> a – d: KEV Art. 28 Abs. 1 e: KEV, Anhang 3
Anordnungen für Beobachtungsphase	<p>Aktualisiertes Projekt für die Beobachtungsphase mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Umschreibung der nach Abschluss der Einlagerungen vorgesehenen Massnahmen zur Überwachung des Tiefenlagers – Vorschlag für die Dauer der Beobachtungsphase 	KEV Art. 68 Abs. 1
Bewilligung Verschluss Gesamtlager	<p>Projekt für den Verschluss mit folgenden Umschreibungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zu den Lagerräumen – die Überführung des Pilotlagers in einen langfristig sicheren Zustand – das Verfüllen und Versiegeln der Zugänge zum Tiefenlager – die Gewährleistung der Langzeitsicherheit 	KEV Art. 69 Abs. 2
Periodische Aktualisierungen	<ul style="list-style-type: none"> – Angepasstes Entsorgungsprogramm – Berichte zur Berechnung der Stilllegungs- und Entsorgungskosten 	<ul style="list-style-type: none"> KEV Art. 52 Abs. 2 SEFV Art. 4